

*90-летию Государственного гидрологического института  
и благодарной памяти своих учителей Николая Евгеньевича Кондратьева  
и Игоря Владимировича Попова — основоположников  
гидролого-морфологической теории руслового процесса  
посвящают авторы эту книгу*

**А.Б. Клавен, З.Д. Копалиани**

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ  
И ГИДРАВЛИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ  
РЕЧНЫХ ПОТОКОВ И РУСЛОВОГО ПРОЦЕССА**



Нестор-История  
Санкт-Петербург  
2011

УДК 556  
ББК 26.222.5  
К 47

Рецензент: доктор технических наук *В.А. Бузин*

**Клавен А.Б., Копалиани З.Д.**

К 47 Экспериментальные исследования и гидравлическое моделирование речных потоков и руслового процесса. — СПб. : Нестор-История, 2011. — 504 с.

ISBN 978-5-98187-697-4

Монография содержит результаты многолетних экспериментальных исследований, выполненных авторами в Русловой лаборатории Государственного гидрологического института (ГГИ) с целью развития теории руслового процесса, разработки методики гидравлического моделирования речных потоков и руслового процесса и решения разнообразных практических задач с использованием физических, гидравлических моделей речных русел.

Исследованы турбулентная структура руслового потока и закономерности ее взаимодействия с подстилающей граничной поверхностью и подрусловым потоком, гидравлические сопротивления и пропускная способность речных русел с различным типом руслового процесса, механизм формирования и трансформации гранулометрического состава донных отложений в реках, закономерности транспорта донных наносов и их заменителей в гидравлических лотках и на пространственных, деформируемых моделях.

Разработана методика гидравлического моделирования речных русел и руслового процесса на жестких и деформируемых моделях равнинных и горно-предгорных рек. Рассмотрены вопросы взаимодействия речных русел с инженерными сооружениями и мероприятиями и их рационального проектирования и эксплуатации. Представлены примеры физического моделирования речных потоков и руслового процесса на жестких и деформируемых моделях речных русел.

Книга рассчитана на научных работников и инженеров научно-исследовательских и проектных организаций, а также преподавателей, аспирантов и студентов высших учебных заведений водохозяйственного, гидротехнического, гидрологического, экологического и природоохранного профилей, а также лиц, принимающих решения.

Reviewer: Dr. *V.A. Buzin*

**Klaven A.B., Kopaliani Z.D.**

Experimental Studies and Hydraulic Modeling of River Flows and Channel Processes. — SPb. : Nestor-History, 2011. — 504 p.

The monograph contains the results of long term experimental studies carried out by the authors in the Channel Laboratory of the State Hydrological Institute (SHI) for developing the channel processes theory, elaboration the methods of hydraulic modeling of river flows and channel processes as well as solving the various practical problems using physical hydraulic scale models of river channels.

The book includes the results of different investigations. Such as turbulent structure of channel flow and the regularities of its interaction with sub-base boundary surface and subsurface flow, hydraulic resistances and conveyance capacity of river channels with different types of channel processes, the mechanism of forming and transforming of sediment grading in rivers as well as the regularities of sand and light weight materials transport in hydraulic flumes and in the hydraulic mobile scale models.

The methods of hydraulic modeling of river channels and channel processes in the fixed and mobile scale models of plane and mountain-piedmont rivers were developed. The issues of interacting between river channels and engineer structures and arrangements of their rational designing and operation are considered. Examples of physical modeling of river flows and channel processes using fixed and mobile scale river channel models are presented.

The book can be useful for the scientists and engineers of scientific and designing organizations as well as for lecturers, post graduate and graduate students getting education in water resources management, hydrology, hydraulic engineering, ecology and nature conservation. Also it can be interesting for decision-makers.

ISBN 978-5-98187-697-4



9 785981 876974

© А.Б. Клавен, 2011

© З.Д. Копалиани, 2011

© Издательство «Нестор-История», 2011

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Гидрографическая сеть, русла и поймы рек являются не только важнейшим естественным фактором жизнеобеспечения на Земле, но и чрезвычайно чувствительным и уязвимым элементом окружающей природной среды, постоянно изменяющимся под действием хозяйственной деятельности человека. Поэтому проблема изучения и рационального использования водных объектов и водных ресурсов, русел, пойм рек и речных систем, мониторинг, охрана и восстановление рек в XXI веке становится одной из приоритетных задач устойчивого развития современной цивилизации.

Научную и методическую основу для решения отмеченной проблемы составляет учение о речном русле — русловой процесс. Эта научная дисциплина изучает процессы формирования и трансформации речных русел и пойм, изменения их морфологического строения и характеристик транспорта наносов в речных системах под действием текущей воды в естественных условиях и под влиянием хозяйственной деятельности человека.

В 50-е годы XX столетия в ГГИ Н.Е. Кондратьевым и И.В. Поповым были заложены основы гидролого-морфологической теории руслового процесса, построенной на стыке ряда научных дисциплин: гидрологии, гидродинамики, геоморфологии, механики грунтов и др., в отличие от доминировавших в то время односторонних представлений и методических подходов, рассматривавших русловую процесс с позиций только гидродинамики или геоморфологии. Основными особенностями гидролого-морфологической концепции руслового процесса являются дискретные представления о морфологии русла, структуре турбулентного руслового потока и структурных формах транспорта донных наносов, а также широкое развитие и использование натуральных и лабораторных методов исследований фундаментальных и прикладных задач.

К началу 60-х годов прошлого столетия было полностью завершено строительство специализированной Русловой лаборатории Главной экспериментальной базы (ГЭБ) ГГИ в пос. Ильичево, в которой вот уже на протяжении 50 лет интенсивно ведутся экспериментальные исследования различных проблем теории руслового процесса и ее прикладных аспектов.

На фоне десятков гидравлических лабораторий России, в силу известных причин прекративших после 1991 г. свою деятельность, Русловая лаборатория ГЭБ ГГИ остается единственной эффективно действующей гидравлической лабораторией в нашей стране, которая, продолжая функционировать в традиционном направлении, в последние годы осваивала новые виды и методы лабораторных исследований (гидравлическое моделирование ледовых заторов, аварийных разливов нефти в реках и др.).

В предлагаемой монографии ее авторы — руководители двух основных подразделений Отдела русловых процессов ГГИ: Русловой лаборатории и Лаборатории расчетов и прогнозов русловых деформаций, А.Б. Клавен и З.Д. Копалиани — подводят некоторый промежуточный итог своей много-

летней научной и производственной деятельности в Русловой лаборатории ГЭБ ГГИ.

В монографии представлены результаты оригинальных экспериментальных исследований русловой турбулентности, структурного транспорта в реках и в лабораторных условиях донных наносов естественной плотности и их легких заменителей, гидравлических сопротивлений русла, закономерностей формирования и трансформации гранулометрического состава донных отложений в процессе их движения в речных руслах; разработки теории и методики лабораторных исследований и гидравлического моделирования речных потоков, транспорта наносов и руслового процесса на жестких и деформируемых физических моделях речных русел. Рассмотрены вопросы взаимодействия речных русел с инженерными сооружениями и мероприятиями и их рационального проектирования и эксплуатации.

В отличие от всех монографий, опубликованных за последние десятилетия в России и за рубежом по проблеме лабораторных исследований и гидравлического моделирования речных потоков, транспорта наносов и руслового процесса, в предлагаемом исследовании приведено много примеров решения разнообразных конкретных научных и производственных задач на реках бывшего СССР и России (регулирование русел, борьба с наводнениями и паводками, проектирование и эксплуатация мостовых переходов, магистральных подводных переходов трубопроводов, ЛЭП и других коммуникаций через реки, водозаборов, карьерных разработок, обеспечение судоходных условий на реках, ликвидация разливов и распространения нефти в реках и др.).

В монографии выполнено также обобщение отечественного и частично мирового опыта по излагаемой проблематике.

Хочется надеяться, что монография авторитетных специалистов в области руслового процесса А.Б. Клавена и З.Д. Копалиани «Экспериментальные исследования и гидравлическое моделирование речных потоков и руслового процесса» с интересом будет встречена гидрологическим сообществом в России и за рубежом. Ученые-исследователи, инженеры-проектировщики, преподаватели, аспиранты и студенты высших учебных заведений гидрологического, гидротехнического, водохозяйственного, экологического и природоохранного профилей найдут в ней материал, полезный для их повседневной профессиональной деятельности.

Директор ГГИ, действительный член РАЕН  
заслуженный деятель науки России, профессор *И.А. Шикломанов*

## PREFACE

Hydrographical network, river channels and flood plains are not only one of the most life-supporting key factors in the Earth, but also extremely sensitive and vulnerable environmental elements, permanently changing under the impact of the human economic activities. Hence the problem of studying and rational use of water objects, water resources, river channels, flood plains and river systems, their monitoring, protection and restoration are becoming one of the most priority issues of sustainable development of the present civilization.

Scientific and methodological basis for solving the above mentioned problems is the doctrine of river channels — channel processes. This scientific discipline studies the processes of origin and transforming of river channels and flood plains, the changes of their morphological structure and characteristics of sediment transport in river systems caused by flowing water in natural conditions and under the impact of human economic activity.

In the 50-s of the XX century in the State Hydrological Institute (SHI) N.E. Kondratiev and I.V. Popov founded principles of the hydro-morphological theory of channel processes built on the junction of hydrology, hydrodynamics, geomorphology and soil mechanics, — as opposed to dominating that time one-sided conceptions and methodological approaches considering channel processes from the position of only hydrodynamics or geomorphology. The main features of the hydro-morphological theory of channel processes is discrete view on channel morphology, turbulent channel flow, river bed structural forms and sediment transport as well as wide development and utilization of field and laboratory methods to solve fundamental and practical problems.

At the beginning of the 60-s of the last century construction of the SHI Channel Laboratory was completely finished and over the last 50 years the extensive experimental studies of various problems of the channel processes theory and practice have been performed in this laboratory.

Against the background of tens of Russian hydraulic laboratories stopped working after 1991, the SHI Channel Laboratory became the only running hydraulic laboratory in our country effectively continuing functioning during the last years developing new types and methods of laboratory experimentations (hydraulic modeling of ice jams, spill oil accidents in rivers etc.).

In the present monograph the authors, the heads of the two main divisions of the Department of Channel Processes: the Channel Laboratory and the Laboratory of computation and forecasting channel deformations A.B. Klaven and Z.D. Kopaliani, are summarizing their long-term scientific and practical experience gained in the SHI Channel Laboratory.

The results of original experimental studies of river flow turbulence, transport of sand and light weight materials in rivers and laboratories, the regularities of forming and transforming of sediment grading in their movement in river channels, development of the theory and method of laboratory studies and hydraulic modeling of river flows, sediment transport and channel processes in the fixed and mobile scale models

of river channels are presented in the monograph. The problems of river channels and engineering structures interaction as well as methods of their rational designing and operation are considered.

In contrast to the most monographs devoted to the problem of laboratory studies and hydraulic modeling of river flows, sediment transport and channel processes published over the last decades in Russia and abroad, in the present monograph many examples of solving various specific scientific and practical problems on the rivers of former USSR and Russia (channel regulation, rain, snow-melt and ice jam floods, designing and operation of bridges, underwater pipeline crossings, electricity lines and other communications across the rivers, water intakes, sandpits, providing of inland navigation, elimination of oil spills etc.) are presented.

In the monograph the generalization of the Russian and partially world experience and expertise is made in the field of the laboratory experimentation and modeling.

I hope that the monograph of authoritative experts in the field of channel processes A.B. Klaven and Z.D. Kopaliani “Experimental Studies and Hydraulic Modeling of River Flows and Channel Processes” will be met with the interest in Russia and abroad. Researchers, scientists, engineers, designers, lecturers, post graduate and graduate students getting education in hydrology, hydraulic engineering, water resources management, ecology and nature conservation will find here information and material helpful for their everyday professional activities.

Professor *I.A. Shiklomanov*, director of SHI,  
member of The Russian Academy of Natural Sciences

## ВВЕДЕНИЕ

В развитии фундаментальных знаний и решении многочисленных и разнообразных практических задач в области речной гидравлики и руслового процесса экспериментальный метод исследования (натурный, лабораторный) среди других методов, средств и приемов, используемых в науке, традиционно играет ведущую роль.

Гидравлические и морфологические процессы, происходящие в открытых руслах и каналах с подвижными границами и транспортом наносов, а также практические задачи, возникающие при взаимодействии речных русел и пойм с инженерными сооружениями и мероприятиями, относятся к наиболее сложным проблемам речной гидравлики, руслового процесса и гидротехники.

Лабораторный метод исследования и гидравлическое моделирование на жестких и деформируемых моделях речных русел и пойм широко и давно используются при проектировании, строительстве и эксплуатации разнообразных и многочисленных речных инженерных сооружений, при планировании и осуществлении мероприятий, направленных на защиту от наводнений, на обеспечение судоходных условий на реках, на регулирование русел, организацию мониторинга и рациональное использование, охрану и восстановление речных систем, русел и пойм рек, а также при разработке ответственных, активных и пассивных научно-технических и экологических стратегий на реках и при создании методов управления русловым процессом.

Конечной целью экспериментальных методов исследования и моделирования является оптимизация материальных и финансовых затрат в гидротехнической практике и обеспечение надежности и безопасности принимаемых инженерно-хозяйственных решений, не наносящих экологического ущерба окружающей среде. Принято считать, что гидравлическое моделирование речных потоков, морфологических процессов, русловых деформаций и транспорта наносов в реках занимает промежуточное положение между такими сферами человеческой деятельности, как наука и искусство. Существуют разные мнения по вопросу о том, что такое гидравлическое моделирование на физических моделях речных русел — наука или искусство [289, 306, 405, 410, 472, 473]. Авторы настоящей монографии вслед за Д. Шарпом [289] считают, что «моделирование — это искусство, основанное на науке».

Сама постановка проблемы в указанном виде говорит о несовершенстве лабораторного дела и неоднозначности методических средств и приемов, используемых в разных странах, научных школах и лабораториях. Эта неоднозначность вытекает из различных теоретических представлений об исследуемых явлениях и процессах, из несовершенства знаний и субъективных предпочтений различных авторов. Поэтому интуиция и опыт исследователя при современном уровне развития теории руслового процесса и методики его гидравлического моделирования играет решающую роль в моделировании речных русел на жестких и деформируемых моделях. В частности, именно на основе интуиции и опыта

решается вопрос о том, какое место в комбинации с другими методами (натурные исследования, лабораторный эксперимент, гидроморфологический анализ, гидравлические расчеты, математическое моделирование) отводится модельным исследованиям в решении конкретной задачи; каковы тип модели (жесткая, деформируемая, искаженная, неискаженная) и методика моделирования.

В предлагаемой монографии представлен многолетний опыт авторов по использованию лабораторного метода и гидравлического моделирования речных русел в Русловой лаборатории Государственного гидрологического института (ГГИ) в научных и производственных целях. Монография ставит задачу ознакомить с этим опытом широкую научно-техническую аудиторию и внести вклад в обмен информацией и опытом между лабораториями, занятыми аналогичными проблемами и задачами.

В главе 1 монографии представлены научные и методические основы экспериментальных исследований и гидравлического моделирования речных потоков и руслового процесса, выполняемых в ГГИ. Они вытекают из гидролого-морфологической концепции руслового процесса, сформулированной Н.Е. Кондратьевым и И.В. Поповым в начале 60-х годов прошлого века.

Технические и технологические аспекты обеспечения лабораторных исследований в Русловой лаборатории ГГИ представлены в главе 2.

Лабораторный метод и гидравлическое моделирование в Русловой лаборатории ГГИ традиционно используются в двух основных направлениях: научно-методическом и производственном. Первое направление имеет своей целью развитие фундаментальных основ теории руслового процесса, изучение гидравлических и морфологических явлений, процессов и их отдельных сторон, а также развитие методики и технологии лабораторного дела и гидравлического моделирования. Эти исследования выполняются в гидравлических лотках, на схематических и абстрактных гидравлических установках и моделях.

Второе направление — собственно моделирование — предназначено для решения конкретных производственных задач и подразумевает строгое воспроизведение в лабораторных условиях в уменьшенных размерах руслового рельефа, подобного натурному, гидравлических характеристик потока, транспорта наносов и руслового процесса конкретного природного объекта с последующим пересчетом полученных на модели данных в натуру.

Результаты исследований первого типа, выполненные авторами в Русловой лаборатории ГГИ, представлены в главах 3–6. В главе 3 изложены результаты экспериментальных исследований кинематической структуры русловых потоков. Главы 4–6 посвящены экспериментальному изучению методических проблем моделирования на гидравлических деформируемых моделях речных русел (глава 4); закономерностям и механизму формирования гранулометрического состава донных отложений в речных руслах (глава 5) и лабораторным исследованиям гидравлических сопротивлений и пропускной способности русел с различным типом руслового процесса и формами транспорта донных наносов (глава 6).

В литературе, посвященной гидравлическому моделированию речных потоков и руслового процесса на жестких и деформируемых моделях, большинство отечественных и зарубежных исследователей в основном рассматривают общую



теорию этой проблемы: разработка критериев подобия, формулирование общих методических подходов и рекомендаций, обсуждение объективных трудностей, ограничений и противоречий, возникающих при практическом моделировании, и пути преодоления этих противоречий. В этом потоке литературы мало работ, в которых одновременно были бы представлены попытки отражения всех необходимых ступеней и этапов разработки и примеры использования метода гидравлического моделирования: теории, методики расчета моделей и примеров их реализации для конкретных объектов и практических задач.

Обширная литература, освещающая зарубежный и отечественный опыт по различным аспектам лабораторного дела и гидравлическому моделированию на физических моделях речных потоков, морфологии русла, транспорта наносов и руслового процесса, в настоящее время исчисляется многими тысячами наименований. Однако эта литература до сих пор не систематизирована. Поскольку составление полного и подробного обзора состояния проблемы и работ по излагаемой тематике не входило в задачу настоящего исследования, авторы ограничились лишь кратким обзором мирового и отечественного опыта в области моделирования руслового процесса на гидравлических моделях (глава 7) и отдельно представили соответствующую обзорную информацию дифференцированно в предметных главах монографии (главы 3, 4, 9–11, 14).

В главе 8 приведены пять примеров решения различных практических задач на жестких недеформируемых гидравлических моделях.

Комплекс вопросов, связанных с использованием заменителей наносов на деформируемых моделях речных русел, обсуждается в главе 9.

Наиболее определенным случаем моделирования руслового процесса в естественных и проектных условиях, при котором может быть обеспечено подобие транспорта наносов, русловых форм и русловых деформаций, считается моделирование на неискаженных гидравлических моделях с соблюдением геометрического подобия руслового материала и донных наносов. Но и этот случай, относящийся преимущественно к моделированию участков рек горно-предгорной зоны, недостаточно освещен в литературе. В главе 10 описан многолетний опыт авторов по исследованию рек этого типа и по разработке метода их гидравлического моделирования. Представлены примеры моделирования на деформируемых моделях речных русел, сложенных из крупного аллювия (5 примеров).

В главах 11 и 12 соответственно изложены методика и результаты модельных исследований ледовых заторов и заторных наводнений на р. Лене и экспериментальных исследований и гидравлического моделирования аварийных разливов нефти в реках (с примерами моделирования рек Волга, Нева, Белая, Обь, Иртыш).

Глава 13 посвящена натурным и экспериментальным исследованиям различных аспектов руслового процесса на р. Поломети, выполняемым в Валдайском филиале ГГИ совместно с Отделом русловых процессов и Русловой лабораторией ГГИ.

Быстрое развитие компьютерных технологий в последние два-три десятилетия стимулировало ускорение темпов разработки и внедрения в практику математических, численных и компьютерных моделей гидродинамических процессов, включая задачи речной гидравлики, транспорта наносов, морфологии русла и

руслового процесса. Математические методы и модели часто рассматриваются в качестве «дешевой альтернативы» физическим (эмпирическим, натурным, лабораторным) методам исследований и гидравлическому моделированию на физических моделях речных русел [473, с. 78]. Возникает вопрос: способны ли математические модели заменить физические модели (в какой степени и когда), и каковы сферы разграничения и взаимосвязи этих двух видов моделирования в настоящее время и в будущем? В главе 14 изложена позиция авторов монографии о соотношении физического и математического моделирования, физических и математических методов исследований в задачах речной гидравлики и руслового процесса.

В приложениях 1–3 представлен полный перечень лабораторных исследований и гидравлического моделирования, выполненных в Отделе русловых процессов ГГИ в период с 1957 по 2010 гг. с использованием гидравлических установок, лотков, жестких и деформируемых моделей рек и водоемов. Ограниченный объем монографии позволил привести в ней лишь небольшую часть примеров моделирования из перечня НИР, выполненных в Отделе русловых процессов ГГИ с использованием жестких и деформируемых гидравлических моделей, представленных в приложении 1.

Главы 2, 3, 12, разделы 4.2, 8.2–8.4 монографии написаны А.Б. Клавленом.

Главы 1, 5–7, 9, 10, 14, разделы 4.1, 8.1 и 8.5 написаны З.Д. Копалиани.

Введение и заключение, главы 11, 13 и приложения 1–3 написаны совместно.

Книга основана на многолетнем опыте научной и производственной деятельности Отдела русловых процессов ГГИ и тесном сотрудничестве ее авторов по всем вопросам, освещенным в монографии. Отдельные ее части в разное время докладывались и обсуждались на научных семинарах этого Отдела и заседаниях Ученого совета ГГИ, на российских и международных совещаниях, съездах, конференциях и симпозиумах.

Авторы выражают искреннюю благодарность всему коллективу Отдела русловых процессов ГГИ и особенно участникам научно-исследовательских работ, выполненных под руководством или с участием авторов этой монографии.

Авторы глубоко признательны Л.П. Бабкиной, В.Н. Бартусевич, М.И. Ереминой, М.М. Жук, З.Н. Ильиной, Н.И. Католиковой, В.А. Николаевой, О.А. Петровской, А.С. Самохвалову, Л.И. Чистяковой, Е.С. Шваревой за большую помощь, оказанную ими в оформлении монографии и подготовке ее рукописи к изданию.

Мы отдаем себе отчет в том, что представленные в монографии материалы (обсуждаемые проблемы и задачи, различные аспекты лабораторного дела, теория и методология моделирования и их различные интерпретации, предлагаемые методы и решения) в силу многих объективных и субъективных причин не являются «истиной в последней инстанции». Поэтому будем чрезвычайно благодарны читателям за любые их отзывы, замечания и предложения по книге, которые можно направить по адресу: 199053, г. Санкт-Петербург, 2-я линия, д. 23, Государственный гидрологический институт, Отдел русловых процессов.

Тел.: (812) 323-32-65; 433-93-12; 433-93-44.

Факс: (812) 323-10-28; 323-32-65, 433-93-54.

E-mail: shi@sp.ru; channel@ggi.nw.ru.

## INTRODUCTION

Experimental method (field, laboratory) of investigation traditionally plays the key role among other methods and techniques used in the scientific studies for development of basic knowledge and for solution of numerous practical problems in the field of fluvial hydraulics and channel processes.

Hydraulic and morphological processes occurring in the open river beds and channels with mobile boundaries and sediment transport as well as practical problems arising under interaction between river channels and plains with engineering structures and activities are the most complex problems of fluvial hydraulics, channel processes and engineering hydraulics.

Laboratory investigations and hydraulic modeling on the base of fixed and mobile models of river channels and plains are widely used for a long time for design, creation and operation of numerous engineering structures in the rivers; planning and execution of activities on flood protection, providing of inland navigation conditions and river channels improvement; monitoring and management of river channels; conservation and recovery of the river systems, river channels and plains; developing of responsible, active and passive scientific, technical and ecological strategies in the rivers, and creation of methods for management of the river channel processes.

The final aim of experimental investigations and modeling are both optimization of material and financial expenses in hydraulic engineering practice and provision of reliability and safety of engineering and technical decisions that don't cause ecological harm to the environment.

It is assumed that hydraulic modeling of river flow, morphological processes, river bed deformations and sediment transport occupies the place between such fields of human activities as science and art. There exist different opinions on subject whether hydraulic modeling using physical models of the river channels is the science or an art [289, 306, 405, 410, 472, 473]. Following D. Sharp [289], authors of this monograph believe that "modeling is an art based on science".

Statement of the problem in indicated form evidences the imperfection of laboratory studies and variety of methodical approaches and procedures used in various countries, scientific schools and laboratories. This ambiguity stems from different theoretical insights into the study phenomena and processes, incompleteness of knowledge, and subjective preferences of various authors. For this reason, intuition and experience of investigators play the key role in modeling of river channels using fixed and mobile scale models at the present level of progress of the channel processes' theory and methods for their hydraulic modeling. In particular, exactly on the base of intuition and experience are decided the following problems: 1) what is the role of modeling in solving of definite problems within the combination of other methods (field study, laboratory experiments, hydromorphological analysis, hydraulic computations, mathematical modeling), 2) what type of model (fixed, mobile, distorted, and undistorted) and method of modeling are taken.

The monograph presents the authors' long-term experience on the use of laboratory method and hydraulic modeling of the river channels in the Channel Laboratory

of the State Hydrological Institute (SHI) for scientific and operational goals. The main purpose of the present monograph is to introduce this expertise to mainstream scientific-technical audience and to contribute to information and experience exchange between laboratories dealing with analogous problems.

The first chapter of the monograph describes scientific and methodological bases for experimental investigations and hydraulic modeling of river flow and channel processes are being performed in the SHI. They result from hydrology-morphological conception of the channel processes that was formulated by N.E. Kondratiev and I.V. Popov in the beginning of 1960s of the past century.

Technical and technological aspects of laboratory investigations' performed in the Channel Laboratory of the SHI are given in the chapter 2.

Laboratory method and hydraulic modeling in the Channel Laboratory of the SHI are traditionally used in two basic directions: scientific-methodological and operational and industrial ones.

The first direction aims at development of fundamental basis for theory of the river channel processes, the study of hydraulic and morphological phenomena and processes and their specific aspects as well as for development of methods and technology of laboratory investigations and hydraulic modeling. Such investigations are performed in hydraulic flumes schematic and abstract hydraulic facilities and models.

The second direction is modeling itself that is targeted at definite operational problems' solution and means correct reconstruction in the laboratory of the small-scale channel relief similar to natural one, hydraulic characteristics of a flow and sediment transport and the channel processes of the definite natural object, and subsequent recalculation of the model results into the prototype conditions.

Results of investigations of the first kind made by the authors in the Channel Laboratory of the SHI are given in the chapters 3 through 6. In the chapter 3 results of experimental investigations of the river flows' kinematic structure are presented. Chapters 4 through 6 are devoted to experimental investigations of 1) methodological problems of modeling with the use of mobile scale models of river channels (chapter 4); 2) regularities and mechanism of transformation of granulometric composition of bed material in the river channels (chapter 5); 3) laboratory studies of hydraulic resistance and discharge capacity of the river channels with various types of the channel processes and forms of bed load transport (chapter 6).

The majority of Russian and foreign publications devoted to hydraulic modeling of the river flows and the channel processes with the use of fixed and mobile models mainly consider general theory of this problem (development of similarity criteria; formulation of general methodical approaches and recommendations; discussion of objective troubles, limitations and contradictions occurring under practical modeling, and ways out of these problems). Among numerous publications there is a small amount of studies describing attempts to indicate simultaneously all necessary steps and stages of development of hydraulic modeling method and examples of its application (theories, methods of model calculation and examples of their realization for definite objects and practical tasks).

At present the list of Russian and foreign publications covering the experience on various aspects of laboratory study and hydraulic modeling using physical scale mo-

dels (river flows, channel morphology, sediment transport and river channel processes) amounts to thousands of titles. These publications are, however, not systematized till now. Since preparation of the comprehensive and detailed review of the problem and publications focused on the study theme was not an aim of the current investigation, the authors restricted themselves only to brief review of the worldwide and Russian experiences in the field of the channel processes' modeling with the use of hydraulic scale models (chapter 7). They also separately gave relevant information in thematic chapters of the monograph (chapters 3, 4, 9–11, 14).

The chapter 8 contains five examples of solutions to different practical problems with the use of fixed hydraulic models.

Complex of topics related to the use of light weight materials for mobile bed models of the river channels is discussed in the chapter 9.

The use of undistorted mobile hydraulic models that maintains geometric similarity of the channel material is the most well-defined case of the channel processes modeling under natural and design condition when similarity of sediment transport, channel forms and channel deformations can be observed simultaneously. But this case mainly used for modeling of the river sections in mountain and piedmont zones is also insufficiently covered in publications. Long-term experience of the authors on such rivers investigation and development of methods for their hydraulic modeling are described in the chapter 10. In this chapter five examples of modeling of the river channels composed of coarse alluvium are given as well.

In the chapter 11 methods and results of model investigations of ice jams and ice-jam floods for the Lena river are given. Chapter 12 is devoted to experimental investigations and hydraulic modeling of accidental oil spills in the rivers (with results of modeling for the Volga, Neva, Belaya, Ob, and Irtysh rivers).

Chapter 13 describes natural and experimental investigations of different aspects of the channel processes for the Polomet river performed at the Valdai Field Branch of the SHI in collaboration with the Department of channel processes and the Channel Laboratory of the SHI.

Rapid development of modern computer technologies during the past two-three decades stimulated acceleration in the rates of development and application in practice of mathematical, numerical and computing models of hydrodynamic processes including problems of the fluvial hydraulic, sediment transport, river channel morphology, and channel processes. Very often mathematical methods and models are considered as “cheap alternative” to physical (empirical, field and laboratory) methods of investigations and hydraulic modeling with the use of the river channel scale models [473, p. 78]. The questions arised are: 1) whether it is possible to replace physical models with mathematical ones (to what degree and when) and 2) what kinds of distinction and interaction are between these two types of modeling at present and in the future. The authors' views on the correlation between physical and mathematical modeling, physical and mathematical methods of investigations used for solving of problems of fluvial hydraulic and the channel processes are given in the chapter 14.

The annexes 1 through 3 include the total catalogue of laboratory investigations and hydraulic modeling performed in the Department of channel processes of the SHI during the period from 1957 to 2010 using hydraulic installations, flumes and fixed and

mobile models of river channels and reservoirs. Limited volume of the monograph allowed to present only small part of modeling examples from scientific investigations of the SHI Department of channel processes with the use of fixed and mobile hydraulic models mentioned in Annex 1.

Chapters 2, 3, 12 and sections 4.2, 8.2–8.4 of the monograph are written by A.B. Klaven.

Chapters 1, 5–7, 9, 10, 14 and sections 4.1, 8.1, 8.5 of the monograph are written by Z.D. Kopaliani.

Introduction and Conclusion, chapters 11, 13 and annexes 1–3 are written together.

The book is based on long-term experience of scientific and operational activity of the SHI Department of channel processes and on the close cooperation of the authors on all problems described in the monograph. Separate parts of the monograph were reported and discussed at scientific seminars of the Department of channel processes and meetings of the SHI Scientific Council, at all-Russian and international meetings, congresses, conferences, and symposia.

The authors are grateful to all the staff of the Department of channel processes and particularly to the participants of the studies made with the participation or under the leadership of the authors of this monograph.

The authors acknowledge L.P. Babkina, V.N. Bartusevitch, L.I. Chistyakova, M.I. Eremin, M.M. Zhuk, Z.I. Il'ina, N.I. Katolikova, V.A. Nikolaeva, O.A. Petrovskaya, A.S. Samokhvalov, E.S. Shvareva for the great assistance in the monograph design and manuscript preparation for publication.

We are aware that materials presented in the monograph (discussed problems and goals, various aspects of the laboratory studies, theory and methodology of modeling and their different interpretations, suggested methods and decisions) are not “monopoly on the truth” due to numerous objective and subjective causes. Therefore, we would appreciate any comments, remarks and critical observations from readers on the book that can be sent to the following address:

Department of channel processes,  
State Hydrological Institute,  
# 23, 2<sup>nd</sup> Line, St. Petersburg, 199053, Russia  
or via FAX : +7 (812) 3231028, 3233265, 4339354.  
You can also call us, the phone numbers are:  
+7 (812) 3233265, 4339312, 4339344.  
Our E-mail: channel@ggi.nw.ru or shi@sp.ru.

## НАУЧНЫЕ И МЕТОДИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ГИДРАВЛИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ РЕЧНЫХ ПОТОКОВ И РУСЛОВОГО ПРОЦЕССА

### 1.1. О роли и месте экспериментальных исследований и моделирования в науке и теории познания

Среди методов, средств и приемов, используемых современной наукой для познания объективной реальности, получения новых знаний о природе и обществе и для применения этих знаний в практических целях, эксперименту и моделированию принадлежит особая роль.

В теории познания — разделе философии, составляющем философско-методологическую основу науки, понятия эксперимент и моделирование рассматриваются в системе и в контексте таких философских категорий, понятий и методов, как теория и практика, эмпирический и теоретический уровни и этапы познания, наблюдения, факты, гипотезы, аналогия и др.

Эксперимент и моделирование относятся к общенаучным методам исследований, которые широко используются в частных науках и дисциплинах и в междисциплинарных исследованиях.

Решающее значение опыта в познании природы человечество по достоинству оценило еще со времен выдающегося английского философа и естествоиспытателя Роджера Бекона (1214–1292), назвавшего экспериментальную науку «властительницей над всеми науками», и великого итальянца эпохи Возрождения Леонардо да Винчи (1452–1519), который считал, что «истолкователем природы является опыт».

Знаменитый русский математик Н.И. Лобачевский (1792–1856), как никто другой отдавая себе отчет о роли теории и математики в науке и теории познания, уже в XIX веке отмечал: «Оставьте трудиться напрасно, стараясь извлечь из одного разума всю премудрость, спрашивайте природу, она хранит все тайны и на вопросы ваши будет отвечать вам» [170, с. 95]. И как бы вторя Лобачевскому, столетие спустя выдающийся немецкий физик Макс Планк писал в своей научной биографии: «Эксперимент — это вопрос, который наука ставит природе, и измерение — регистрация ответа природы. Но прежде, чем эксперимент может быть проведен, он должен быть сформулирован. Прежде, чем результат измерения может быть использован, он должен быть объяснен, — ответ природы должен быть правильно понят» [213, с. 21].

Исходным методом эмпирического познания является *наблюдение*. Под научным наблюдением, в отличие от случайных наблюдений, не являющихся научным методом познания, понимается метод познания, при котором осуществляется целенаправленное изучение предметов и явлений, с опорой на чувственные способности человека. Процесс наблюдения подразумевает наличие

наблюдателя, объекта исследования и средств наблюдений, а также условий, при которых производятся наблюдения.

Наблюдение относится к пассивным средствам познания, но не сводится только к чувственному познанию. Целенаправленный характер наблюдений подразумевает наличие какой-то исходной руководящей идеи, концепции или гипотезы. Поэтому в ходе наблюдения исследователь не только фиксирует и накапливает любые факты, а сознательно отбирает те из них, которые подтверждают или отвергают его идеи. При интерпретации данных наблюдений исследователь также опирается на некоторые предпосылки, положения или гипотезы.

Различают два вида наблюдений: ориентированные на качественное и количественное описание предметов и явлений. В основе количественных наблюдений лежат измерения.

Наблюдения проводятся в естественных условиях без вмешательства человека в явления и процессы, как они протекают в природе.

В общей структуре научного познания особое место занимают экспериментальные исследования.

*Эксперимент*, как и наблюдение, — это базовый метод познания на эмпирическом уровне. Эксперимент, в отличие от наблюдения, является активным методом изучения объектов и явлений, включающим в себя и наблюдение. В эксперименте — научно поставленном опыте — изучаемое явление не только наблюдается, но и воспроизводится. В этом состоит его основная специфика. В ходе эксперимента объекты и явления исследуются в контролируемых и управляемых условиях. Эксперимент позволяет изолировать изучаемое явление от влияния других явлений и побочных факторов, изменять, варьировать и комбинировать различные условия и элементы, вводить новые факторы, многократно воспроизводить ход процесса и его различные комбинации, вплоть до не существующих в природе, в строго фиксированных, поддающихся контролю условиях [294, 295]. С помощью эксперимента производится опытная проверка гипотез и теорий, а также формирование новых научных концепций. В зависимости от цели экспериментов различают: проверочные (контрольные), исследовательские (поисковые), воспроизводящие, изолирующие, качественный или количественный, физический, социальный и другие виды экспериментов.

В методическом отношении различают три типа экспериментов, используемых в научных исследованиях: мысленный, физико-технический (материальный) и вычислительный. Основные различия между указанными типами экспериментов состоят в следующем.

Мысленный эксперимент, в отличие от материального, имеет дело с обобщенными, идеальными образами и объектами (например, идеальная жидкость) и осуществляется в уме исследователя. Вычислительный эксперимент, в отличие от материального, выполняется с математической моделью исследуемого объекта, когда вместо физического явления выступает математическая модель, а вместо экспериментальной установки используется ЭВМ. Применимость вычислительного эксперимента ограничивается рамками принятой математической модели, которая в свою очередь строится на основе закономерностей, устанавливаемых в реальном материальном эксперименте. Поэтому вычислительный эксперимент



не способен вытеснить реальный эксперимент. Важной особенностью эксперимента является также его принадлежность одновременно и к познавательной, и к практической деятельности человека. Эксперимент является связующим звеном между теоретическим и эмпирическим этапами и уровнями научного познания.

Результаты экспериментов составляют фундамент для построения и развития теории, а экспериментальные факты являются критерием истинности теории.

*Моделирование* — одна из основных категорий теории познания, на которой в современной науке базируется любой метод научного исследования: как теоретический, при котором используются модели различного рода (знаковые, абстрактные), так и экспериментальный, использующий предметные, материальные модели.

Под моделью, в наиболее общем смысле, понимается «мысленно представляемая или материально реализованная система, которая, отображая или воспроизводя объект исследования, способна замещать его так, что ее изучение дает нам новую информацию об этом объекте» [294, с. 19]. В зависимости от способа построения моделей и специфики их функционирования различают материальные (физические, реальные) модели и идеальные (абстрактные, мысленные) модели. Любая модель не воспроизводит полностью все свойства объекта исследования (оригинала, прототипа). Абсолютное подобие прототипа и модели означало бы их тождество, что противоречит самому понятию «модель». Модель воспроизводит лишь некоторые, но важные стороны исследуемого объекта (явления) или какой-то его части, интересующей исследователя. Достаточно, чтобы модель отражала структуру объекта или воспроизводила механизм его функционирования. Поэтому одному прототипу может соответствовать множество разных моделей, при конструировании которых большое значение имеет также опыт и интуиция исследователя. В связи с этим принято считать, что моделирование занимает промежуточное положение между такими сферами человеческой деятельности, как наука и искусство, пользуясь методами и приемами того и другого.

Основные различия между моделированием и научным экспериментом сводятся к следующему. При моделировании, в отличие от обычного эксперимента, значительно сильнее представлена теоретическая сторона исследования, поскольку в модельном эксперименте необходимо дополнительно «теоретически обосновать отношение подобия между моделью и натурным объектом и возможность экстраполировать на этот объект полученные данные. Иначе модельный эксперимент теряет свое специфическое познавательное значение, ибо он перестает быть источником информации о действительном или натурном объекте» [294, с. 100].

Отсюда и другое отличие моделирования от научного эксперимента. Модель выступает не только как объект, но и как средство (инструмент) познания.

Еще одно важное отличие моделирования от научного эксперимента наиболее ярко проявляется на физических (материальных) моделях, имеющих природу, сходную с природой изучаемого объекта и отличающихся от него размерами и скоростью протекания исследуемых процессов. Такие модели, в отличие от научного эксперимента и мысленных (идеальных) моделей, хотя и созданы человеком, тем не менее существуют объективно, по своим законам, уже независимо от человека.

## 1.2. Из истории создания и деятельности крупнейших гидравлических лабораторий мира

Практика использования физических (материальных) моделей и экспериментальных установок и лотков для изучения гидравлических процессов, происходящих в речных руслах (структуры и гидравлических характеристик течений, транспорта наносов, руслового процесса и русловых деформаций) в естественных и измененных человеком условиях, имеет давнюю историю.

Первая гидравлическая модель такого рода — модель русла р. Гаронны — была создана во Франции Л. Фаргом в 1875 г., в масштабе 1:100, с целью изучения закономерностей деформаций русла этой реки [343].

В 1885 г. О. Рейнольдс на модели устьевого участка р. Мерзой исследовал воздействие приливов и отливов на формирование элементов эстуария и влияние на него сооружений [422].

В конце XIX и начале XX века в Европе стали создаваться стационарные лаборатории с целью использования лабораторных установок и моделей для изучения различных гидравлических явлений, в которых исследованиям на речных моделях придавалось приоритетное значение.

Первая такая гидравлическая лаборатория была основана в 1898 г. в Германии Г. Энгельсом при Высшей технической школе в Дрездене. Вслед за этим в Германии были открыты еще две подобные лаборатории: в 1901 г. Т. Ребоком при Высшей технической школе в Карлсруэ и в 1903 г. Г. Креем в Берлине [262, 354, 383, 405].

В последующие годы гидравлические лаборатории были созданы во многих странах Европы: в России — В.И. Тимановым в Санкт-Петербурге (1907 г.); во Франции — К. Камышелем в Тулузе (1908 г.); в Италии — Е. Скимени в Падуе (1910 г.); в Австрии — Ф. Шаффернаком в Вене (1912 г.); в Швеции — В. Феллениусом в Стокгольме (1917 г.); в Голландии — И. Тшиссе в Дельфте (1927 г.); в Швейцарии — Е. Майэр-Петером в Цюрихе (1928 г.). В том же году в Лозанне А. Стуски основал гидравлическую лабораторию при политехническом институте, которой долгие годы впоследствии руководил В.Г. Граф (1973–1995) [64, 240, 243, 372, 383].

По данным Остерхоффа и др. [413] в послевоенные годы наблюдался резкий подъем активности и соответственно расширялись экспериментальные площади крупнейших гидравлических лабораторий Европы. В период с 1947 по 1965 гг. экспериментальные площади увеличились: в лаборатории Согреа (Гренобль, Франция) до 30 000 м<sup>2</sup>; в Веллингфордской лаборатории (Англия) до 22 000 м<sup>2</sup>; в лаборатории Шату (Париж) до 20 000 м<sup>2</sup>; в Карлсруэ (Германия) до 15 000 м<sup>2</sup>.

Резкий рост экспериментальных площадей в гидравлической лаборатории Дельфта (Голландия) пришелся на 1965–1975 гг., в связи с коренной модернизацией этой лаборатории в эти годы, и составил 25 000 м<sup>2</sup> [413].

В 1956 г. МАГИ опубликовал информацию о 85-и гидравлических лабораториях 29-и стран мира. Этот список не включал лаборатории США и СССР [62, 85]. По другим данным, в 1960 г. в США насчитывалось свыше ста лабора-

торий и институтов, ведущих научно-исследовательские работы в области гидравлики и гидротехники [212].

Наиболее крупные гидравлические лаборатории США, в которых широко представлена научная и производственная тематика, связанная с открытыми потоками и объектами проектирования и строительства на реках, функционируют в составе следующих учреждений: Инженерного центра бюро мелиорации в Денвере (с 1937 г.); Государственного университета Айова (с 1927 г.); Массачусетского технологического института (с 1950 г.); Калифорнийского университета в г. Беркли (с 1950 г.); Университета Миннесоты на водопаде св. Антония (с 1938 г.); Университета Колорадо в г. Форт-Коллинзе и др. В 1929 г. при Государственной комиссии США по борьбе с наводнениями в бассейне р. Миссисипи была основана Экспериментальная станция водных путей корпуса инженеров Армии США в Висксбурге — крупнейшее в мире научно-исследовательское учреждение в области гидравлики и строительства, которое по заказам военного ведомства среди множества других задач широко занимается проблемами, связанными с регулированием паводков и улучшением условий судоходства на р. Миссисипи и на ее притоках (площадь бассейна Миссисипи занимает 41 % территории США) [212].

Экспериментальная станция расположена в двух местах: в г. Висксбурге (на площади 90 га) и в г. Джексоне (65 км от Висксбурга, 328 га).

Уникальные по своим размерам и техническому оснащению гидравлические модели, построенные на Экспериментальной станции водных путей США, не имеют прецедента в мировой практике [212]. Так, большая модель бассейна р. Миссисипи в г. Джексоне занимала площадь 89 га. Длина модели — 1371 м, ширина — 1066 м. Горизонтальный масштаб модели — 1:2000, вертикальный — 1:600.

На жесткой модели были воспроизведены все реки бассейна, общей длиной на модели 12,8 км (24 000 км в натуре). Модель была разделена на 12 автономных участков, функционирующих одновременно и независимо друг от друга. Суммарный расход воды на модели составлял 535 л/с. Модель (вся модель и отдельные ее участки) управлялась автоматически. Отметки водной поверхности фиксировались одновременно в 1500 точках модели.

На модели изучались режимы уровней и расходов воды, а также движение волн паводков, что позволяло выполнять их прогнозирование, рациональное проектирование и эксплуатацию противопаводковых сооружений (дамб обвалования) и систем водохранилищ (регулирование стока).

Огромные материальные и финансовые затраты, вложенные в строительство и эксплуатацию этой самой большой модели в мире, были признаны оправданными, обеспечившими решение задачи создания единой, централизованной информационно-координирующей системы и механизма управления паводками и эксплуатацией регуляционных сооружений в бассейне Миссисипи.

Развитие гидравлических лабораторий в ряде стран Азии также имеет давнюю историю. Так, в 1916 г. в Индии был создан крупнейший исследовательский центр в г. Пуне — Исследовательская станция водных и энергетических проблем, где экспериментальные исследования и физическое моделирование для исследований проблем речной гидравлики, транспорта наносов, русловых

процессов и речной гидротехники получили широкое развитие. По настоящее время десятки тысяч квадратных метров экспериментальных площадей на открытой площадке заняты речными моделями, на которых решаются задачи борьбы с паводками, проектирования и эксплуатации каналов, регулирования речных русел, строительства мостов и водозаборов, проектирования и эксплуатации водохранилищ, обеспечения речного судоходства и др. [326, 355].

В работе Н. Чина и Д. Дингжонга [418] приведены сведения о гидравлических (речных) лабораториях, тематике, экспериментальных площадях и оборудовании 20 лабораторий Китая, функционировавших в этой стране в 1980 г. Экспериментальные площади в наиболее крупных гидравлических лабораториях Китая к этому времени составляли: в Институте энергетики, охраны и комплексного использования водных ресурсов в Пекине — 2560 м<sup>2</sup>; в Научно-исследовательском институте гидротехники в Нанкине — 9800 м<sup>2</sup> (и 2500 м<sup>2</sup> находились в стадии строительства); в Институте энергетики и охраны и комплексного использования водных ресурсов Янцзы в Ухани — 3450 м<sup>2</sup>; в Институте гидравлических исследований Комиссии по охране и комплексному использованию водных ресурсов Хуанхе — 3270 м<sup>2</sup>.

В последующие годы, в связи с резким ростом водохозяйственного строительства в Китае, объем научных исследований и лабораторные мощности гидравлических лабораторий неуклонно возрастали. В качестве примера можно привести русловые экспериментальные исследования в Институте гидравлических исследований в Хенджоу (основан в 1950 г.). В общую площадь экспериментальных площадей, составляющую 3270 м<sup>2</sup> в 1980 г., входили два зала, размерами соответственно 25×88 м и 10×107 м, а также площадь, занятая двумя гидравлическими лотками.

В настоящее время [494, 493] Институт располагает 5-ю экспериментальными залами для строительства крупномасштабных деформируемых речных моделей и 30-ю малыми залами, общей площадью 40 000 м<sup>2</sup>.

Два самых больших из 5 экспериментальных залов имеют размеры соответственно 690×36 м и 390×36 м.

Крупнейшая в Японии гидравлическая лаборатория Касима была основана при Инженерно-строительном институте в 1959 г. [256, 358, 452].

Открытая площадка для русловых моделей занимала площадь 25 000 м<sup>2</sup>; здесь одновременно выполнялись исследования на 15 гидравлических русловых моделях и лотках (жестких, деформируемых, схематических) [452].

С 1979 г. лаборатория переехала в Цукуба (пригород Токио). Здесь лаборатория располагает экспериментальным залом площадью 10 000 м<sup>2</sup> (длина 200 м, ширина 50 м) и открытой площадью 150 000 м<sup>2</sup>, а также экспериментальным полигоном 4900 м<sup>2</sup> (70×70 м) [256].

С момента основания и по настоящее время лаборатория ведет экспериментальные, научные и методические исследования по многим традиционным задачам русловой гидравлики, руслового процесса, транспорта наносов и взаимодействия рек с инженерными сооружениями: борьбе с паводками, меандрированию рек, дночерпанию и расчистке русел в различных целях, защите берегов от размыва, регулированию устьевых участков рек, проектированию

мостовых переходов и др. Большое место в научной и практической деятельности лаборатории занимают специфические, наиболее актуальные для Японии задачи: исследования речных устьев, волновых явлений, приливов и отливов, цунами и методов защиты от них, вдольберегового переноса наносов; проектирование водохранилищ; изучение интрузии соленой воды в устьях рек; вопросы сброса сточных вод, опреснения вод, проектирования противоволновых дамб, волноломных сооружений, методов и средств укрепления морских берегов; строительство плотин в устьях рек для борьбы с приливами и др. [256, 358].

В 1959 г., по информации И.В. Егиазарова [85], в СССР функционировало более 200 гидравлических лабораторий. По данным Научной секции «Русловые процессы» Научного совета по проблеме «Комплексное использование и охрана водных ресурсов» Государственного комитета по науке и технике (ГКНТ), в СССР в 1975–1990 гг. более 40 гидравлических лабораторий высших учебных заведений и научно-исследовательских институтов различных ведомств занимались экспериментальными исследованиями по тематике, связанной с фундаментальными и прикладными аспектами речной гидравлики, транспорта наносов, руслового процесса и проектирования инженерных комплексов и гидротехнических сооружений различного назначения на реках.

В качестве наиболее активных участников этого процесса из числа высших учебных заведений здесь следует выделить гидравлические лаборатории Ленинградского политехнического института (ЛПИ), Ленинградского института инженеров водного транспорта (ЛИВТ), Ленинградского гидрометеорологического института (ЛГМИ), Московского института инженеров железнодорожного транспорта (МИИЖТ), Московского автомобильно-дорожного института (МАДИ), Университета дружбы народов им. П. Лумумбы (УДН), Московского гидромелиоративного института (МГМИ), Новосибирского института инженеров водного транспорта (НИИВТ), Грузинского и Кутаисского политехнических институтов (ГПИ и КПИ), Новочеркасского инженерно-мелиоративного института (НИМИ), Ташкентского института инженеров ирригации и механизации сельского хозяйства (ТИИИМСХ).

Наиболее масштабные и интенсивные экспериментальные исследования по отмеченной тематике регулярно выполнялись в гидравлических лабораториях следующих научно-исследовательских институтов СССР: Государственного гидрологического института (ГГИ), Всесоюзного научно-исследовательского института гидротехники им. Б.Е. Веденеева (ВНИИГ), Среднеазиатского научно-исследовательского института ирригации (САНИИРИ), Всесоюзного научно-исследовательского института водоснабжения, канализации, гидротехнических сооружений и инженерной гидрологии (ВОДГЕО), Всесоюзного научно-исследовательского института гидротехники и мелиорации (ВНИИГиМ), Всесоюзного научно-исследовательского института комплексной автоматизации мелиоративных систем (ВНИИКАМС, г. Фрунзе), НИС Гидропроекта (г. Москва), Института гидромеханики Академии наук УССР (ИГМ), Украинского научно-исследовательского института гидротехники и мелиорации (УкрНИИГиМ), Грузинского научно-исследовательского института гидротехники и мелиорации (ГрузНИИГиМ), Грузинского научно-

исследовательского института энергетики и гидротехнических сооружений (ГрузНИИЭГС), Армянского научно-исследовательского института водных проблем и гидротехники (АрмНИИВПиГ).

Большой опыт выполнения модельных исследований на речных моделях был накоплен также на открытых экспериментальных русловых площадках лабораторий Северного бассейнового управления Министерства речного флота СССР, Московского филиала ЛИВТа (ЦНИИЭВТ) и Управления Волго-Донским судоходным каналом [65, 168, 246, 284].

В последние два-три десятилетия большинство из перечисленных выше крупнейших зарубежных гидравлических лабораторий мира претерпели коренные изменения или находятся в стадии активной реорганизации своей деятельности: ведомственной принадлежности, тематики исследований, технического оснащения, объема и источников финансирования работ, совершенствования организационной структуры.

### **1.3. Гидролого-морфологическая концепция руслового процесса — методологическая основа экспериментальных исследований речных потоков и руслового процесса, выполняемых в ГГИ**

В качестве методологической основы настоящих исследований используется гидролого-морфологическая теория (концепция) руслового процесса, основы которой были сформулированы в ГГИ Н.Е. Кондратьевым и И.В. Поповым [127, 129, 132, 215, 238].

Н.Е. Кондратьевым [127, 238] в самом начале исследований была подчеркнута односторонность и бесперспективность существовавших в то время подходов к оценке русловых деформаций с позиции только гидродинамики или геоморфологии. Гидродинамическое воздействие жидкости на размываемое дно, согласно Кондратьеву, должно рассматриваться лишь как внутреннее звено в причинно-следственных связях, определяющих русловой процесс, поскольку гидродинамические силы зависят от водного гидрологического режима и действуют в среде, подчиненной законам геоморфологии и механики грунтов. Отсюда вытекает, что теорию руслового процесса следует строить на стыке ряда научных дисциплин: гидрологии, гидродинамики, геоморфологии и механики грунтов.

Кондратьевым также было отмечено, что русловой процесс и морфологические русловые элементы, как все природные процессы и объекты, имеют дискретную структуру [127], т. е. обладают целостностью, и при их изучении не могут произвольно делиться на части. Учет дискретной структуры уточняет приемы и границы дифференциальных методов анализа.

Основными отличительными особенностями методологии гидролого-морфологической теории руслового процесса являются:

— признание необходимости комплексного подхода к изучению руслового процесса с позиций геоморфологии, гидродинамики и гидрологии с широким



Рис. 1.1. Основоположники гидролого-морфологической теории руслового процесса  
Н.Е. Кондратьев (справа) и И.В. Попов

привлечением натуральных и лабораторных методов исследований при решении научных и практических задач;

- наличие обобщающих, исходных постулатов теории;

- дискретные представления и выделение структурных уровней в русловом процессе;

- наличие типизации руслового процесса, отражающей основные схемы развития русловых деформаций;

- практическая направленность научного поиска для решения конкретных задач и создания нормативных документов по учету руслового процесса при проектировании и эксплуатации инженерных сооружений на реках, с целью рационального использования, охраны и восстановления речных русел и пойм.

Основные положения (постулаты) гидролого-морфологической теории руслового процесса сводятся к следующим [129, 132, 215].

1. Под русловым процессом понимаются изменения в морфологическом строении речного русла и поймы, происходящие под действием текущей воды.

Все виды речных деформаций подразделяются на необратимые и обратимые. В первых выражается вековой ход развития реки, во вторых — транспорт наносов. В речных дельтах происходит необратимая аккумуляция наносов — образование отложений, которые уже в дальнейшем никогда рекой не размываются.

В основной части речной системы происходит переотложение наносов, в процессе которого во времени и пространстве эрозия сменяется аккумуляцией и обратно. Это выражается в образовании, трансформации,

исчезновении и восстановлении аллювиальных форм в поперечном сечении русла и в пойме реки. Эти процессы обладают свойством обратимости. Поскольку русловые деформации неразрывно связаны с транспортом наносов, а транспорт наносов не осуществим без русловых и пойменных деформаций, то русловой процесс следует считать формой транспорта наносов, а процесс транспорта наносов — внутренним содержанием руслового процесса.

2. Под наносами понимаются только те твердые частицы, переносимые потоком, которые могут выпадать из потока и участвовать в донных русловых или пойменных отложениях. По форме движения наносы подразделяются на взвешенные и донные. Донные наносы в основном слагают русло, взвешенные преобладают в твердом стоке и в основном слагают пойму.
3. Состояние реки, при котором обнаруживаются только обратимые деформации (т. е. все деформации определяются транзитом наносов) называется состоянием динамического равновесия. В этом состоянии пребывает большинство рек в своей транзитной части с ненарушенным водным режимом.
4. Русловой процесс обладает общей устойчивостью, которая выражается в том, что при увеличении или уменьшении твердого стока, выводящем реку из состояния динамического равновесия, происходит такая внутренняя перестройка потока, русла и поймы, при которой динамическое равновесие восстанавливается. Иными словами, река обладает способностью в весьма широких пределах изменять свою транспортирующую способность в зависимости от заданного ей объема твердого стока. Это достигается изменением извилистости русла (уклона), формы поперечного сечения и содержания взвешенных наносов в донных отложениях.
5. Способность реки к саморегулированию позволяет выделить в качестве основных следующие независимые факторы, определяющие тип руслового процесса: полные характеристики стока воды, полные характеристики стока наносов и условия, ограничивающие свободное развитие руслового процесса (выходы неразмываемых пород в русле, общий и местный базисы эрозии).
6. Дискретные представления позволяют представить основное содержание руслового процесса — транспорт наносов — как строго организованный процесс, в котором можно выделить несколько структурных уровней. На каждом из этих уровней действует свой закон и решаются свои практические задачи.

Каждый последующий структурный уровень содержит предыдущие.

Низшей структурной ступенью является движение отдельной частицы в потоке. Затем выделяется структурный уровень микроформ — малоинерционных мелких песчаных гряд массового распространения, соизмеримых с глубиной потока, но не выражающих общей морфологии русла. Микроформы воспринимаются как макрошероховатость дна реки. Они определяют гидравлические сопротивления потоку и выражают расход донных наносов.

Следующий структурный уровень — мезоформы (побочни, осередки, русловые острова) — представляют собой крупные аллювиальные скопления в русле,



соизмеримые с его шириной и определяющие общий морфологический облик русла. Мезоформы обладают значительно большей, по сравнению с микроформами, инерционностью.

В следующем структурном уровне — макроформах — проявляется полный комплекс морфологических элементов реки, охватывающий русло и пойму и выражающийся в типе руслового процесса.

Участок реки, в пределах которого не меняются факторы, определяющие русловый процесс, и поэтому развит один, определенный тип руслового процесса, называется морфологически однородным участком.

Приведенные выше постулаты гидроморфологической теории и анализ большого натурального картографического и аэрофотосъемочного материала легли в основу разработанной Кондратьевым и Поповым типизации руслового процесса на структурном уровне мезоформ и макроформ.

Эта типизация в схематическом виде представлена на рис. 1.2.

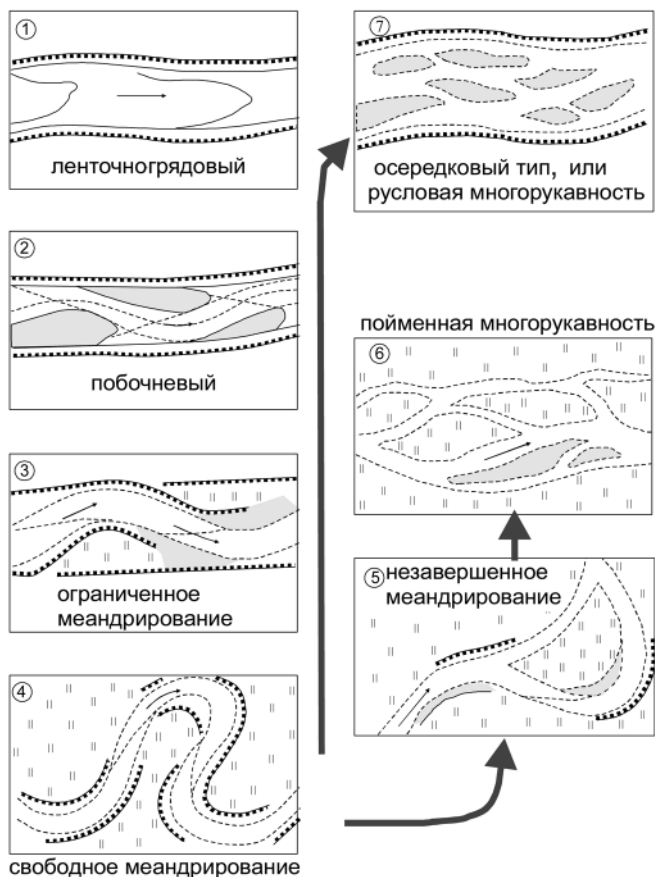


Рис. 1.2. Типизация руслового процесса ГГИ. Направление стрелок соответствует увеличению транспортирующей способности потока

Каждый выделенный тип характеризуется наличием качественно различных морфологических образований и соответствующим механизмом и схемой русловых деформаций. Для осередкового, ленточногрядового и побочного типов характерно отсутствие закономерных плановых перемещений русла. Меандрирование выражается плановым перемещением русла, и с этим обязательно связано образование пойм. При свободном меандрировании излучина проходит закономерный путь развития, который завершается прорывом перешейка и отмиранием излучины, после чего цикл меандрирования возобновляется. При незавершенном меандрировании излучина спрямляется пойменным протоком, не достигнув предельного развития. Дальнейшее развитие пойменных протоков может приводить к пойменной многоруканности.

Последовательность перехода макроформ от свободного меандрирования к ленточногрядовому типу характеризуется уменьшением извилистости русла, т. е. более полным использованием уклона земной поверхности. Это приводит, при прочих равных условиях, к увеличению транспортирующей способности потока. Каждому типу соответствует свой комплекс морфометрических измерителей элементов русла. Таким образом, типизация отражает стадии развития процесса и взаимосвязь этих стадий, что позволяет использовать ее для целей прогноза русловых процессов.

#### 1.4. Гидромеханическое подобие открытых потоков

При обосновании подобия гидравлических явлений обычно используют закон подобия Ньютона, а также основную систему дифференциальных уравнений Навье—Стокса в совокупности с уравнением неразрывности [101, 164, 167, 171, 190, 241].

Исходя из предположения о существовании подобия движения двух механических систем и применяя к рассматриваемым системам второй закон Ньютона, получают критерий подобия в форме:

$$N = \frac{FL}{MV^2}, \quad (1.1)$$

где  $F$  — сила,  $L$  — длина,  $M$  — масса,  $V$  — скорость.

Этот критерий называется критерием подобия Ньютона. Он показывает, что в динамически подобных системах соответствующие силы должны относиться друг к другу как произведение соответствующих масс на квадрат соответствующих скоростей, деленное на соответствующую длину.

Применяя этот критерий подобия к частным задачам и устанавливая требования, налагаемые на подобные системы при действии сил той или иной физической природы, получают различные критерии подобия, в том числе критерий Фруда — для подобных систем, находящихся под действием сил тяжести, и критерий Рейнольдса — для подобных систем, находящихся под воздействием сил вязкости. Но рассмотренные случаи относятся к частным случаям подобия — в каждом из них действуют силы только одной категории. В большинстве явле-

ний природы, в том числе гидравлических, действуют силы нескольких и, как правило, различных категорий.

При лабораторном исследовании открытых потоков используются водные геометрически подобные модели. В этом случае для выражения общего закона, которому подчиняется движение реальной (вязкой) жидкости в натуре и на модели, мы располагаем уравнением Навье—Стокса. Запишем это уравнение для оси X:

$$\frac{\partial V_x}{\partial t} + V_x \frac{\partial V_x}{\partial x} + V_y \frac{\partial V_x}{\partial y} + V_z \frac{\partial V_x}{\partial z} = x - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + \nu \nabla^2 V_x + \frac{\nu}{3} \frac{\partial z}{\partial x} \operatorname{div} V. \quad (1.2)$$

Здесь  $\nabla^2 = \frac{\partial^2 V_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V_x}{\partial z^2}$  — оператор Лапласа.

$$\operatorname{div} V = \frac{\partial V_x}{\partial x} + \frac{\partial V_y}{\partial y} + \frac{\partial V_z}{\partial z}.$$

Если упростим задачу и будем рассматривать несжимаемую жидкость и установившееся движение, а в качестве массовых сил будем учитывать только силы тяжести, в уравнении (1.2) крайние члены отпадут, обращаясь в ноль, а первый член правой части равенства выразится как ускорение силы тяжести  $x=g$ , и уравнение примет вид:

$$V_x \frac{\partial V_x}{\partial x} + V_y \frac{\partial V_x}{\partial y} + V_z \frac{\partial V_x}{\partial z} = g - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + \nu \nabla^2 V_x. \quad (1.3)$$

На уменьшенной модели все входящие в уравнение величины будут масштабно изменены. Введем для этих масштабов следующие обозначения:

- $\alpha_L$  — масштаб длины,
- $\alpha_V$  — масштаб скоростей,
- $\alpha_P$  — масштаб давления,
- $\alpha_g$  — масштаб массовых сил,
- $\alpha_\nu$  — масштаб кинематической вязкости,
- $\alpha_\rho$  — масштаб плотности.

Тогда для модели уравнение (1.2) переписывается так:

$$\frac{\alpha_V^2}{\alpha_L} \left[ V_x \frac{\partial V_x}{\partial x} + V_y \frac{\partial V_x}{\partial y} + V_z \frac{\partial V_x}{\partial z} \right] = \alpha_g g - \frac{\alpha_P}{\alpha_\rho \alpha_L} - \left( \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} \right) + \frac{\alpha_\nu \alpha_V}{\alpha_L^2} (\nu \nabla^2 V_x). \quad (1.4)$$

Чтобы уравнение сохранило подобие, необходимо уравнять масштабные коэффициенты при всех членах уравнения, т. е. необходимо выполнить равенство:

$$\frac{\alpha_V^2}{\alpha_L} = \alpha_g = \frac{\alpha_P}{\alpha_\rho \alpha_L} = \frac{\alpha_\nu \alpha_V}{\alpha_L^2}. \quad (1.5)$$

Разделив уравнение (1.5) на  $\frac{\alpha_V^2}{\alpha_L}$ , можем записать:

$$\frac{\alpha_g \alpha_L}{\alpha_V^2} = \frac{\alpha_P}{\alpha_\rho \alpha_V^2} = \frac{\alpha_\nu}{\alpha_V \alpha_L} = 1. \quad (1.6)$$

Рассмотрим каждое из уравнений (1.5) в отдельности и, переходя от масштабов подобия (индикаторов) к критериям, получаем:

$$Fr = \frac{V^2}{gL} = idem \quad \text{критерий Фруда}$$

$$Re = \frac{VL}{\nu} = idem \quad \text{критерий Рейнольдса}$$

$$Eu = \frac{P}{\rho V^2} = idem \quad \text{критерий Эйлера.}$$

В задачах движения реальной жидкости в открытых потоках разность давления между верхней точкой начального сечения и давлением в любой другой точке поверхности воды равна нулю, т. е.  $Eu=0$  в натуре и на модели.

$Eu$  выпадает из условий подобия и остаются два критерия подобия  $Fr$  и  $Re$ . Но поскольку в натуре и на модели жидкость одинакова, то  $\alpha_g = \alpha_p = \alpha_v = 1$ . При этом условии уравнение (1.5) примет вид:

$$\frac{\alpha_v^2}{\alpha_L} = \frac{\alpha_p}{\alpha_L} = \frac{1}{\alpha_v \alpha_L}. \quad (1.7)$$

Приравнявая к единице первый член, получаем:

$$\alpha_v = \sqrt{\alpha_L} \text{ — по закону Фруда.}$$

Приравнявая к единице последний член, получаем:

$$\alpha_v = \frac{1}{\alpha_L} \text{ — по закону Рейнольдса.}$$

Необходимые условия подобия оказываются несовместимыми.

Расчеты показывают, что для совместного удовлетворения равенства обоих чисел  $Fr$  и  $Re$  требуется уменьшить коэффициент вязкости в отношении полуторной степени линейного масштаба, т. е. для модели  $\alpha_L = 100$  потребовалось бы применить жидкость в тысячу раз менее вязкую, чем вода. Это нереально.

Условия подобия, вытекающие из уравнения Навье — Стокса или других уравнений движения, оказываются недостаточными для описания саморегулируемой системы пространственного речного потока, несущего наносы в деформируемых границах со сложной иерархией русловых микро-, мезо- и макроформ, поведение которых, кроме законов течения жидкости, определяется геоморфологией речного водосбора, гидрологическим режимом и законами механики грунтов. Отсюда понятны трудности при попытках расширения возможностей уравнения Навье — Стокса применительно к специфическим задачам руслового процесса. По этой причине ограничены возможности попыток обоснования пригодных на практике критериальных условий искаженного моделирования на основе уравнения Навье — Стокса [101, 102].

Поскольку современная теория русловых процессов не располагает замкнутой системой уравнений, описывающих весь комплекс проявляющихся при

взаимодействии жидкой и сыпучей сред, задача установления всех необходимых критериев и признаков точного подобия, а отсюда и создание методики точного физического моделирования этого явления, в настоящее время представляется трудновыполнимой задачей.

В таких условиях становится особенно важным исследование задачи приближенного моделирования.

Поэтому развитие теории и методики гидравлического моделирования руслового процесса тесно связано с развитием общей теории руслового процесса.

### **1.5. Особенности методики экспериментальных исследований и гидравлического моделирования участков рек, применяемой в Русловой лаборатории ГГИ**

Постановка лабораторных исследований с целью развития фундаментальных основ теории руслового процесса, разработки методики гидравлического моделирования и решения производственных задач с использованием физических гидравлических моделей речных русел в Русловой лаборатории ГГИ имеет существенные особенности, вытекающие из приведенных выше теоретических постулатов и методических установок гидролого-морфологической концепции руслового процесса [132, 215].

В организации и выполнении лабораторных исследований и гидравлического моделирования речных потоков и руслового процесса основополагающее значение имеют научно-теоретический, методический, технический и технологический аспекты лабораторного дела, существенно различающиеся в различных крупных исследовательских центрах.

В преобладающем большинстве существующих теоретических учений о речном русле содержание понятия «русловой процесс» имеет различное толкование и чаще всего сводится к чисто механическому взаимодействию «потока и русла» [43, 204], «потока и грунта» [204, 234] или «взаимообмену наносами между потоком и руслом» [107, 108, 204], тогда как в гидролого-морфологической теории руслового процесса механическое взаимодействие потока и русла считается лишь внутренним звеном в цепи факторов, определяющих русловой процесс. Как отмечалось, под русловым процессом в гидролого-морфологической теории понимаются изменения морфологического строения речного русла и поймы, происходящие под действием текущей воды. Содержанием же руслового процесса принят транспорт рекой наносов, проявляющийся внешне в виде русловых деформаций, осуществляющихся при перемещении по руслу морфологических дискретных элементов разных структурных уровней (отдельных частиц, микро-, мезо- и макроформ речного русла) [132, 150].

Исходя из этого, в лабораторных исследованиях и научно-методическом и производственном (собственно моделирования) направлениях, выполняемых в Русловой лаборатории ГГИ, первостепенное значение уделяется типам руслового процесса, дискретной структуре руслового потока и рельефа дна, иерархически

упорядоченным структурным формам транспорта донных наносов, четкому разделению наносов на донные и взвешенные. Кинематическая структура руслового потока в этой лаборатории исследуется с позиций дискретных структурных элементов турбулентности (глава 3), транспорт наносов изучается на различных структурных уровнях: на уровне отдельных частиц (глава 5) и микро- и мезоформ речного русла (главы 4, 7, 9, 10, 13).

В соответствии с методическими установками гидролого-морфологической теории руслового процесса, акцентирующими внимание на необходимость развития гидравлики русловых форм при изучении гидравлических сопротивлений и пропускной способности русел с различным типом руслового процесса и формами транспорта донных наносов (в отличие от принятой в речной гидравлике традиции выражать гидравлические сопротивления в общем виде, недифференцированно, качественно-описательными методами), в Русловой лаборатории ГГИ детально исследуется индивидуальный, групповой и суммарный вклады конкретных речных и русловых структурных форм в гидравлические сопротивления и пропускную способность русел разного типа: излучин, плесов и перекатов, микро- и мезоформ руслового рельефа (глава 6).

При моделировании на деформируемых русловых моделях появление микроформ (рифелей, дюн) на модели в большинстве гидравлических лабораторий мира традиционно считается нежелательным («незаконным») явлением, увеличивающим шероховатость дна, в связи с чем рекомендуется увеличивать крупность опытного материала, для предотвращения образования микроформ [86, 256, 289, 338, 443, 452].

В гидролого-морфологической теории руслового процесса микроформы на дне русла воспринимаются не только как элемент шероховатости русла, но и как фактор, определяющий расход донных наносов, вертикальные колебания отметок дна, гидравлические сопротивления, механизм и темпы перемещения мезоформ руслового рельефа. Поэтому изучению количественных характеристик микроформ и их воспроизведению на деформируемых моделях речных русел в методических разработках Русловой лаборатории ГГИ уделяется особое внимание (главы 4, 6, 7, 9, 10, 13).

Алгоритм организации и выполнения модельных исследований в Русловой лаборатории ГГИ включает следующие основные компоненты и этапы работ:

— ознакомление с проектом, в связи с которым предполагается выполнение модельных исследований, и материалами, использованными при обосновании проектного решения (задача, решаемая в проекте, и обоснование вариантов проектных решений, картографические и топографические материалы, лоцманские карты, режимные гидрологические данные, аэрокосмические съемки, материалы геологических изысканий, материалы натурных исследований и степень их достаточности, результаты обработки и анализа всего собранного материала);

— постановка задачи, определение места и роли в решаемой на конкретной реке задаче модельных исследований в комплексе с другими методами (натурные исследования, гидроморфологический анализ, гидравлические расчеты, лабораторный эксперимент, математическое моделирование);

- выбор типа физической модели (жесткая, деформируемая, неискаженная, искаженная) и ее размеров;
- обоснование методики моделирования для выбранного типа и размера модели, формулирование условий геометрического, динамического и кинематического подобия, подбор крупности и плотности опытного материала в случае деформируемой модели;
- проектирование, сооружение и оборудование модели;
- калибровка (тарировка) модели на основе данных, полученных в натуре специально для этой цели;
- выполнение экспериментов и их интерпретация, анализ данных опытов и пересчет на натуру для естественных и проектных условий, тщательная проработка проектных вариантов, включая дополнительные варианты, возникающие в ходе выполнения НИР;
- формулирование выводов и рекомендаций по результатам модельных исследований.

Все примеры решения различных практических задач на жестких и деформируемых гидравлических моделях, описанные в главах 8, 10 и 11, выполнены в соответствии с отмеченной выше схемой.

Глава 2

**ТЕХНИЧЕСКОЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ  
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ РЕЧНЫХ ПОТОКОВ  
И РУСЛОВОГО ПРОЦЕССА В ГГИ**

**2.1. Предпосылки к внедрению эксперимента в гидрологию**

В созданном в 1919 г. по инициативе В.Г. Глушкова Государственном гидрологическом институте изучение гидрологических явлений и процессов имело на первых этапах преимущественно географическую направленность. Но уже тогда и даже раньше (в связи с необходимостью улучшения судоходных условий на реках России) возникала потребность вариантного рассмотрения мероприятий, направленных на регулирование речного потока и русла, что можно было бы осуществить наиболее эффективно путем постановки лабораторного эксперимента на гидравлических макетах участков рек.

Вместе с тем, не только речной поток и его русло, но и другие виды гидрологических наблюдений нуждались в углубленных исследованиях физического существа отслеживаемых процессов и явлений, т. е. наряду с географическим методом в гидрологические исследования стал внедряться гидрофизический метод.

Необходимость гидравлического моделирования участков рек стала особенно очевидной к моменту начавшегося гидроэнергетического строительства, когда потребовались достаточно надежные оценки возможных последствий сооружения плотин на реках и, в связи с этим, сильного изменения режима стока воды и наносов.

К этому нужно добавить в целом сильно возросшую (особенно после окончания Великой Отечественной войны) хозяйственную нагрузку на реки со стороны разных отраслей экономики, интересы которых по отношению к водному объекту часто оказывались существенно различными и даже противоположными.

В связи с этим возникла серьезная проблема регулирования речных потоков и русловых процессов в комплексе разносторонних интересов водопотребителей и водопользователей с учетом необходимости обеспечения приемлемого экологического состояния природной среды.

Таким образом, насущная потребность создания лабораторий для всестороннего изучения гидрологических явлений и процессов (в том числе речных потоков и русловых процессов) в естественном состоянии водных объектов и в условиях уже существующей и планируемой антропогенной нагрузки переросла к середине XX века в проблему первостепенной важности с точки зрения совершенствования методологии гидрологической науки.

В ГГИ были созданы два научно-экспериментальных комплекса: Главная экспериментальная база (ГЭБ ГГИ) в пос. Ильичево, в 10 км от г. Зеленогорска, и Валдайская научно-исследовательская гидрологическая лаборатория (ВНИГЛ) в г. Валдае, которая в 1980 г. была переименована в Валдайский фи-



лиал ГГИ (ВФ ГГИ). ГЭБ ГГИ — это преимущественно комплекс для выполнения именно лабораторных экспериментальных исследований гидрологических явлений и процессов, включающий несколько природных объектов (в частности, болотный массив Ламмин-Суо и оз. Большое Симагинское); основным экспериментальным объектом ГЭБ ГГИ была и остается по настоящее время Русловая лаборатория.

ВНИГЛ (ВФ ГГИ) — это комплекс преимущественно полевых экспериментальных объектов, в составе которого для природных исследований речных потоков и русловых процессов организована Русловая станция на р. Поломети.

## **2.2. Русловая лаборатория ГГИ**

### **2.2.1. Краткая история становления Русловой лаборатории**

Решение о создании ГЭБ ГГИ и в ее составе Русловой лаборатории (как основного по объему строительных работ и комплексу подлежащих рассмотрению научных и практических задач экспериментального объекта ГЭБ) было принято правительством СССР, когда еще не закончилась Великая Отечественная война.

В конце лета и осенью 1944 г. гидрологи ГГИ обследовали местность на Карельском перешейке между озерами Большим Симагинским и Долгим и нашли ее подходящей для организации комплексных (озерных, болотных, водно-балансовых) наблюдений и устройства Русловой лаборатории в долине р. Юля-Йоки, вытекающей из оз. Долгого и впадающей в оз. Большое Симагинское.

Предполагалось перекрыть русло и долину этой небольшой речки плотиной и таким образом создать водохранилище, формирующее большой (около 6 млн. м<sup>3</sup>) полезный объем для подачи, при необходимости, дешевой воды на экспериментальные установки, расходами до 10 м<sup>3</sup>/с.

Разработанное в 1945 г. специалистами ГГИ задание на проектирование ГЭБ было рассмотрено и одобрено Отделением физических наук Академии наук СССР и затем утверждено начальником Главного управления гидрометслужбы СССР (ГУГМС), генерал-лейтенантом, академиком Е.К. Федоровым.

Общее руководство проектными работами осуществлял директор ГГИ В.А. Урываев, а непосредственное руководство всеми проектными и изыскательскими работами — директор строящейся ГЭБ С.С. Гинко.

Проектирование Русловой лаборатории выполнял институт Гидроэнергопроект (Ленинградское отделение). Проектом предусматривалось разместить лабораторный корпус в среднем течении р. Юля-Йоки, где расширенная часть ее долины была достаточной для устройства строительной площадки шириной около 100 м и длиной более 200 м.

В процессе разработки технического проекта в техническое задание был внесен ряд изменений, направленных в основном (в связи с тяжелой экономической обстановкой послевоенного времени в стране в целом) на уменьшение основных параметров Русловой лаборатории. Эти изменения были рассмотрены Ученым советом ГГИ и одобрены им.

В начале 1950-х годов строительство осуществлялось медленно, с большими перерывами и с невысоким уровнем качества собственно строительных работ. В 1957 г. над зданием лабораторного корпуса еще не было кровли. Дело сдвинулось с мертвой точки после того, как в 1958 г. ГГИ взял завершение строительства (на условиях хозспособа) в свои руки.

Вместе с тем научная жизнь (эксперименты) началась в Русловой лаборатории уже в 1957 г. В одном из помещений, предназначенных для камеральных работ, был построен небольшой гидравлический лоток, сконструированный руководителем группы русловиков в Ильичево А.Н. Ляпиным, и в этом лотке были начаты экспериментальные исследования структуры руслового потока и песчаных гряд.

Если эксперименты в этом небольшом лотке принять за начало научно-производственной деятельности Русловой лаборатории, то очевидно, что в 2007 г. ей, как научному подразделению ГГИ, исполнилось 50 лет.

С 1957 г. началось неуклонное наполнение Русловой лаборатории новыми экспериментальными установками и технологическим оборудованием. Это техническое насыщение Русловой лаборатории (в том числе и измерительными средствами) продолжалось до начала 1980-х годов, для того чтобы успешно решать многочисленные научные и прикладные задачи, сформулированные еще в проектных документах во второй половине 1940-х годов.

### **2.2.2. Задачи Русловой лаборатории ГГИ**

С точки зрения основных научных целей и задач, Русловая лаборатория и Гидродинамическая лаборатория рассматривались в проектных документах как единое целое. По этому поводу в проектных документах отмечалось, что в основном и в первую очередь в задачу проектируемых лабораторий должно входить решение общих проблем физической гидродинамики и русловых процессов, чем они и должны отличаться от существующих ведомственных лабораторий, занимающихся решением частных задач, связанных с определенными производственными объектами. Органически соединенным с деятельностью лабораторий должно быть также обобщение накопленных знаний и поиск новых путей в области построения теоретических основ динамики турбулентности потока и тесно связанной с ней динамики русловых процессов. В завершение планировалось получение конкретных решений в области практических расчетов по ряду частных вопросов.

Конкретизируя задачи лабораторий, как научного центра, объединяющего весь комплекс исследований в области гидродинамики и русловых процессов с учетом их прикладного значения и необходимости решения ряда конкретных вопросов, были обозначены следующие задачи.

- Исследование кинематической структуры и динамики руслового потока. (Здесь отмечалось, что весьма трудной задачей будет изучение пульсации скоростей; необходимо изучение всех трех составляющих пульсационной скорости и их пространственного распределения в потоке.)
- Изучение процессов турбулентной диффузии и движения взвешенных наносов. (Лабораториями должна разрабатываться пограничная задача

для наносов — о взаимодействии потока и размываемого русла. Решение этой задачи должно способствовать разработке следующей проблемы.)

- Исследование формирования речного русла.
- Исследование динамики первичного склонового стока и его эрозионной деятельности.

Далее к числу важнейших разделов деятельности лабораторий были отнесены следующие:

1) проблема подобия и моделирования (в частности, отмечалось, что актуальнейшими вопросами подобия, подлежащими экспериментальному изучению, являются вопросы подобия крупности наносов и шероховатости русла, подобия уклона и вопрос об искаженном моделировании);

2) разработка методики лабораторных и натуральных исследований и измерений (в частности, разработка батометров для донных и взвешенных наносов, разработка метода измерения коэффициента турбулентного обмена, пульсации скоростей, измерения направления течения и многие др., которые по существу своему должны разрешаться в лабораториях гидродинамики и русловой).

Общее предназначение проектируемого лабораторного комплекса сводилось к тому, что он должен был стать научным центром, объединяющим в системе гидрометслужбы весь комплекс исследований в области гидродинамики и русловых процессов и обслуживающим запросы народного хозяйства в этой области. Такими были задачи, поставленные еще в 1940-х годах, когда страна начинала восстанавливать разрушенное войной хозяйство, в том числе и объекты гидроэнергетики и водного хозяйства.

За прошедшие 60 лет в Русловой лаборатории выполнены сотни экспериментальных работ теоретического, методического и прикладного (применительно к конкретным хозяйственным объектам на реках) характера. Их перечень приведен в Приложениях 1–3, из которых видно, насколько широка география исследований, и насколько разнообразен круг задач, решаемых в Русловой лаборатории в разное время для отраслей экономики. При этом одновременно проведены многочисленные экспериментальные работы, направленные на дальнейшее развитие теории руслового процесса, динамики речных турбулентных потоков и на усовершенствование методов гидравлического моделирования участков рек.

### **2.2.3. Основные технические параметры, экспериментальные установки и технологическое оборудование Русловой лаборатории**

Современная Русловая лаборатория, сложившаяся к началу 1980-х годов, представлена двумя экспериментальными комплексами: основным лабораторным корпусом и открытой русловой площадкой с двухэтажным зданием при ней, созданной в 1970-х годах, когда востребованность в научно-экспериментальных оценках русловых деформаций для нужд различных объектов водного хозяйства была особенно высока.

Здание основного лабораторного корпуса поставлено в расширенной части долины р. Юля-Йоки и ориентировано продольной осью вдоль вновь органи-

зованного отрезка реки по линии север—юг. Отвод материнского русла реки на этом участке был осуществлен, когда первоначальное намерение о перекрытии ее плотиной еще оставалось в силе и сохранялась прежняя компоновка лабораторных установок.

Длина основного корпуса — 170 м, ширина — около 40 м. В здании размещены площадка  $86 \times 18$  м для сооружения пространственных гидравлических моделей водных объектов, лотковый зал (размером  $115 \times 7$  м) с тремя гидравлическими лотками, фабрика грунтов, монтажная площадка, столярная и слесарная мастерские, станочное помещение, аккумуляторный участок и участок для выполнения электросварочных работ, водохранилище и насосная станция оборотного водоснабжения. Отдельное помещение — малый экспериментальный зал (размером  $18 \times 7$  м) с малым гидравлическим лотком, двумя волновыми лотками, установкой для воспроизведения ламинарного режима течения напорного потока, пневматической установкой для изучения взаимодействия воды, находящейся в свободном состоянии над песчаным дном, с водой, заключенной в песчаном грунте. В этом же здании размещены большой образцовый градуировочный канал Отдела метрологии ГГИ, Гидрофизическая лаборатория, рабочие кабинеты сотрудников подразделений ГЭБ. Общий вид основного лабораторного корпуса приведен на рис. 2.1 (а), а вид большого экспериментального зала — на рисунке 2.1 (б).

Второй экспериментальный комплекс Русловой лаборатории размещен параллельно основному корпусу, между ним и вновь образованным участком р. Юля-Йоки. Он состоит из открытой площадки (размером  $110 \times 21$  м) для сооружения пространственных гидравлических моделей водных объектов и примыкающего к ней двухэтажного здания, в котором размещены бетонные резервуары водохранилища насосной станции оборотного водоснабжения, кабинеты сотрудников и подсобные помещения. Общий вид экспериментального комплекса с открытой русловой площадкой приведен на рис. 2.2.

Оба экспериментальных комплекса Русловой лаборатории имеют независимые системы оборотного водоснабжения гидравлических моделей и экспериментальных установок (лотков). Система оборотного водоснабжения основного лабораторного корпуса включает бетонные резервуары общей емкостью  $1400 \text{ м}^3$ , расположенные под полами южной части здания. Над ними находится насосная станция общей производительностью насосов около  $1,0 \text{ м}^3/\text{с}$ . На разные случаи потребных расходов воды насосная станция укомплектована 10-ю центробежными насосами производительностью от  $10,0 \text{ л/с}$  до  $250 \text{ л/с}$ .

Вода из водохранилища подается по напорному трубопроводу в напорный бак со стабилизатором уровня, обеспечивающим постоянство напора и, следовательно, расходов воды, подаваемых на модели и в лотки.

Из напорного бака вода поступает в кольцевой трубопровод диаметром 200 мм, установленный по контуру площадки для размещения гидравлических моделей и составленный из четырех элементов  $84+18+84+18$  м. На кольцевом трубопроводе, равномерно по его длине, установлены 32 отвода с задвижками Лудло, что обеспечивает удобное подключение моделей при разных вариантах размещения их на лабораторной площадке.



а)



б)

Рис. 2.1. Русловая лаборатория ГГИ:

а) общий вид основного лабораторного корпуса; б) общий вид большого экспериментального зала

Прошедшая через модель вода поступает затем в расположенные под бетонным полом площадки продольные или поперечные водоотводящие галереи, из которых через двухкамерный отстойник — в резервуары водохранилища, замыкая цикл водооборота.

Система оборотного водоснабжения открытой русловой площадки устроена по такой же схеме, как и в лабораторном корпусе, но не имеет отстойника. Она рассчитана на подачу расхода воды на модели открытой площадки до  $0,25 \text{ м}^3/\text{с}$ . Предусмотрена возможность взаимозаменяемости обеих систем на случай возникновения аварийных ситуаций.

Фабрика грунтов примыкает с южной стороны к лабораторной площадке и занимает пространство площадью  $18 \times 18 \text{ м}$ , на котором размещены 22 бетонных



Рис. 2.2. Общий вид экспериментального комплекса с открытой русловой площадкой

бункера объемом по  $15 \text{ м}^3$  каждый, для хранения используемых в экспериментах грунтов, и установка для разделения грунта на фракции, основу которой составляют два вибрационных полупогружных грохота ГВП–1А (разработка института «Механобр»). Грохоты работают на мокрых грунтах, благодаря чему исключается процесс сушки, уменьшаются шум и запыленность, повышается в целом технологический уровень приготовления грунтов к эксперименту. Применение колосниковых сит из нержавеющей стали обеспечивает долговечность всего набора, позволяющего выделять частицы грунта с дискретностью  $0,1 \text{ мм}$  в диапазоне крупностей от  $0,1 \text{ мм}$  до  $1,5 \text{ мм}$ . Производительность установки — от  $2,0$  до  $10 \text{ т}$  за рабочую смену. Общий вид установки для разделения грунта на фракции приведен на рис. 2.3.

На фабрике грунтов размещаются также растворный узел для приготовления бетонных смесей, применяемых при формовке рельефа жестких (недеформируемых) моделей.

Для выполнения трудоемких работ в основном лабораторном зале имеется мостовой электрокран грузоподъемностью  $5,0 \text{ т}$ , а в лотковом зале — кранбалка грузоподъемностью  $1,5 \text{ т}$ .

В современной Русловой лаборатории имеется 4 русловых лотка и 3 волновых резервуара.

- Гидравлический русловой лоток со стеклянными боковыми стенками и стеклянным дном, расположенный в обособленном помещении, малом



Рис. 2.3. Установка для разделения грунта на фракции

экспериментальном зале (длина лотка — 8,0 м, ширина — 0,21 м, высота стенок — 0,25 м, уклон дна прямой — до 0,025, обратный — до 0,015, расход воды оборотного водоснабжения — до 0,012 м<sup>3</sup>/с). Лоток оборудован устройствами для автоматического воспроизведения гидрографа стока по заданной программе, подачи наносов в поток, улавливания наносов, регистрации их количества и возврата в начальный створ лотка, устройствами для выполнения следящей фото- и киносъемки. Общий вид 8-метрового лотка приведен на рис. 2.4.

- Гидравлический русловой лоток со стеклянными боковыми стенками и стеклянным дном в лотковом зале Русловой лаборатории (длина лотка — 25 м, ширина — 0,838 м, высота стенок — 0,75 м, уклон дна прямой — до 0,02, обратный — до 0,02, расход воды оборотного водоснабжения — до 0,06 м<sup>3</sup>/с). Оригинальное техническое решение механизма изменения наклона лотка позволило получить хорошую обзорность потока не только сбоку и сверху, но и снизу, через прозрачное дно, и создало удобные условия для размещения под лотком фотокиносъемочной и другой регистрирующей аппаратуры. Кроме того, конструкция лотка допускает

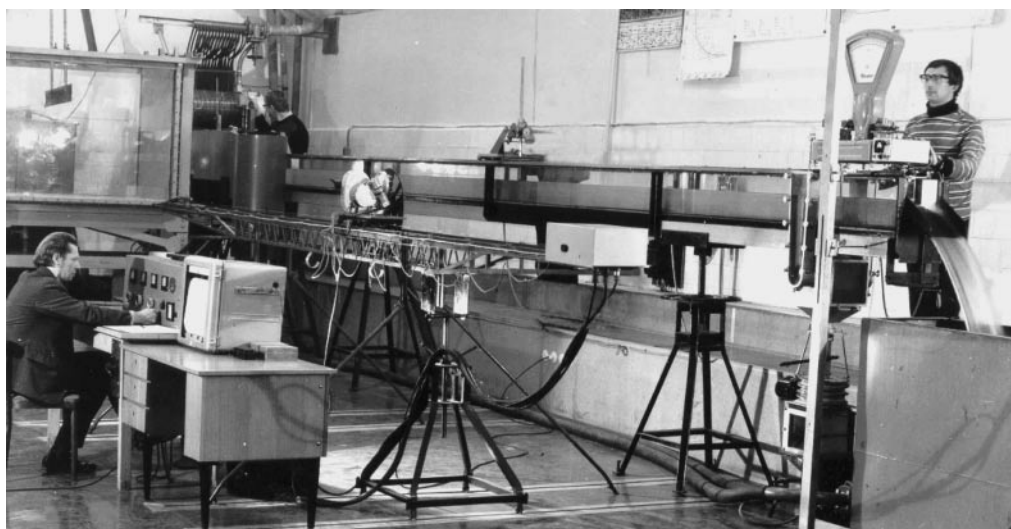


Рис. 2.4. 8-метровый гидравлический лоток в малом экспериментальном зале

движение воды в нем в обоих направлениях. Общий вид 25-метрового лотка приведен на рис. 2.5.

- Гидравлический русловой лоток с металлическим дном и стеклянными боковыми стенками в лотковом зале Русловой лаборатории (длина лотка — 100 м, ширина — 1,0 м, высота стенок — 1,0 м, дно горизонтальное, расход воды оборотного водоснабжения — около  $0,2 \text{ м}^3/\text{с}$ ). Лоток оборудован приборной и грузовой тележками, высокопроизводительным вентилятором, с помощью которого, устанавливая съемную кровлю на лотке, можно создавать ветровой поток над водной поверхностью и ветровые волны на течении и в стоячей воде. Движение воды в лотке возможно в обоих направлениях, лоток может использоваться и отдельными секциями в общем случае разной длины. Общий вид 100-метрового лотка приведен на рис. 2.6.
- Гидравлический русловой лоток с металлическим дном и стеклянными боковыми стенками в лотковом зале лаборатории (длина лотка — 50 м, ширина — 2,0 м, высота стенок — 0,7 м, дно горизонтальное, расход воды оборотного водоснабжения — около  $0,2 \text{ м}^3/\text{с}$ ). Движение воды в лотке возможно в обоих направлениях. Общий вид 50-метрового лотка приведен на рис. 2.7.
- Большой волновой резервуар с металлическим дном, двумя металлическими стенками и двумя стеклянными стенками в малом экспериментальном зале (длина — 2,0 м, ширина — 1,0 м, высота — 1,15 м). Резервуар оборудован устройством для воспроизведения стоячих волн. Общий вид большого волнового резервуара приведен на рис. 2.8.
- Малый трехсекционный волновой резервуар с металлическим корпусом и стеклянной передней стенкой в малом экспериментальном зале (длина секций — 0,4 м, ширина — 0,2 м, высота 1-ой и 2-ой секций — 0,5 м, 3-ей секции — 0,8 м). Резервуар оборудован устройством для одновремен-





Рис. 2.5. 25-метровый лоток с переменным наклоном



Рис. 2.6. Общий вид 100-метрового гидравлического лотка



Рис. 2.7. Общий вид 50-метрового гидрологического лотка

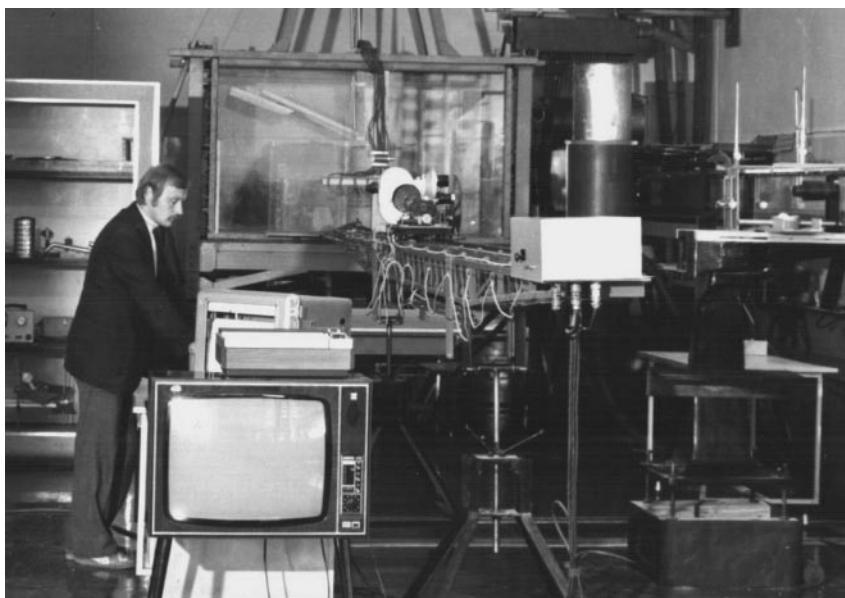


Рис. 2.8. Общий вид большого волнового лотка



Рис. 2.9. Трехсекционный волновой резервуар

ного воспроизведения во всех трех секциях стоячей волны. Общий вид трехсекционного волнового резервуара приведен на рис. 2.9.

- Волновой резервуар со стеклянным дном и стеклянными боковыми стенками в здании открытой русловой площадки (длина резервуара — 5,0 м, ширина — 0,5 м, высота боковых стенок — 0,5 м, дно горизонтальное). Резервуар оборудован съемной кровлей и вентилятором для воспроизведения воздушного потока и ветровых волн. Подходы к лотку выполнены в разных уровнях, чем обеспечивается удобство наблюдений и измерений сверху, сбоку и снизу.

В ходе сооружения моделей водных объектов и подготовки гидравлических лотков к экспериментам, а также и при выполнении собственно экспериментов используется разработанное и созданное в Русловой лаборатории различное оборудование.

Сооружение пространственных гидравлических моделей сопровождается перемещением балластного (формовочного) грунта в больших объемах. Механизация этого процесса достигается с помощью одноканатного грейфера, подвешиваемого на гак мостового крана. Объем грунта, забираемый одновременно грейфером, составляет 0,025–0,15 м<sup>3</sup> в зависимости от условий залежи забираемого грунта.

Для переноски больших объемов грунта используется набор металлических контейнеров разной емкости — от 1,0 до 2,0 м<sup>3</sup>, в том числе контейнеры с открывающимся дном.

Подача воды из кольцевого трубопровода на пространственные модели и в гидравлические лотки осуществляется через головные мерные баки, содержащие элементы для регулирования и измерения расхода воды. В зависимости

от величины планируемых в экспериментах расходов воды используются мерные баки разных размеров, с треугольными водосливами в тонкой стенке на расходы воды от 5 до 50 л/с.

Для регулирования глубины и уровней воды на пространственных моделях и в гидравлических лотках используются концевые водосливные затворы разной конструкции. Наиболее удачным с точки зрения удобства работы с ним, надежности установления нужного уровня воды и сохранения его неизменности в ходе эксперимента оказался концевой водосливной затвор конструкции В.И. Теплова. Для гидравлических лотков оказался удобным концевой водосливной затвор шахтного типа конструкции А.Б. Клавена и В.И. Теплова.

Для успокоения воды, поступающей из головных водомерных баков в лотки и на пространственные гидравлические модели, применяются габионы — металлические сетчатые ящики размером 1,0×0,3 м высотой 0,6 м, заполненные путаной полиэтиленовой нитью. В качестве гасителей колебания водной поверхности используются щиты, набранные из пенопластовых листов и устанавливаемые на пространственных моделях в верхнем приямке, между головным баком и габионовой фильтрующей стенкой. Вода из головного бака выливается через треугольный водослив сосредоточенной струей в приемную перфорированную емкость с путаной полиэтиленовой нитью, исключающей образование взволнованной водной поверхности. Совместным действием перфорированной емкости, пенопластовых щитов и стенки из фильтрующих габионов вода подается на модель максимально успокоенной, что весьма важно при измерении уровней воды.

Для обслуживания моделей и выполнения измерений в ходе экспериментов используются облегченные переносные мостики разной длины, рассчитанные на двух человек.

Внешний контур моделей и подходы к ним из разных точек экспериментальной площадки выполняются из бетонных квадратных плиток разного цвета размером 0,4×0,4 м. Плитки легко и быстро укладываются на песчаное основание и легко убираются в специальные кассеты в ходе демонтажа отслуживших моделей.

#### **2.2.4. Методические приемы выполнения экспериментальных исследований и средства измерения характеристик потока и русла**

Экспериментальные исследования речных потоков и русловых процессов выполняются в Русловой лаборатории ГГИ в двух принципиально разных методических направлениях: в абстрагированных условиях и на гидравлических пространственных моделях конкретных водных объектов. К первому направлению относятся эксперименты, выполняемые в гидравлических лотках и на разного рода схематических установках и стендах. Особенностью второго направления является возможность пересчета зафиксированных в эксперименте гидравлических, морфометрических и морфологических характеристик потока и русла в их натурные значения.

При этом и эксперименты в лотках, и эксперименты на пространственных моделях выполняются либо в жестких границах (стеклянные стенки и стеклян-

ное, бетонное или металлическое дно в лотках и бетонированный рельеф пространственных моделей), либо в деформируемых границах (дно из подвижного песка или из заменителя естественного песка, рельеф модели также из подвижного песка или из его заменителя).

Эксперименты в лотках с жесткими границами предпринимаются в основном для исследования кинематической структуры руслового потока и, в частности, его турбулентности. В этом случае измерения осредненных гидравлических характеристик потока производятся известными средствами измерения (водомерными иглами или пьезометрами для измерения уровня воды и глубины, трубками Пито, микровертушками, термогидрометрами для измерения скорости течения), а структура турбулентности и поле актуальных скоростей регистрируются фото- и киносъёмкой каких-либо частиц в потоке, имеющих близкую к нулю гидравлическую крупность.

В гидравлических лотках с деформируемым дном наряду с фиксацией поля скоростей в осредненных и актуальных значениях отслеживается и измеряется формирующийся рельеф дна. Для этого применяется лабораторный эхолот, перемещаемый над лотком по продольным створам, что дает представление о длинах и высотах донных микроформ. Повторное перемещение эхолота по тем же створам дает представление о скорости перемещения (скорости деформации) донных микроформ.

Скоростное поле потока и характеристики донных микроформ фиксируются после того, как система «поток-деформируемое дно» достигает динамически равновесного состояния. Критерием (или показателем) такого состояния системы является неизменность уклона водной поверхности, равенство расхода наносов, подаваемых в поток, и наносов в конце лотка, а также неизменность размеров донных микроформ во времени и одинаковость их по длине лотка.

Помимо перечисленных методических приемов в лотковых экспериментах, также как и на других лабораторных стендах и установках, применяются и другие приемы, носящие специфический характер (например, при исследовании взаимодействия руслового потока с подрусовой водой или при его взаимодействии с тяжелыми частицами, слагающими дно русла). Об этих особых приемах лотковых экспериментов сообщается в главе 4. Здесь же отметим, что результаты лотковых экспериментов, будучи важными для установления еще неизвестных сторон изучаемого явления или процесса, не дают непосредственного и немедленного решения для выхода из лабораторного лотка в природу. Только многократное повторение одинаковых экспериментов, но уже в широком диапазоне граничных условий и даже с воспроизведением в лотках условий конкретных природных водотоков и измерениями в самих этих водотоках создает основу для построения эмпирических связей, становящихся расчетным инструментом в гидрологической практической деятельности. Так, например, были разработаны зависимости для оценки характерных значений актуальных (мгновенных пульсационных) скоростей потока, приведенные в главе 3.

Любая гидравлическая модель является в той или иной мере схематизацией прототипа, на ней воспроизводятся с возможно большей точностью те свойства природного объекта, которые в решаемой задаче являются наиболее значимыми.

Но вместе с тем очевидно, что наиболее полно и наиболее подобным образом отражает натурный объект та модель, на которой выполнены известные условия геометрического, кинематического и динамического подобия. А это значит, что должно быть выполнено условие равенства масштабов плана и глубин—высот, чем достигается подобие воспроизводимого рельефа.

Кинематическое подобие модели прототипу достигается обеспечением на модели числа Рейнольдса большего, чем его критическое значение, т. е. русловой поток на модели должен быть турбулентным.

Динамическое подобие модели прототипу контролируется условием равенства модельного и натурального чисел Фруда.

К сожалению, эти основные условия, определяющие подобие модельного и натурального процессов, не всегда могут быть выполнены одновременно. Это обстоятельство вынуждает применять такие приемы моделирования, которые, несмотря на нарушение главных условий, все же позволяют достигать подобия течения воды (по крайней мере, на уровне осредненных характеристик движения) и таким образом извлекать из эксперимента полезный результат.

Самое распространенное препятствие к созданию идеальной модели — недостаточные размеры лабораторных площадок, вынуждающие назначать мелкий масштаб, что влечет за собою слишком малые (неудобные для выполнения измерений) глубины на модели и вместе с тем — исключительно малые величины изменения уровня воды в разных точках модели, приближающиеся к точности применяемых уровнемеров.

Но основное негативное следствие мелкомасштабности модели заключается (в экстремальных случаях) в нарушении условия кинематического подобия — число Рейнольдса модельного потока оказывается меньше критического значения, и поток на модели оказывается ламинарным, формируя линейный, а не квадратичный режим гидравлического сопротивления.

В связи с этими нарушениями обязательных условий окажется недостижимым и динамическое подобие, поскольку ламинаризованный поток реализуется на модели при меньших глубинах и больших скоростях течения, чем того требует геометрический масштаб модели.

Выход из этого положения достигается укрупнением масштаба высот—глубин по сравнению с плановым масштабом.

Этим методическим приемом модельный поток вводится в турбулентный режим течения и, следовательно, в квадратичный режим гидравлического сопротивления. Глубины на модели становятся достаточными для выполнения различных измерений, особенно — измерения скоростей течения; более надежными оказываются измерения перепадов уровней воды в разных точках модели.

Вместе с тем, назначение разных масштабов плана и высот—глубин вызывает искажение рельефа модели (он становится более резко очерченным, более выпуклым). Очевидно, что на искаженной модели осредненный уклон дна и уклон потока становятся больше, чем на «нормальной» модели, во столько раз, во сколько различаются плановый и вертикальный масштабы модели.

Увеличенный по сравнению с «нормальным» уклон модели вызывает увеличение скоростей течения на ней и уменьшение глубин, что выводит модель из

динамического подобия натуре (модельное число Фруда оказывается большим его натурального значения).

Введение модельного потока в режим динамического подобия достигается путем нанесения на поверхность модели дополнительной шероховатости, вызывающей увеличение гидравлического сопротивления, рост глубин и уменьшение скоростей течения (модельное число Фруда становится равным или близким его натуральному значению).

Таким образом, применяя два описанных методических приема (укрупнение масштаба высот — глубин и увеличение шероховатости поверхности модели), удается ввести модель в кинематическое и динамическое подобие натуре.

Искажение рельефа модели, как свидетельствует обширный опыт моделирования водных объектов в Руслевой лаборатории ГГИ и опыт зарубежных лабораторий, при не слишком больших отличиях горизонтального и вертикального масштабов (до пяти-шестикратного) не вызывает заметного несоответствия структуры осредненных скоростей в плановой задаче, в связи с чем результаты модельных измерений скорости течения вполне уверенно и надежно пересчитываются известным образом в натуру.

Вместе с тем, искажение рельефа модели вызывает нарушение подобия вторичных кинематических элементов поля осредненных скоростей, особенно на участках резкого изменения отметок дна в продольных профилях русла, где формируются отрывные состояния транзитного потока с образованием водоворотных зон в вертикальной плоскости.

Эксперименты с использованием описанных методических приемов выполняются на жестких, бетонных моделях. Оценки руслового процесса (русловых деформаций) на таких моделях производятся опосредованным путем: на основе детально измеренного поля осредненных скоростей на модели, с учетом картограммы донных (русловых) отложений, составляется заключение о размыве дна, аккумуляции наносов или сбалансированном транзите их в той или иной зоне речного потока.

Эксперименты на моделях начинаются с градуировочной (тарировочной) серии. Для этого должен быть получен следующий комплект натуральных характеристик потока и русла, измеренных при большом (в бровках русла) и малом (меженном) расходах воды: расход воды; уклон гидравлический; план течений, полученный поверхностными поплавками; скорости течения, измеренные гидрометрической вертушкой на гидростворе; картограмма донных отложений: продольные профили дна (эхолотирование) на характерных участках русла с повторением измерений (для определения характеристик и скорости деформации форм руслового рельефа).

Если модель доброкачественна, то при подаче на нее измеренного в натуре расхода воды должны сформироваться подобные натурным глубины и отметки уровня, а следовательно — подобные скорости течения и гидравлический уклон. Но такой результат получается, как показано выше, редко. Он возможен только на модели с неискаженным рельефом и при дополнительном условии подобия гидравлического сопротивления модели, не содержащей микроформ руслового

рельефа, гидравлическому сопротивлению натурального русла, сформированному преимущественно донными грядами.

Обычно модель с неискаженным рельефом оказывается более гладкой по сравнению с натурой, и для выведения ее на требуемые (подобные натурным) глубины и отметки уровней воды требуется дополнительная шероховатость на ее поверхность.

Модели, выполненные с искажением рельефа (т. е. с увеличенным в разной степени гидравлическим уклоном по сравнению с натурным), всегда требуют дополнительной шероховатости, и тем в большей мере, чем сильнее искажен рельеф. Только таким путем можно привести в соответствие глубины и скорости течения на модели натурным их значениям и добиться выполнения условия  $Fr = idem$ , т. е. динамического подобия модели натурному объекту.

Если эксперименты предполагаются на деформируемой модели, то наряду с обязательным выполнением условий геометрического, кинематического и динамического подобия должны быть выполнены условия подобия зернистого материала, слагающего рельеф (тело) модели. Крупность модельных зерен должна быть выдержана в геометрическом масштабе модели, т. е. отношение диаметра частиц к глубине в соответственных точках модели и природы должно быть одинаковым  $\frac{d}{H} = idem$ .

Вторым обязательным условием по модельным грунтам—наносам является выполнение подобия их подвижности. Это условие выражается обычно одинаковостью отношения гидравлической крупности частиц к характерной скорости потока, например, к неразмывающей,  $\frac{w}{V_0} = idem$ .

Приведенные условия наиболее определенно выдерживаются при моделировании участков горных рек. Сравнительно небольшие размеры горных рек и достаточно крупноразмерный аллювий, слагающий их ложе, допускают в совокупности использовать в качестве модельных грунтов—наносов обычный естественный песчано-гравелистый грунт плотности 2,65 г/см<sup>3</sup>.

Применение в наших исследовательских работах описанных методических приемов (деформируемые модели участков рек Ньюджи, Хара-Мурина, Утулика, Аносовки, Лабы) дало весьма определенные и положительные результаты, характеристика которых приведена ниже, в главе 10.

Моделирование участков равнинных рек на деформируемых моделях сопряжено с большими трудностями принципиального характера. Большие размеры равнинных рек вынуждают принимать мелкий масштаб модели, исключая возможность воспроизвести на ней в этом масштабе мелкозернистые натурные наносы.

В настоящее время нет надежных и физически обоснованных методических приемов воспроизведения на деформируемой модели морфологических образований речного русла, подобных геометрически и динамически натурным морфологическим образованиям. Но результаты экспериментальных исследований структуры макротурбулентности речного потока, особенностей механизма его взаимодействия с подрусловой водой и частицами грунта, слагающего



аллювиальное ложе реки, создали основу для выработки физического подхода к решению этой проблемы. Некоторые детали этого подхода и первые экспериментальные попытки его реализации обсуждаются ниже, в главе 4.

На деформируемых моделях применяются те же, что и на жестких, методические приемы измерения характеристик потока: стационарные и переносные уровнемеры для измерения уровней воды и глубин потока, специальная фотосъемка поверхностных поплавков и микровертушки для измерения скоростей течения.

Рельеф модели и конкретные морфологические элементы в его составе измеряются лабораторным эхолотом, перемещаемым преимущественно по продольным створам. Для этого над моделью устраивается рельсовый путь с тележками продольного и поперечного перемещения.

Экспериментальные исследования кинематической структуры потока и морфологического строения русла сопровождаются измерением гидравлических и морфологических характеристик, основными из которых являются следующие:

- уровень воды и глубина воды;
- расход воды;
- скорость течения в осредненных и в актуальных значениях, в отдельных точках потока и в некоторой его области, рассматриваемой в горизонтальной и в вертикальной плоскости;
- гидрограф стока воды (изменение расходов воды во времени, т. е. неустановившийся режим потока);
- геометрические и динамические характеристики морфологических элементов руслового рельефа, образующихся в лабораторных гидравлических лотках и на пространственных моделях водных объектов;
- геометрические и гидравлические параметры русловых наносов;
- расход влекомых наносов.

Ниже приводится краткая характеристика технических средств, применявшихся и применяемых в настоящее время в Русловой лаборатории для измерения или фиксирования перечисленных величин.

*Уровень воды и глубина воды* измеряются металлическим речным игольчатым уровнемером, приведенным на рис. 2.10. Уровнемеры этого типа были изготовлены мастерскими ВАСХНИЛ по заказу ГГИ еще в 1970-х годах и с тех пор постоянно задействованы в экспериментальных работах Русловой лаборатории. Измерительная рейка уровнемера имеет четкую сантиметровую и миллиметровую градуировку и нониус, позволяющий снять отсчет с точностью до 0,1 мм.

Этими уровнемерами оснащены все гидравлические лотки Русловой лаборатории и пространственные модели водных объектов. И на лотках, и на моделях уровнемеры применяются в варианте стационарных и в варианте переносных измерительных пунктов. Во втором случае уровнемер применяется в комплекте с нивелиром.

Некоторым неудобством работы с описанным уровнемером, и по существу его недостатком, является ручной способ выведения иглы прибора на поверхность воды: субъективный фактор (работающий с прибором лаборант) может уменьшить приведенную выше точность отсчета, равную 0,1 мм.

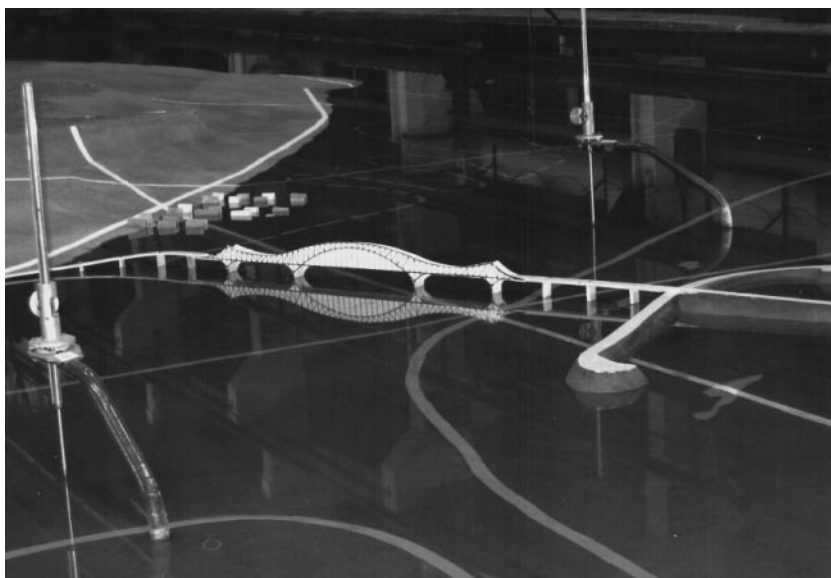


Рис. 2.10. Уровнемеры на модели р. Иртыша у г. Ханты-Мансийска

Сотрудник Русловой лаборатории Р.И. Ломунов предложил усовершенствованный вариант уровнемера, в котором измерительная рейка прибора перемещается в вертикальном направлении электродвигателем постоянного тока типа МН-145. Гайка, приводящая измерительную рейку в движение, соединена жестко с перфорированным диском, через отверстия которого подается световой луч на фотодиод. Комбинацией шага резьбы гайки и количества отверстий на диске удалось существенно повысить точность отсчета, стабилизировать момент касания иглой водной поверхности и, кроме того, представить результат измерения с помощью вторичного электронного блока в виде светящейся цифровой индикации.

Опытный образец этого прибора успешно прошел испытания, но, к сожалению, не был внедрен в экспериментальных исследованиях Русловой лаборатории из-за материальных трудностей послесоветского периода.

Глубина воды в гидравлических лотках и на пространственных моделях определяется разностью отметок поверхности воды и дна либо измеряется непосредственно, если измерительная рейка уровнемера имеет шкалу с нулем, совмещенным с острием иглы. Наряду с этими способами в лотках с песчаным деформируемым дном для измерения глубины на некотором участке лотка используются планшеты из оргстекла, с разграфкой  $2,0 \times 2,0$  мм и устанавливаемые у боковой стеклянной стенки.

*Расход воды* является расчетной (вычисляемой) гидравлической характеристикой. В лотковых и модельных экспериментах определение расхода воды, поступающей в лоток или на пространственную модель, выполняется с помощью водомерного головного бака. Водомерный бак оборудован треугольным водосливом в тонкой стенке с углом при вершине  $60^\circ$  или  $90^\circ$ , водомер-

ным стеклом с уровнемером для измерения уровня воды, проходящей через водослив. Размеры водомерного бака задаются с таким расчетом, чтобы при максимальном расходе воды обеспечивалось совершенное сжатие струи, вытекающей через водослив.

Перед началом основной серии экспериментов проводится серия опытов для построения кривой расходов водомерного бака. Расход воды для этой кривой измеряется либо объемным способом, либо рассчитывается по известной зависимости:

$$Q = 1,4 H^{5/2},$$

где  $H$  — напор на водосливе, определяемый разностью отметки уровня воды в водомерном стекле и отметки вершины треугольного водослива. Водомерное стекло устанавливается на боковой стенке бака на расстоянии не менее 5 максимальных напоров от водослива.

*Скорости течения* измеряются разными техническими средствами в зависимости от поставленной в исследовании задачи. Если задача эксперимента заключается в оценке осредненных скоростей течения, применяются трубки Пито или лабораторные микровертушки. В Русловой лаборатории ГГИ была разработана еще в начале 1980-х годов и используется до настоящего времени микровертушка с пластмассовой лопастью диаметром 6 мм, с шагом лопастного винта 12 мм (автор разработки Н.И. Зайцев). Ось вертушки установлена в часовых подшипниках открытого типа; вторичным блоком электроники отслеживаются каждые пол-оборота лопастного винта, скорость течения высвечивается на дисплее цифровой индикацией.

При исследовании поля скоростей в некотором пространстве потока используется фото-кинематографический метод измерения траекторий частиц полистирола с близкой к нулю гидравлической крупностью. Методика приготовления таких частиц к эксперименту описана в [112, 119]. Фотографирование освещенных плоским световым лучом частиц полистирола выполнялось различными отечественными фотоаппаратами с дополнительным наружным обтюратором, превращающим сплошную траекторию конкретной частицы, соответствующую экспозиции в 1,0–2,0 с, в штрих-пунктирную линию. Такой прием регистрации поля скоростей позволяет получить сведения о скоростях течения одновременно в пределах всей глубины потока и в пределах нескольких глубин по его длине. В ходе обработки фотографий оказывается возможным получить представление как о мгновенных (актуальных), так и об осредненных скоростях течения и в то же время выделить отдельно продольную и вертикальную компоненты (при освещении потока в вертикальной плоскости) и продольную и поперечную компоненты (при освещении потока в горизонтальной плоскости).

Набор последовательных фотографий, отражающих мгновенные состояния поля скоростей, удобно получать с помощью медленно работающего киноаппарата КСР-1М «Конвас» с наружным дополнительным обтюратором.

Выделение в потоке вихревых структурных элементов, составляющих основу русловой макротурбулентности, достигается путем перемещения киноаппарата вдоль лотка со скоростью, близкой к средней скорости потока. Для этого

используется установка, показанная на рис. 2.4. Ферма, на которой установлена тележка продольного перемещения киноаппарата с дополнительным обтюратором, имеет возможность поперечного (ближе—дальше от лотка) перемещения и вертикального перемещения. Ферме придается наклон, равный продольному уклону лотка. На время выполнения киносъемки ферма дополнительно фиксируется специальными тягами для исключения ее колебаний и вибрации во время киносъемки. Но кроме этого для контроля «качественности» очередной киносъемки в лотке в плоскости съемки устанавливалась серия точечных источников света. Эти «светящиеся точки» оставляли на киноплёнке след в виде штрих-пунктирной линии. Если штрих-пунктирная линия была прямолинейной и размер штрих-пунктирных отрезков был одинаков, такой кинокадр признавался качественным. В противном случае кинокадр изымался из последующей обработки.

*В некоторых специальных видах киносъемки требовалась значительно большая, чем стандартная, скорость протяжки пленки.* Это нужно было для детального рассмотрения и усвоения механизма выведения частиц русловых наносов из состояния покоя и последующего их движения в придонной области потока. В этом случае применялась высокоскоростная кинокамера СКС-1М со скоростью съемки до 4000 кадр./с. В выполненных в Русловой лаборатории экспериментах скорость киносъемки составляла 150—300 кадр./с. Просмотр отснятого фильма в нормальном режиме протяжки пленки со скоростью 24 кадр./с позволил установить ряд важных деталей механизма выведения частиц наносов из состояния покоя и последующего их движения. Вместе с тем оказалось возможным измерить продольные и окружные скорости частиц песка в условиях разной кинетичности потока.

*Поверхностные скорости на пространственных моделях* измеряются путем фотографирования поверхностных поплавков с зажженными свечами для придания большего контраста траекториям. Используются отечественные фотоаппараты (в том числе и современные цифровые с нормальной оптикой и дополнительным (внешним) обтюратором).

*Неустановившийся режим потока* (и в частности гидрограф стока) изучается с помощью установленного на 8-метровом лотке программного регулятора расхода жидкости (рис. 2.11) [257].

На программном барабане с помощью стержней набирается сценарий изменения расхода воды. При вращении барабана стержни переводят рычажные толкатели с дискретными питателями либо в рабочую емкость, т. е. в водомерный головной бак, либо в емкость холостого сброса. Синхронно с реализуемой программой записывается на бумажную ленту уровень воды в водомерном баке и далее по кривой расходов воды определяется реализованный неустановившийся режим потока воды. Суммарный расход воды, подаваемой в коллектор — 10 л/с; расход воды в дискретном питателе — 0,333 л/с; число дискретных питателей — 30.

*Рельеф дна в гидравлических лотках и на пространственных моделях* строится по результатам измерения профилей дна лабораторным ультразвуковым профилографом, конструкция которого была разработана инженерами Русло-

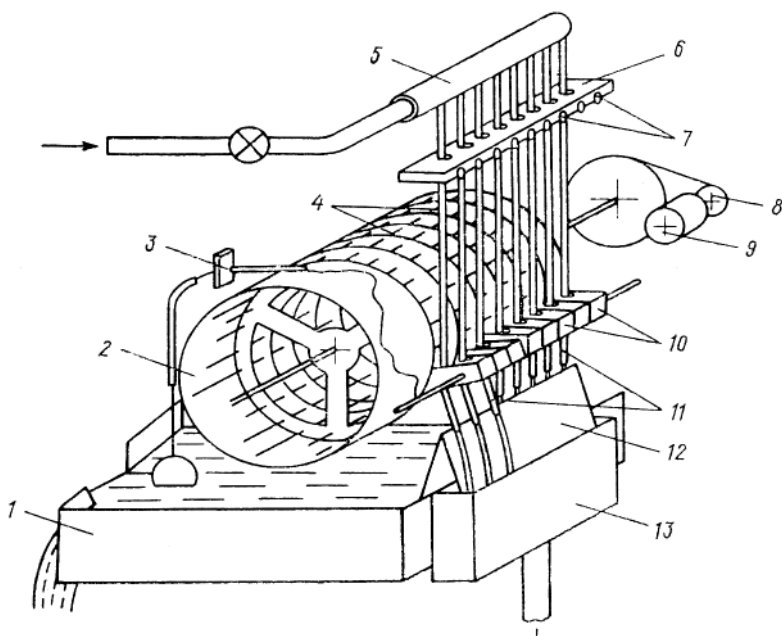


Рис. 2.11. Программный регулятор расхода жидкости:

- 1 – рабочая емкость; 2 – программный барабан; 3 – поплавковый самописец; 4 – стержни; 5 – коллектор; 6 – плата; 7 – регулировочные винты; 8 – редуктор; 9 – электродвигатель; 10 – рычажный толкатель; 11 – дискретные питатели; 12 – разделительная стенка; 13 – емкость холостого сброса

вой лаборатории В.С. Дудукалом и Д.А. Дудукал (рис. 2.12) [82]. Эхолотирование выполняется с координатной установки, включающей основной рельсовый путь для тележки продольного перемещения и тележку поперечного перемещения, на которой устанавливается ультразвуковой профилограф. Координатная установка позволяет с любой детальностью измерить продольные и поперечные профили дна и при необходимости повторить измерения по тем же створам.

Современные лабораторные профилографы снабжены компьютерными программами, обеспечивающими обработку батиграмм в режиме реального времени. В Русловой лаборатории осваивается современный лабораторный эхолот типа «Ultra Lab UWS (230 V)».

*Геометрические и гидравлические характеристики русловых наносов* измеряются с помощью стандартного набора сит типа «Механобр-Вибротехник», позволяющего выделять частицы крупностью от 0,1 мм до 10,0 мм с использованием электронных весов типа «ВБЭ-1 кг», позволяющих оценить фракционный состав исследуемых грунтов. Для описания формы частиц грунта и других деталей их поверхности применяются микроскопы типа «МБС-9», а для измерения гидравлической крупности — стандартные фракциометры.

*Расход русловых наносов* измеряется в гидравлических лотках и на пространственных моделях несколькими способами. Наиболее простой способ — по объему отложившихся наносов за определенный промежуток времени в концевой

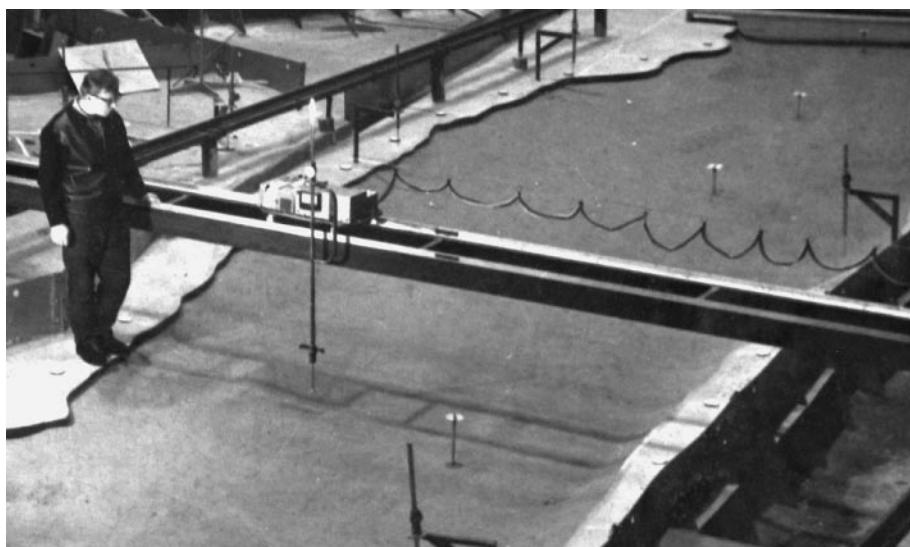


Рис. 2.12. Ультразвуковой профилограф на модели участка р. Волги в нижнем бьефе Куйбышевской ГЭС

приемной емкости наносов. Этот способ, однако, не дает представления о расходах наносов на конкретных участках русла и в конкретные, небольшие промежутки времени.

Устранить отмеченный недостаток можно, рассчитывая расход русловых наносов по геометрическим и динамическим параметрам грядового рельефа дна с использованием формулы:

$$q_T = \alpha h_T C_T,$$

где  $q_T$  — объемный расход русловых наносов на единицу ширины русла,  $h_T$  — высота гряды,  $C_T$  — скорость смещения гряды,  $\alpha$  — коэффициент формы гряды, изменяющийся от 0,5 для гряд треугольного профиля до 1,0 для гряд прямоугольного профиля. При использовании этого приема лаборанту потребуются уровнемер, секундомер и проволочная прямоугольная скоба длиной в половину длины гряды, для отслеживания перемещения гребня на эту длину.

На 8-метровом гидравлическом лотке Русловой лаборатории установлен измерительный комплекс для выполнения непрерывного измерения расхода русловых наносов в течение всего эксперимента [83]. Схема этого комплекса приведена на рис. 2.13. Не раскрывая всех приведенных на рис. 2.13 позиций, отметим только, что сигнал с индуктивного преобразователя расхода донных наносов подается на самописец и изображается на нем в виде линии разной крутизны в зависимости от величины расхода наносов. Таким образом, практически мгновенное отслеживание измерительной системой изменяющегося расхода донных наносов позволяет оценивать его даже на конкретных участках песчаной гряды и в целом позволяет использовать систему в экспериментах как с установившимся, так и с неустановившимся режимом течения и движения наносов.

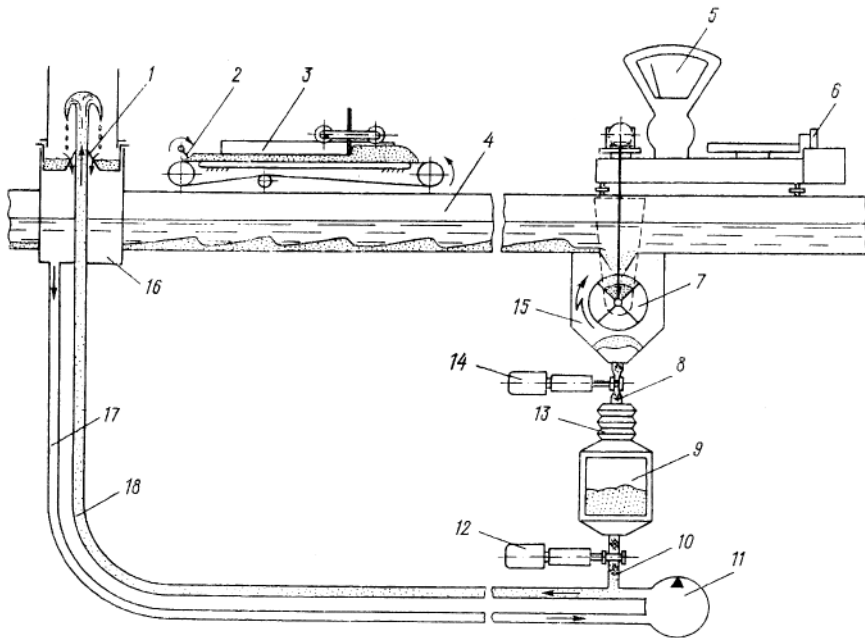


Рис. 2.13. Лабораторная установка с измерителем расхода донных наносов: 1 – ловушка; 2 – сбрасыватель песка; 3 – ленточный дозатор; 4 – лоток; 5 – весы; 6 – индуктивный преобразователь донных наносов; 7 – измерительный барабан; 8 – верхняя эластичная трубка; 9 – шлюзовая камера; 10 – нижняя эластичная трубка; 11 – центробежный насос; 12 – нижнее прижимное устройство; 13 – сифон; 14 – верхнее прижимное устройство; 15 – измерительная емкость; 16 – аккумулирующая емкость; 17 – сливная труба; 18 – напорный трубопровод

В измерительной системе предусмотрена возможность циклической перекачки наносов из шлюзовой камеры в аккумулирующую емкость. При этом весь процесс перемещения наносов из измерительного барабана в аккумулирующую емкость совершается в гидравлически разомкнутом состоянии системы перекачки наносов с гидравлическим лотком [83].

### 2.2.5. Разработки средств измерения и вспомогательного оборудования, выполненные в Русловой лаборатории ГГИ для природных исследований

*Отбор проб грунта из донных отложений* долгое время был проблемой в природных исследованиях русловых процессов. Известные средства отбора проб грунта в озерах и даже в морях (различного типа хrapцы и трубки) плохо срабатывали в условиях речного течения и песчано-гравелистого аллювия, а на больших реках со значительными глубинами и скоростями течения пробы донных наносов и отложений практически не отбирались.

В Русловой лаборатории в начале 1960-х годов была разработана конструкция грунтоотборника, в которой отбор пробы заборным ковшом осуществляется с использованием веса устройства [253]. Первоначально заборный механизм

был размещен в полости 50-килограммового рыбовидного груза. Этот вариант грунтоотборника был опробован на Волге в нижнем бьефе Волгоградской ГЭС при глубинах воды 15–20 м и скоростях течения до 1,5 м/с.

Надежный отбор проб грунта и их герметизация в процессе доставки на судно позволили использовать грунтоотборник одновременно с измерением расходов воды: при опускании устройства на дно в комплекте с гидрометрической вертушкой измеряется глубина на вертикали, обратным поворотом барабана лебедки отбирается и герметизируется проба донных наносов и далее начинается измерение скорости течения последовательным переходом от придонной зоны потока к поверхностной. После вынесения всего комплекта на палубу извлекается отобранная проба грунта.

Первоначальный вариант грунтоотборника был усовершенствован (авторское свидетельство № 261774 1968 г., авторы Ю.Б. Вахрамев, А.Б. Клавен, Н.Я. Соловьев) и в новом варианте был принят в серийное производство для оснащения гидрологических постов Гидрометслужбы под индексом ГР-86.

Используя тот же кинематический принцип заборного ковша, Н.Я. Соловьев разработал штанговый (с пружинным движителем) вариант устройства, который выпускался для оснащения гидрологической сети под индексом ГР-91 [254].

*Экспериментальные исследования русловой макротурбулентности*, выполненные в лабораторных лотках кинематографическим методом регистрации поля мгновенных скоростей, были продолжены в натуральных условиях с использованием трехкомпонентного измерителя актуальной скорости течения, разработанного в Русловой лаборатории [91]. Прибор состоит из гидрофлюгера, имеющего свободу движения в горизонтальной и в вертикальной плоскостях и таким образом отслеживающего истинное направление струи потока, и закрепленной на нем гидрометрической вертушки, вырабатывающей 6 импульсов изменения магнитного поля на 1 оборот лопастного винта.

Лопастной винт вертушки изготовлен из капралона и поэтому обладает малой инерционностью. В связи с этим в совокупности малой инерционности лопастного винта с малым временным и пространственным усреднением отслеживаемого процесса преобразователь скорости, т. е. гидрометрическая вертушка, регистрирует по отношению к масштабам макротурбулентности актуальные значения скорости.

Трехкомпонентный измеритель скорости течения защищен авторским свидетельством № 532818 1976 г., авторы В.С. Дудукал и В.И. Теплов. Преобразование модуля актуальной скорости течения и двух углов направления течения в три компоненты описано ниже, в главе 3.

Трехкомпонентный измеритель скорости течения устанавливается в речном потоке на штанге, которая в свою очередь крепится на специальной платформе [94]. Платформа устанавливается на четырех опорах на измерительной вертикали. В нужную зону потока платформа транспортируется на двух поплавках, которые после установки платформы на опоры выносятся из потока в положение над уровнем воды и, таким образом, не нарушают структуру речного течения в области измерения.



Опыт работы с гидрофлюгером и плавучей платформой свидетельствует о возможности выполнения надежных измерений при глубинах до 2,7 м и скорости течения до 0,74 м/с (см. табл. 3.1 в главе 3). Логично полагать, что с уменьшением глубины воды измерения возможны и при большей скорости течения, равно как при уменьшении средней скорости течения измерения возможны и при больших глубинах.

Серьезным препятствием нормальной работе описанных приборов и в целом гидрометрических вертушек других типов являются взвешенные наносы. Наносы проникают в зазоры между движущимися друг относительно друга деталями приборов, создают дополнительное сопротивление их движению, нарушая тем самым их градуировочный график вплоть до физического отказа.

В Русловой лаборатории был разработан способ и оборудование для надежной защиты гидрометрических вертушек и других приборов влияния взвешенных наносов [93]. Способ заключается в непрерывной подаче чистой (не содержащей твердых частиц) воды в рабочую камеру приборов. Вода некоторым избыточным давлением непрерывно выжимается через имеющиеся зазоры из рабочей камеры приборов во внешнюю среду, препятствуя тем самым проникновению внутрь взвешенных наносов. Эти разработки Русловой лаборатории защищены авторскими свидетельствами № 808938 1979 г., авторы Н.И. Зайцев и А.Б. Клавен, и № 1103152 1983 г., авторы Н.И. Зайцев и А.Б. Клавен.

Недостатком первоначального варианта трехкомпанентного измерителя скорости течения было большое пространственное усреднение (около 450 мм) и значительное (около 400 мм) пространственное несовпадение положения измерителя скорости течения (точнее — лопастного винта вертушки) и направляющих плоскостей гидрофлюгера. Этот недостаток был существенно уменьшен в новом варианте прибора, разработанном Н.М. Зайцевым и А.Б. Клавеном (авторское свидетельство № 1638630 1988 г.).

В новом варианте прибора измеритель скорости течения (вертушка) и хвостовое оперение гидрофлюгера с датчиками горизонтального и вертикального углов вынесены на горизонтальном штоке перед несущей штангой прибора. Пространственное усреднение в продольном направлении уменьшилось с 450 мм до 225 мм, а в поперечном направлении — с 180 мм до 150 мм; пространственное несовпадение лопастного винта вертушки и оперения гидрофлюгера уменьшилось с 400 мм до 120 мм. Существенно уменьшилась вероятность оседания речного сора на подвижных элементах прибора, и полностью исключено влияние несущей штанги на показания гидрофлюгера.

### **2.3. Валдайская русловая станция на р. Полонети**

Русловая станция на р. Полонети была организована в начале 1950-х годов. На этой реке наряду с наблюдениями за стоком воды предполагалось начать систематические исследования руслового процесса с тем, чтобы на основе надежных натурных материалов проверить, уточнить и развивать основные

положения гидролого-морфологической теории, сформулированные в эти же годы Н.Е. Кондратьевым и И.В. Поповым.

Выбор именно этой реки для систематических наблюдений за гидравлическим режимом, транспортом наносов и переформированием ее русла был продиктован следующими обстоятельствами.

Малые размеры реки и в связи с этим относительно малая продолжительность циклов русловых деформаций на разных структурных уровнях руслового процесса.

Возможность, благодаря малым размерам реки, организовать детальные наблюдения за формами транспорта речных наносов на всех структурных уровнях проявления руслового процесса и в разных пространственно-временных масштабах структуры речного потока.

Возможность, благодаря опять же малым размерам реки, осуществлять измерения ряда характеристик потока и русла практически с лабораторной точностью.

Возможность, благодаря сравнительно небольшим размерам площади водосбора, отслеживать влияние разных видов хозяйственной деятельности на гидрологический режим реки и оценить последствия этих мероприятий.

Относительная близость выбранного для наблюдений участка реки от центральной усадьбы Валдайского филиала (ВФ) ГГИ и относительно густая и качественная сеть автомобильных дорог вдоль самой Поломети и вдоль основных ее притоков.

### **2.3.1. Краткая гидрологическая характеристика р. Поломети**

Река Полометь вытекает из оз. Русского и является правым притоком р. Полы, впадающей в оз. Ильмень (рис. 2.14). Площадь водосбора до створа Лычково составляет 2200 км<sup>2</sup>. Длина всей реки 149 км, а ее участка «исток — Лычково» 111,6 км. Общее падение в пределах этого участка составляет 149,3 м (рис. 2.15). Наблюдается резкий перепад продольного профиля на участке между д. Дворец и с. Яжелбицы, составляющий около 86 м.

Продольный профиль долины Поломети в целом имеет четко выраженный ступенчатый характер (рис. 2.15). В соответствии с ним изменяется и ширина долины (на рис. 2.14 обозначена штриховыми линиями вдоль русла реки): там, где уклон невелик, ширина долины относительно больше, там, где уклон большой, ширина долины незначительна. На участке Дворец—Яжелбицы долина наиболее узкая, местами каньонообразная (около 100 м при высоте коренных склонов 20–25 м). Ниже д. Ракушино долина Поломети расширяется до нескольких километров [53].

Бассейн Поломети находится в пределах Валдайской возвышенности, рельеф и геологическое строение которой имеют ледниковое происхождение. Поверхность водосбора сложена четвертичными отложениями, мощность которых достигает 75 м. Они представлены моренными глинами и суглинками мощностью 8–20 м, перекрытыми флювиогляциальными песками, толщина которых достигает 24 м, и современными аллювиально-озерными и болотными

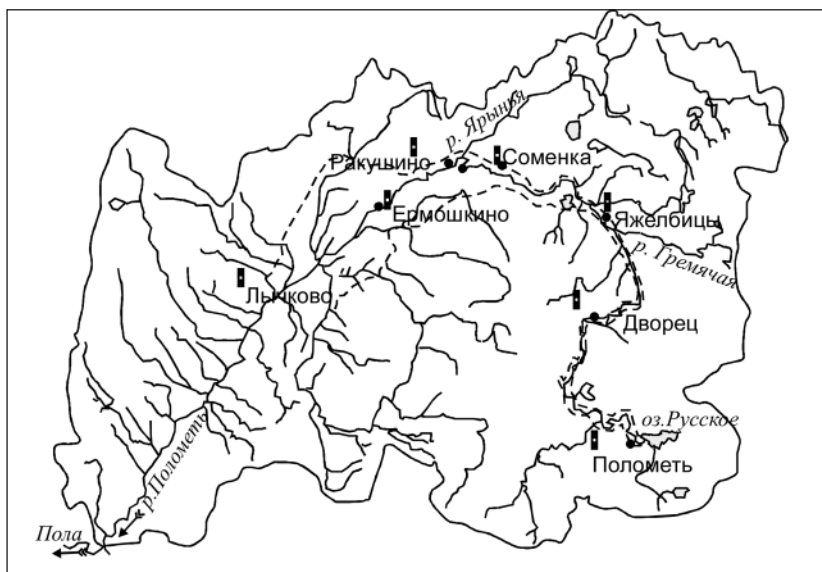


Рис. 2.14. Схема водосбора р. Полометы

образованиями мощностью до 6 м. Почвы на водосборе представлены подзолистыми и слабоподзолистыми разновидностями.

В пределах водосбора преобладают смешанные леса. В верхней части водосбора, до с. Яжелбицы, леса занимают около 80 % площади, пашни — 14 %, болота — 3 %, озера — 3 %. Ниже Яжелбиц преобладающими становятся пашни и кустарник, а лес встречается отдельными массивами. Дно речной долины занимают луга, сильно заросшие кустарником, местами заболоченные.

Климатические условия водосбора Полометы в целом благоприятны для формирования повышенного стока наносов. В пределах возвышенной части водосбора выпадает, в среднем, 830 мм осадков в год. Водный режим реки

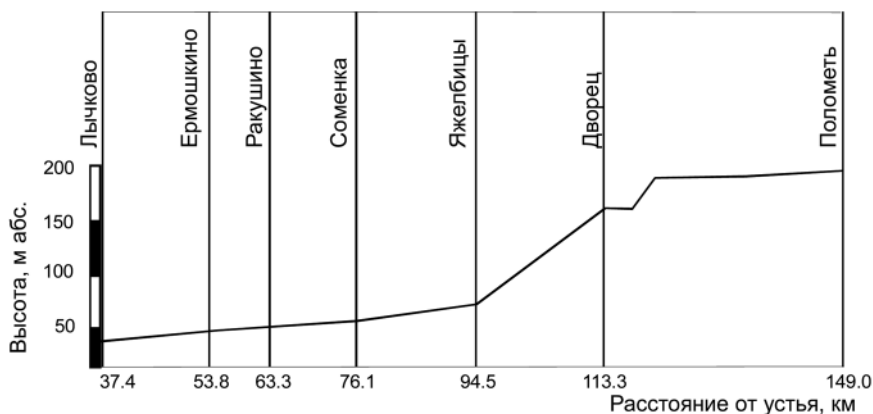


Рис. 2.15. Продольный профиль долины р. Полометы

характеризуется значительной изменчивостью внутригодового стока, в то время как изменения годового стока сравнительно небольшие: коэффициент вариации  $C_v$  колеблется от 0,37 до 0,30, постепенно уменьшаясь от верхних створов к нижним. У с. Яжелбицы в течение года расходы воды могут изменяться от 116 м<sup>3</sup>/с в половодье до 1,0 м<sup>3</sup>/с в межень. Некоторые характеристики стока воды и наносов на разных участках Поломети приведены в табл. 2.1 [53].

Таблица 2.1. Гидрологические характеристики р. Поломети

Пункт	Расстояние от устья, км	Высота над уровнем моря, м абс.	Площадь водосбора, км <sup>2</sup>	Период наблюдений, годы	Средние годовые	
					Расход воды, м <sup>3</sup> /с	Расход наносов, кг/с
Полометь	149,0	189,0	138	1956–1967	1,3	—
Дворец	113,3	154,34	454	с 1947	4,4	0,115
Яжелбицы	94,5	68,76	631	с 1952	6,9	1,95
Соменка	76,1	56,99	789	1960–1991	7,6	1,09
Ракушино	63,3	50,12	1191	1960–1970; 1985; 1990	10,2	1,10
Ермошкино	53,8	46,36	1211	с 1960	11,9	1,45
Лычково	37,4	39,70	2200	с 1962	20,6	0,28

В многолетнем ряду максимальных расходов воды по водомерному посту Яжелбицы выделяются два периода: период наибольших максимальных расходов воды (до 1969 г.) и период с несколько меньшими максимальными расходами воды после 1970 г. (с 1970 г. по 1999 г.).

Внутригодовое распределение стока воды характеризуется наличием хорошо выраженного весеннего половодья и дождевыми паводками в период летне-осенней межени. Половодья и паводки имеют крутую ветвь подъема и значительно более растянутую ветвь спада. Продолжительность половодья составляет в среднем 40 суток, а летне-осенних дождевых паводков 1–2 недели.

### 2.3.2. Экспериментальные участки для наблюдения за различными типами руслового процесса

На 111-километровом участке реки между водомерными постами Дворец и Лычково были выделены 4 участка для наблюдения за структурой речного потока и деформациями русла в разных внешних условиях природной среды.

Верхний участок протяженностью около 5 км — это река горного типа, протекающая в узкой каньонообразной долине шириной 100–200 м и высотой коренных склонов до 25 м (рис. 2.16). Русло формируется здесь горным потоком с уклонами 5–14 ‰ преимущественно в галечно-валунных грунтах моренного происхождения.



Рис. 2.16. Горный участок р. Полонети (вид против течения)

Второй участок (основной экспериментальный участок) расположен у с. Яжелбицы. Здесь находится опорный водомерный пост, на котором систематически ведутся наблюдения за уровнем и температурой воды, измеряются расходы воды и взвешенных наносов, выполняются исследования по специальным программам структуры поля осредненных скоростей и вторичных течений, структуры макротурбулентности речного потока, структуры донных отложений в разные фазы гидрологического цикла, измеряются геометрические и динамические характеристики микроформ руслового рельефа и отслеживается морфодинамика микроформ в многолетнем разрезе. Общий вид второго экспериментального участка в районе водомерного поста приведен на рис. 2.17. На этом же участке ниже по течению створа водомерного поста выполнялись и продолжают в настоящее время наблюдения за побочным и осередковым типами руслового процесса.

Третий экспериментальный участок расположен между водомерными постами Соменка и Ермошкино. В его пределах русло формируется преимущественно по типу свободного меандрирования (рис. 2.18). Вместе с тем здесь

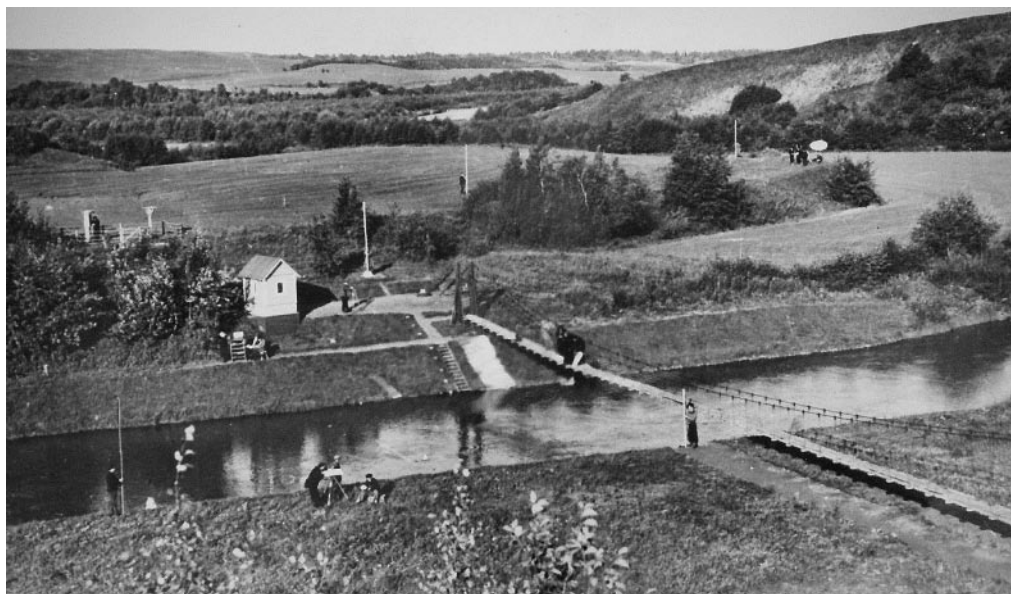


Рис. 2.17. Основной экспериментальный участок в районе Яжелбицкого водомерного поста, 1950-е годы (течение слева направо)

по ряду причин, о которых будет сказано ниже, на отдельных отрезках реки развиваются незавершенное меандрирование и побочневый типы руслового процесса. Река здесь протекает в широкой (до нескольких километров) и плоской долине, уклоны речного потока изменяются в пределах 0,5–0,6 %. Русло формируется в песчано-гравийных отложениях, сопрягающихся на отдельных участках с линзами глин и суглинков.

Четвертый экспериментальный участок расположен вниз по течению от водомерного поста Ермошкино. Его протяженность около 10 км. Здесь выполняются наблюдения за переформированиями русла и поймы и за изменениями экосистемы в условиях развития неравновесного процесса, вызванного полным перекрытием русла древесным заломом и аккумуляцией речных наносов. Общий вид этого участка в зоне спрямляющего канала приведен на рис. 2.19. Ниже будет описана история создания спрямляющего канала, образования и развития неравновесного процесса в его пределах и приведены изменения характеристик гидрологического режима на этом участке реки. Здесь же отметим только, что неравновесное состояние участков речных русел, и Поломети в их числе, — это типичное явление для рек страны в целом, явление, которое должно обязательно отслеживаться, анализироваться и учитываться при разработке прогнозов русловых процессов в связи с необходимостью организации и ведения мониторинга развития речных русел для обеспечения нормального функционирования некоторых объектов экономики на реках и безопасного для природной среды выполнения различных водохозяйственных мероприятий. Динамика неравновесных процессов руслоформирования отслеживается также на притоках Поломети, реках Сосенке и Гремячей.



Рис. 2.18. Излучина р. Полонети на участке свободного меандрирования (вид по течению)



Рис. 2.19. Спрямяющий канал на Лычковском пойменном массиве (вид по течению)

### **2.3.3. Экспериментальная передвижная эстакада на участке детальных наблюдений у с. Яжелбицы**

Основной экспериментальный участок детальных наблюдений был оснащен в 1960-х годах эстакадой, которая могла перемещаться по рельсам вдоль реки на участке длиной 110 м. Эстакада была оснащена тележкой поперечного перемещения и механизмом вертикального перемещения измерительной платформы. Таким образом, измерения любых характеристик речного потока и русла выполнялись с помощью этой эстакады практически с лабораторной точностью. Особую определенность приобретали повторные измерения в фиксированных точках потока или русла.

Однако первоначальный вариант эстакады содержал ряд существенных недостатков. Однорядный рельсовый путь по каждому берегу не был достаточно устойчивым, а база тележек продольного перемещения оказалась слишком малой. По этой причине часто возникал перекося основной фермы, приводивший к разрушению реборт у чугунных колес и прекращению эксперимента на длительное время. Вместе с тем расположение персонала, приборов и оборудования на тележке поперечного перемещения, не имеющей никакой защиты от внешней среды, приводило к большим неудобствам в работе (дождь, снег, ветер, низкая температура) и было сопряжено даже с риском для здоровья, поскольку нижняя площадка тележки поперечного перемещения располагалась ниже поперечных неподвижных элементов в конструкции основной фермы.

В новом конструктивном исполнении эстакада перемещалась вдоль реки по двухрядному рельсовому пути на каждом берегу. Рельсы были закреплены в железобетонных шпалах, уложенных на щебеночном основании. Была значительно увеличена база тележек продольного перемещения. Благодаря этим изменениям были полностью исключены перекося основной фермы эстакады. На обращенной против течения грани несущей фермы, на консолях был устроен закрытый остекленный павильон, в котором были размещены пульт управления движением эстакады и используемые в экспериментах приборы и оборудование. В павильоне поддерживалась вполне приемлемая для работы температура воздуха. Общий вид реконструированной передвижной эстакады приведен на рис. 2.20.

Эстакада в новом конструктивном исполнении оказалась очень удобным и надежным оборудованием для выполнения почти всех видов гидрологических измерений в любых погодных условиях и в любое время суток, даже ночью. К примеру, измерение донно-грядового рельефа выполнялось эхолотированием дна по продольным створам сразу пятью эхолотами, излучатели которых были размещены вдоль основной фермы эстакады (т. е. поперек реки) с шагом между ними 5 м. После прогона эстакады против течения на 100-метровом участке русла балка с излучателями смещалась поперек реки на половину шага между ними, и эхолотирование дна продолжалось. Таким образом, за сравнительно небольшое время измерялось 10 продольных профилей дна, перекрывавших всю ширину русла на уровне его дна с расстоянием между ними 2,5 м.





Рис. 2.20. Передвижная эстакада после реконструкции

Через некоторое (заранее определенное) время эхолотирование дна по всем 10 продольникам повторялось для вычисления скорости перемещения донных гряд.

С эстакады отбирались пробы донных отложений в одних и тех же точках дна на подъеме, пике и спаде половодья, а также в период межени. Расстояние между поперечными створами отбора проб в целом на 100-метровом участке составляло 10 м, а в центральной зоне экспериментального участка — 1 м; расстояние между точками отбора проб на поперечниках составляло 1 м. Таким образом, в каждой серии измерений отбирались сотни проб донных отложений и выполнялся их гранулометрический анализ для оценки динамики состава русловых наносов и репрезентативности отдельных (единичных) проб в ходе половодья.

С эстакады выполнялись измерения макротурбулентности речного потока с последующей оценкой ее изменения в пределах поперечного сечения реки [154, 247].

## Глава 3

# КИНЕМАТИЧЕСКАЯ СТРУКТУРА РУСЛОВЫХ ПОТОКОВ

### Введение

Экспериментальные исследования кинематической структуры русловых потоков были начаты в Русловой лаборатории Отдела русловых процессов ГГИ и на р. Поломети в 50-х годах прошедшего столетия, по существу сразу же, как только были сформулированы основные положения гидролого-морфологической теории руслового процесса. Насущная надобность в этих исследованиях диктовалась следующими обстоятельствами.

Из определения руслового процесса, данного в гидролого-морфологической теории, следует, что текущая вода (т. е. речной поток) является той единственной активной средой, под действием которой осуществляются транспорт наносов и морфологические изменения русла и поймы реки. Это значит, что достаточно полное и глубокое представление о русловом процессе не может быть составлено без изучения тех свойств речного потока, которые оказываются определяющими в механизме взаимодействия его с руслом.

Собственно русловой поток изначально (т. е. еще в ходе обоснования необходимости строительства Русловой лаборатории) был определен одним из основных объектов экспериментальных исследований как в методическом плане (например, для целей гидрометрии), так и в плане углубления представлений о его турбулентной сущности.

Сведения о кинематической структуре русловых потоков нужны были для дальнейшего усовершенствования методики гидравлического моделирования их на жестких моделях и особенно в ходе разработки методики моделирования русловых процессов на деформируемых моделях. Весьма обширная специфичность задач, решаемых методами гидравлического моделирования, предопределяет необходимость изучения структуры поля скоростей руслового потока на разных структурных уровнях его дискретной организации.

Методическая основа начатых в ГГИ экспериментальных исследований кинематической структуры русловых потоков сформировалась в результате анализа данных, уже полученных экспериментаторами к тому времени, и с учетом уже выполненных теоретических обобщений и гипотетических подходов, с краткой характеристики которых мы и начинаем эту главу.

### 3.1. Современные представления о кинематической структуре русловых потоков

#### 3.1.1. Общеконцептуальные подходы к проблеме турбулентности

Переход от ламинарного режима движения потока к турбулентному сопровождается появлением нового свойства — молярного (наряду с молекулярным) обмена в области движения.

Это новое свойство турбулентного потока приводит, в частности, к таким двум следствиям. С одной стороны, оно порождает ряд других новых и важных свойств потока: постоянно совершающиеся изменения скорости (по величине и направлению) и других характеристик движения во времени и пространстве, новую структуру и соответствующий ей характер распределения скорости течения по глубине, иной закон гидравлического сопротивления. С другой стороны, молярный обмен сильно усложняет общую картину течения, восприятие которого ассоциируется прежде всего с хаосом.

Первое обстоятельство привело к тому, что в настоящее время понятие «турбулентность речных потоков» трактуется довольно широко. Здесь оно ограничено рассмотрением лишь кинематической структуры русловой турбулентности, т. е. рассмотрением свойств образующихся в речных потоках локальных объемов жидкости, которые обычно называют турбулентными вихрями и которые ответственны за все прочие новые свойства речных потоков как турбулентных (в отличие от ламинарных).

Второе обстоятельство (хаотический характер движения перемешивающихся масс воды) предопределило отнесение турбулентного потока, как природного явления, к категории случайных процессов с соответственным приложением к изучению таких процессов методов теории вероятности и математической статистики с последующим оформлением на этой основе статистической теории турбулентности.

Статистическая теория турбулентности изучает актуальные скорости и актуальное давление, но представляет эти величины (как это было предложено О. Рейнольдсом [423]) в виде осредненных значений и пульсационных отклонений. Таким образом, исследование и описание структуры турбулентности в статистической теории осуществляется через пульсационные скорости и пульсационное давление.

В наиболее полном объеме статистическая теория турбулентности изложена в монографиях А.А. Таунсенда [260], И.О. Хинце [280], А.С. Мониной и А.М. Яглома [191, 192]; применительно к русловым потокам и в более компактном виде основы статистической теории турбулентности приведены в монографиях Е.М. Минского [185], М.А. Великанова [43], К.В. Гришанина [71], Д.И. Гринвальда и В.И. Никоры [69]; применительно к гидросооружениям — в монографии В.М. Лятхера [171].

Основным средством анализа в статистической теории турбулентности являются временные, пространственные и пространственно-временные корреляционные функции, позволяющие судить о степени статистической связанности пульсационных движений. С помощью корреляционных функций образуют интегральные масштабы времени и протяженности пульсационных движений.

Корреляционные функции и интегральные масштабы могут рассматриваться в эйлеровом и лагранжевом вариантах. В первом случае изучаемая область потока фиксирована в пространстве, во втором — она перемещается по заранее неизвестной траектории.

По параметрам корреляционных функций и интегральным масштабам судят о периодах и размерах локальных объемов жидкости, перемещение которых

в потоке как раз и вызывает пульсации скорости и других характеристик движения. Однако экспериментальные данные, полученные на разных водных объектах и обработанные таким способом, приводят к заметно различным результатам, что может восприниматься как следствие известной формальности самого способа и, возможно, влияния на результат особенностей водного объекта и средства измерения.

Наряду с корреляционными функциями и интегральными масштабами статистическая теория турбулентности широко использует спектральные функции, выражающие плотность распределения энергии турбулентности по частотам пульсаций.

Анализ энергетических спектров пульсаций скорости послужил основой для формирования современных представлений об энергетическом механизме турбулентности. Как отмечает Гришанин [71], первоначально эти представления были сформулированы в качественном виде Л. Ричардсоном, а затем получили глубокое физическое развитие и математическое оформление в работах А.Н. Колмогорова [126] и А.М. Обухова [203]. Существо энергетического механизма турбулентности заключается в передаче энергии от движений более крупного масштаба (и соответственно меньшей частоты) движениям другого, меньшего масштаба (и соответственно большей частоты). Великанов этот каскадный процесс характеризует следующими словами: «Еще Рейнольдсом было установлено, что количество энергии, передаваемое осредненным движением пульсационному при стационарном движении, в среднем равно количеству энергии, передаваемому пульсационным движением тепловому; или, короче говоря, создаваемая потоком за известный период времени пульсационная энергия при стационарном процессе за тот же период полностью диссипируется.

Современная спектральная теория турбулентности уточняет это положение в том смысле, что энергия осредненного движения передается сначала пульсациям низких частот, а от них переходит к все более и более высоким частотам, пока последние не достигнут того предела, обусловленного вязкостью жидкости, когда размеры вихрей слишком малы, чтобы путем инерции порождать еще меньшие вихри, и их энергия уже непосредственно переходит в тепло» [43, с. 103].

В этих словах, как нам кажется, заключено главное в механизме турбулентности в целом и особенно существенное в приложении к русловой турбулентности, а именно — с учетом энергетической составляющей турбулентных движений процессы формирования русла совершаются под воздействием низкочастотной части спектра. Но вместе с тем в этих словах содержится некоторая неточность, к обсуждению которой мы вернемся ниже в этой главе.

В соответствии с особенностями разных частей спектра, в нем выделяются три интервала: интервал низких частот (отбор энергии от осредненного движения), интервал средних частот (передача энергии от малых к большим частотам), интервал высоких частот (рассеяние механической энергии в тепло).

Работы Рейнольдса оказали существенное влияние на последующий ход изучения турбулентного движения. Выполнены сотни исследований, направленных как на раскрытие существа явления турбулентности, так и на ее описание и учет при решении практических задач. В 20-х годах прошлого века, бла-

годаря работам Д. Тейлора, Л. Прандтля, В. Шмидта, Т. Кармана, появились так называемые полуэмпирические теории турбулентности, в основу которых заложены различные гипотезы замыкания уравнений. Полуэмпирические теории турбулентности, обогащаемые новыми предложениями, продолжают развиваться и в настоящее время. В их числе наиболее распространенной является так называемая «В-модель», содержащая два уравнения переноса: для энергии турбулентности «В» и для скорости диссипации энергии «ε». В работах У. Фроста и Т. Моулдена [278], Дж. Ламли и Г.А. Пановского [161], В. Роди [429] предлагаются различные модификации этой модели.

В исследованиях природы турбулентности и ее структуры предпринимаются разные подходы: с использованием моментов связи гидродинамических полей (Л.В. Келлер, А.А. Фридман [377]), принципов локальной изотропии и каскадного механизма передачи энергии турбулентности (Колмогоров [126], Обухов [203]), гипотезы странных аттракторов (Д. Рюэль, Ф. Такенс [434]), понятия фракталей (Б. Мандельброт [177]), с предложением отдельного рассмотрения проекций векторов скорости на каждую координатную ось — с положительным и отрицательным знаком (Г.А. Гачичеладзе [55]).

Несмотря на различие подходов и применяемых к исследованию средств, в целом постепенно формируется представление о доминирующей роли в «структурном портрете» турбулентности крупномасштабной части ее спектра, о существенности детерминистического начала в ее генезисе и об относительной ее упорядоченности.

Применительно к речным потокам (как отмечено выше) наибольший интерес представляет именно низкочастотный интервал спектра, который, будучи наиболее энергетически значимым, ответственен, как принято считать, и за перемещение русловых наносов в целом, и за собственно формы транспорта этих наносов.

### **3.1.2. Экспериментальные исследования русловой турбулентности**

Экспериментальные исследования русловой турбулентности осуществлялись в двух методических вариантах: методом точечных измерений (натурные и лабораторные гидрометрические вертушки, электротермоанемометры, термогидрометры, а также другие датчики измерения скорости потока в точке) и методом визуализации течения одновременно в некоторой области потока путем введения в него или на его поверхность каких-либо частиц с близкой к нулю гидравлической крупностью и последующего либо визуального наблюдения за их движением, либо регистрации их движения фото-киноаппаратурой (в современных условиях весьма удобно для этих целей использовать видеосъемочную аппаратуру).

Данные измерений подвергались статистической обработке, в результате которой разные исследователи получали тот или иной набор характеристик, а в полном варианте — включавший распределение по глубине осредненных во времени значений скорости, распределение по глубине интенсивности турбулентности (обычно продольной, но иногда двух и даже всех трех компонент),

изменение коэффициентов корреляции при временном или пространственном сдвиге, масштабы турбулентности и частотно-энергетические спектры. Анализ распределения интенсивности турбулентности в поперечном потоке направления (в частности по экспериментам П.С. Клебанова [381], С. Корсина и А.Л. Кистлера [328], Ж. Лауфера [393], Х. Рейхардта [425], Е.М. Минского [185], Б.А. Фидмана [273, 275]) позволил уже к 50–60-ым годам прошлого века сформулировать следующие общие выводы.

Интенсивность турбулентности всех трех компонент пульсационной скорости имеет максимум вблизи дна или стенки и минимум на оси трубы или на поверхности потока. В пристенной и придонной области потока наибольшие значения интенсивности турбулентности присущи продольной компоненте, наименьшие — вертикальной, и промежуточные — поперечной, что дает основание судить об анизотропности структуры турбулентности в этой области движения. На оси трубы или в приповерхностных слоях открытого потока все три компоненты пульсационной скорости имеют близкие значения интенсивности турбулентности, что позволяет считать структуру турбулентности в этой области движения близкой к изотропной. В ряде опытов (опыты Рейхардта, Лауфера, Фидмана) толщина вязкого подслоя оказалась значительной, и выполненные в его пределах измерения (несколько точек) обнаружили резкое уменьшение всех трех компонент пульсационной скорости вплоть до нулевых значений на твердой границе.

Рассматривая движение потока в придонной (пристеночной) области, уместно особо остановиться на опытах И.К. Никитина [199]. Выполнив крупномасштабную фотосъемку специально обработанных мельчайших частиц алюминиевой пудры, освещаемых высокоинтенсивными импульсными лампами-вспышками, он получил сведения о скорости течения в слоях потока толщиной 0,2 мм и таким образом детально осветил измерениями область потока в непосредственной близости от дна. Эксперименты выполнялись в разных лотках с глубинами от 4 до 35 см. Условия на граничной поверхности включали гладкое дно, дно с наклеенной шероховатостью и дно с подвижной шероховатостью, представленной частицами песка разной крупности. Режимы течения изменялись от гидравлически гладкого до области квадратичного сопротивления. Результаты экспериментов представлены эпюрами распределения по глубине осредненных значений продольной компоненты скорости, среднеквадратичных отклонений продольной, вертикальной и поперечной компонент скорости, момента корреляции  $\overline{u'v'}$  и момента корреляции  $\overline{u'w'}$ .

На рис. 3.1 приведен фрагмент иллюстрации результатов, полученных Никитиным [199]. Измерения выполнялись в осевой плоскости лотка шириной 5 см при глубине 2,3 см; дно лотка оклеено щебнем со средним размером частиц 0,6 см, боковые стенки гладкие.

Анализируя обширный материал, подобный представленному на рис. 3.1, Никитин предложил двухслойную модель кинематической структуры потока, основными чертами которой является следующее. Русловой поток представляется состоящим из турбулентного ядра, в котором изменение осредненных продольных скоростей по глубине подчиняется логарифмическому закону,

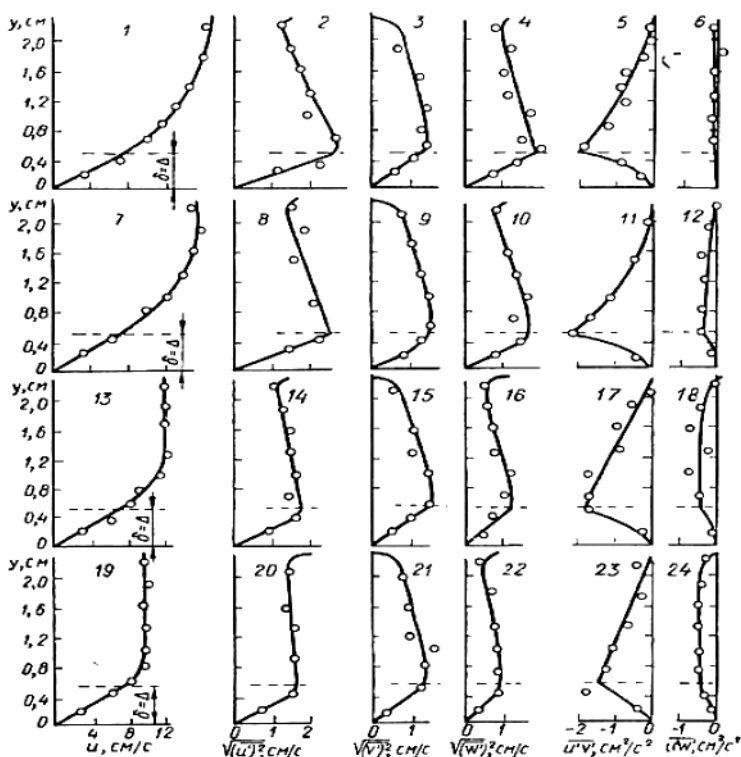


Рис. 3.1. Пространственная структура течения в лотке с шероховатым дном в режиме полного проявления шероховатости: 1–6 – движение в осевой плоскости, расположенной на расстоянии 0,5 В от боковой стенки; 7–12 – движение в плоскости, отстоящей на 0,3 В от стенки; 13–18 – движение в плоскости, отстоящей на 0,2 В от стенки; 19–24 – движение в плоскости, отстоящей на 0,1 В от стенки

и пристенного или придонного слоя, в котором наблюдается линейный закон изменения осредненных значений продольной скорости по глубине. Точка перехода линейного закона в логарифмику обозначает верхнюю границу придонного слоя, другим признаком которого является максимум среднеквадратичных значений продольной компоненты пульсационной скорости и максимум в значениях момента корреляции. Течение в самом придонном слое на всех режимах характеризуется наличием пульсаций скорости, которые являются, по мнению Никитина, следствием вихреобразований за выступами шероховатости и проникновением в этот слой пульсаций из турбулентного ядра потока. С приближением к твердой границе значения всех приведенных характеристик быстро уменьшаются и экстраполируются к нулевым значениям на самой твердой границе.

Ниже мы вернемся к обсуждению некоторых результатов, полученных Никитиным, здесь же отметим лишь, что весьма тщательно и в широком диапазоне граничных условий показано, что всегда формирующийся в русловых потоках придонный слой, обладающий некоторыми специфическими свойствами, вместе с тем в энергетическом смысле не является существенной частью руслового

потока, а скорее испытывает на себе влияние флуктуирующей энергетики турбулентного ядра.

Значительно скромнее в экспериментальных исследованиях турбулентности русловых потоков представлены сведения о статистических пространственных масштабах турбулентности. Согласно опытным данным Минского [185], максимальное значение относительного продольного масштаба турбулентности  $L(uu)_x/H$  при  $\frac{y}{H} = 0,42$  составляет всего 0,41, уменьшаясь ко дну и к поверхности соответственно до 0,14 и 0,26, а поперечные масштабы  $L(uu)_y$  и  $L(vv)_y$  для этих же условий движения при  $\frac{y}{H} = 0,48$  составили в максимальных значениях соответственно 0,118 H и 0,167 H. От этих максимумов значения поперечных масштабов убывают до нуля на дне и на поверхности потока.

Приведенные данные свидетельствуют о весьма небольших величинах пространственных масштабов турбулентности. К такому же выводу приводят и данные об изменении коэффициентов корреляции  $R_r(u)$  (измерения М. Фавра в воздушном потоке, приведенные в монографии Великанова [43], измерения Н.Н. Федорова, выполненные гидрометрической вертушкой на р. Тверце [272], измерения В.П. и М.А. Петровых, выполненные турбулиметром на р. Кубани [211], измерения Гринвальда, выполненные специальной микровертушкой на р. Турунчук [69]).

Вместе с тем измерения частотного спектра в аэродинамической трубе (измерения Х. Мотцфельда [407]) и средней частоты пульсаций скорости открытого потока в лотке (измерения Минского [185]) обнаружили постоянство частотного спектра по сечению трубы и неизменность средней частоты продольных и вертикальных пульсаций по всей глубине потока в лотке.

Великанов, измеряя частоту пульсаций при разной средней скорости в лотке, установил, что она возрастает пропорционально средней скорости потока.

Все эти факты косвенно свидетельствуют о том, что в потоке существуют структурные элементы (индивидуальные объемы жидкости), размеры которых существенно больше статистических масштабов турбулентности и даже близки к глубине открытого потока или половине сечения трубы, что размеры этих структурных элементов не зависят от скорости потока, а определяются в основном его размерами, и что в энергетическом отношении наиболее значимыми (одна мода в области низких частот на графике Мотцфельда) оказываются элементы низкой частоты, т. е. большого размера.

Дальнейшее углубление представлений о структурном образе крупномасштабной русловой турбулентности не могло успешно осуществляться с использованием описанных методических приемов. В свое время, размышляя по этому поводу и характеризуя возможности термоэлектроанемометра в исследованиях структуры русловой турбулентности, Великанов писал: «...измеряемый им процесс пульсации скорости в точке не дает нам представления о структуре какой-либо области потока: последнюю мы могли бы изучать только методами следящей кино- и фотосъемки. А измеряя пульсацию скоростей даже одновременно двумя измерителями в двух неподвижных точках потока, мы всегда лишь “вы-



хватываем” из общего процесса прохождения в потоке турбулентных возмущений какие-то случайные их “кусочки”» [43, с. 100]. И здесь же, несколько выше, обсуждая возможные методические подходы к экспериментальному изучению русловой турбулентности, он отмечает: «Трудности здесь очень велики, и их преодоление мыслится нами лишь на пути усовершенствования высокочастотной следящей кинематографии, с повышением техники визуализации потока и щелевого просвечивания».

Мнение Великанова о существовании явления турбулентности и подходах к его изучению не оказалось исключительным. Четверть века спустя в обширной обзорной статье Б.Дж. Кантуэлл отмечает: «Исследование вихревых структур большого масштаба с помощью эйлера пространственно-корреляционного тензора, основанное на стохастической картине случайных масштабов “турбулентной жидкости”, обладает целым рядом недостатков». И далее: «Коротко говоря, этот метод не дает никакой информации о совокупности движущихся больших вихрей, заполняющих все поле течения. В начале 60-х годов были проведены эксперименты, которые начали менять отмеченный подход к проблеме турбулентности. Исследования последних 20 лет в области турбулентности привели к растущему осознанию того, что процессы переноса в большинстве турбулентных сдвиговых течений определяются крупномасштабными вихревыми движениями, которые не являются случайными. Форма, интенсивность и масштаб таких организованных движений меняются от течения к течению, и аналогичным образом должны меняться методы их определения» [106, с. 13–14].

Именно в таком методологическом ключе, используя рекомендуемые Великановым методические приемы, в ГГИ были начаты в 60-х годах и продолжены в 70-х годах XX века экспериментальные исследования структуры русловой турбулентности. Но прежде чем перейти к их обсуждению, назовем здесь предшественников, применивших прежде нас эти эффективные методы.

То что путем визуализации течения можно непосредственно наблюдать крупномасштабные структурные элементы турбулентности, продемонстрировал еще Леонардо да Винчи. Он наблюдал траектории вводимых в поток частиц в случаях его резкого расширения, разветвления или обтекания им тел разной формы. Выполненные им зарисовки визуализированного транзитного течения и водоворотных фрагментов в зонах отрыва потока исключительно четко передают основные особенности крупномасштабной структуры.

Это, по существу, были первые попытки применения метода физического эксперимента к исследованию движения жидкости, и, как замечает Великанов, они, к сожалению, «...не нашли отражения в гидродинамических исследованиях последующих столетий» [44, с. 38].

Только через несколько веков, в 20-х годах XX века метод визуализации течения руслового потока был применен Л. Прандтлем и И.И. Никурадзе [263]. Визуализированная легкими плавающими частицами поверхность потока фотографировалась аппаратом, перемещавшимся вдоль канала на тележке со скоростью, близкой к скорости пристенных слоев потока, и со скоростью, близкой к скорости потока в центральной зоне канала (рис. 3.2). На рис. 3.2 хорошо видно, как путем исключения из процесса движения местной переносной скорости

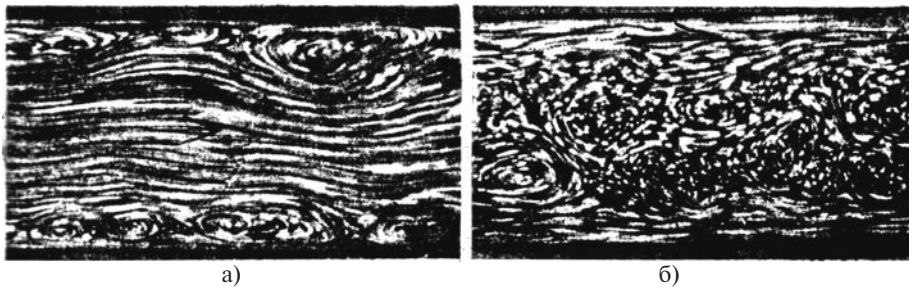


Рис. 3.2. Скользящая фотосъемка поверхности потока: слева – скорость фотокамеры близка к скорости пристенных слоев потока; справа – скорость фотокамеры близка к скорости средней части потока (снимки Прандтля – Никурадзе, течение слева направо)

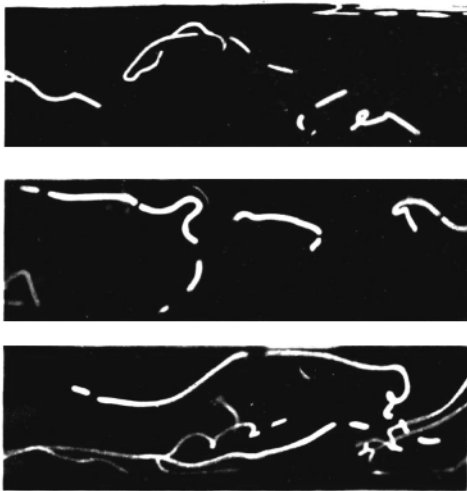


Рис. 3.3. Траектории, полученные следящей съемкой при  $Re=9750$  в опытах Б.А. Фидмана (скорость движения фотокамеры близка к средней скорости потока, течение справа налево)

течения удастся четко зафиксировать в этой зоне потока структурные кинематические элементы, размеры которых близки к поперечным размерам потока.

Несколько позже, в 40-х годах XX века, следящая киносъемка руслового потока в осевой вертикальной плоскости лабораторного лотка была выполнена Фидманом [274].

На рис. 3.3 приведены три фотографии, на которых отчетливо обозначились контуры кинематических структурных элементов, охватывающих поток практически на всю глубину. Течение визуализировалось в этих опытах смесью хлорбензола и вазелинового масла, вводимой в поток в виде мелких шариков. Хотя полученный Фидманом экспериментальный материал был до-

вольно скромнен по информативности, он, тем не менее, оказался весьма выразительным и по форме, и по существу. Вероятно поэтому, один из кадров этой съемки с контурами большого вихря был сразу же опубликован в монографиях Минского [185] и Великанова [43]. Но сам факт публикации одной и той же фотографии в разных книгах свидетельствовал как раз о том, что в 50-е годы прошлого века это был исключительно единичный экспериментальный материал.

### 3.1.3. Схематизации структуры русловой турбулентности

Скудость экспериментальных сведений о крупномасштабной русловой турбулентности явилась, может быть, причиной того, что созданные в 50–60-е годы XX столетия разными авторами схематизации кинематической структуры рус-

лового потока при некоторой их общности все же существенно различались в деталях, а в ряде случаев — и в принципиальных чертах.

Приведем здесь некоторые из опубликованных в тот период схематизаций структуры русловой турбулентности и описаний механизма турбулентного потока. Первым из отечественных ученых, предложивших структурную концепцию русловой турбулентности, был Великанов. Предложенная им структурная теория русловой турбулентности предполагает замену всего спектра турбулентных пульсаций колебанием одной (самой низкой) частоты, формируемой структурными элементами наибольшего размера. Предлагается разделение актуального скоростного поля потока на три составляющие: поле осредненных скоростей, поле структурных пульсационных скоростей, генерируемых перемещением в потоке структурных элементов наибольшего размера и характеризующихся почти закономерными (квазипериодическими) колебаниями, и поле случайных пульсационных скоростей, формируемое структурными элементами меньшего масштаба [43].

Основу структурного портрета и главный элемент механизма турбулентного потока составляют вихревые возмущения наибольшего поперечного размера [43]. Они имеют вытянутую вдоль потока асимметричную форму с более крутыми восходящими и пологими нисходящими траекториями и простую внутреннюю структуру. Движение этих вихревых возмущений в продольном направлении осуществляется, по мнению Великанова, с некоторым скольжением относительно дна. Между смежными элементами наибольшего размера в областях перехода нисходящих токов одного вихря в восходящие токи следующего за ним должны возникать, по мнению Великанова, структурные элементы меньшего масштаба и противоположного знака вращения. Развивая эту схему дальше, Великанов указывает, что между двумя любыми возмущениями одинакового направления вращения должен обязательно возникать водоворот следующего порядка малости и противоположного знака вращения, и так до тех пор, пока наиболее мелкие структурные элементы, обладая недостаточной энергией, уже не могут породить еще более мелкие и силами вязкости диссипируют непосредственно в теплоту. На рис. 3.4 приведена схема кинематической структуры руслового потока, построенная нами в соответствии с описанными выше представлениями Великанова.



Рис. 3.4. Схема кинематической структуры потока по М.А. Великанову

Примерно в те же годы Гончаров предлагает свой вариант структуры и механизма турбулентности руслового потока [68]. Он выделяет в турбулентном потоке два вида структурных возмущений: первичные (или основные) и вторичные (или паразитические) структурные возмущения. Вторичные структуры, по

мнению Гончарова, возникают под действием градиента осредненного течения и заполняют в поперечном направлении весь объем потока. Эти структуры имеют форму эллипсов с большой полуосью, параллельной основному направлению потока, и при движении по течению не испытывают заметных поперечных перемещений. Поперечные скорости возникают только в пределах лобовой и тыловой частей вторичных структур, и их распределение имеет, в общем, симметричный характер. Для поддержания существования вторичных структур не требуется значительной энергии.

Оценивая роль вторичных структур в механизме турбулентного потока, Гончаров отмечает: «Выявление этих структур, разъясня до некоторой степени появление поперечных составляющих скорости и их пульсации, не объясняет, однако, ряд наиболее существенных особенностей турбулентного режима, а именно разрушения струйной структуры движения и возникновения турбулентного перемешивания во всей толще потока» [68, с. 10].

Первичные (или основные) возмущения, по Гончарову, зарождаются на дне в результате торможения потока стенкой и затем вторгаются в толщу потока, вызывая торможение продольно-поступательного движения и определяя основной механизм турбулентного перемешивания. Отделяющиеся от дна в виде локальных масс жидкости основные возмущения, по мнению Гончарова, обладают первоначально максимальной вертикальной скоростью, а следовательно, и наибольшим эффектом торможения. По мере дальнейшего движения в толще потока они теряют значительную часть энергии и, смешиваясь с окружающей жидкостью, утрачивают свою индивидуальность.

Каждое конкретное возмущение, зародившееся на дне, характеризуется определенным размером и величиной начальной скорости вихреотделения. Наиболее крупные возмущения (и соответственно, реже возникающие) обладают большими скоростями вихреотделения и пронизывают поток на всю глубину до самой поверхности, более мелкие (и чаще возникающие) рассеиваются, не достигая поверхности, а еще более мелкие вырождаются на малых расстояниях от дна.

На рис. 3.5 приведена схема структуры турбулентности руслового потока, построенная нами в соответствии с изложенными здесь представлениями Гончарова.

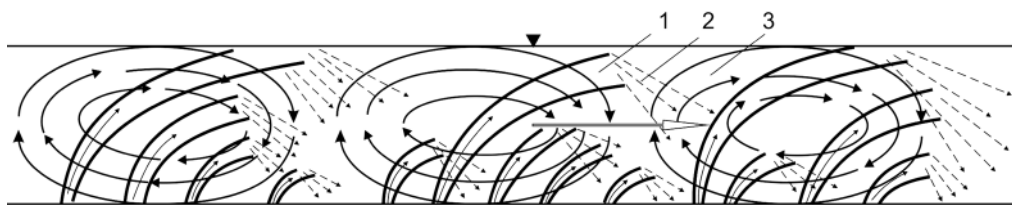


Рис. 3.5. Схема кинематической структуры потока по В.Н. Гончарову:

- 1 – первичные (основные) возмущения; 2 – компенсационные (нисходящие токи жидкости);  
3 – вторичные возмущения

Н.Е. Кондратьев, наделяя турбулентный русловой поток свойствами дискретной среды [127], считает целесообразным рассмотреть в нем отдельные

фрагменты движения [128]. В потоке с грядовым дном (точнее — для участка потока над напорным склоном гряды) Кондратьев выделяет два фрагмента: транзитный поток, в котором частицы жидкости движутся по слабоизвилистым траекториям и для которого принимается потенциальный закон течения, и придонный слой с траекториями циклоидальной формы. Отмечая, что циклоидальные траектории принадлежат периферийным частицам жидких вальцов, Кондратьев представляет придонный слой заполненным катящимися по дну эллиптическими водоворотами, по которым, как по каткам, скользит транзитный поток. Эллиптическим водоворотам в схеме Кондратьева присваивается простая внутренняя структура; движение в них принимается по замкнутым концентрическим траекториям, а изменение орбитальных скоростей от периферии к центру — по линейному закону.

В самом общем виде кинематическая схема руслового потока по Кондратьеву приведена на рис. 3.6 [128]. Эллиптические водовороты здесь для удобства рассуждений заменены круговыми элементами. Промежутки между двумя большими элементами, имеющими одинаковое направление вращения, заполняются элементами меньшего размера и противоположного направления вращения. Такое заполнение промежутков, как замечает Кондратьев, может быть бесконечным, так как между любыми водоворотами всегда окажется пространство, аналогичное показанному на рис. 3.6 (б). Однако вихрями наименьшего размера здесь, по-видимому, следует считать те, которые силами вязкости непосредственно диссипируют в теплоту.

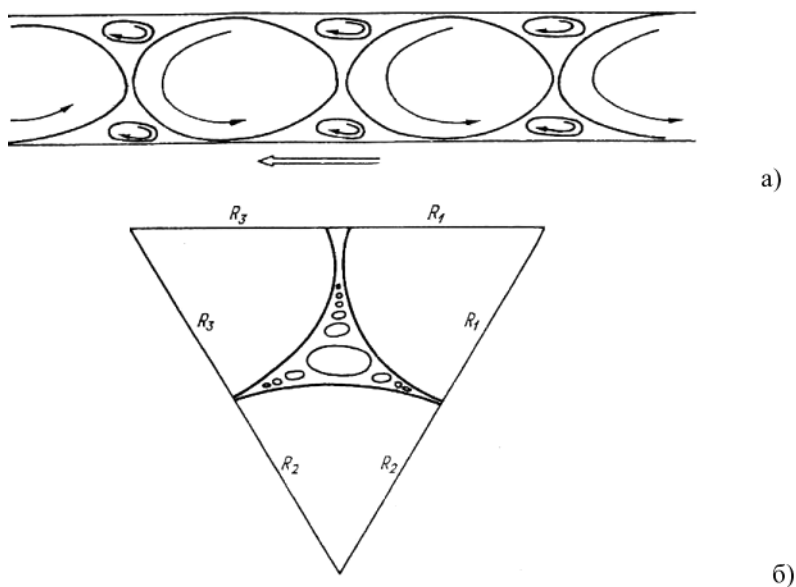


Рис. 3.6. Схема кинематической структуры потока по Н.Е. Кондратьеву:  
а — общий вид структуры придонного слоя;  
б — схема заполнения промежутков между крупными вихрями

В схеме Кондратьева принимается постоянное значение орбитальной скорости на периферийной орбите водоворота и постоянное значение эксцентриситета для всех эллиптических элементов, независимо от их размера. Следствием такого допущения оказывается способность придонного слоя рассеивать неограниченное количество энергии, так как потери энергии в эллиптическом элементе (как следует из полученной Кондратьевым формулы [128]) зависят только от квадрата скорости и величины эксцентриситета.

Гришанин, проанализировав результаты отечественных и зарубежных работ по исследованию структуры турбулентного потока в следах за обтекаемыми телами, между вращающимися цилиндрами, в пограничном слое, пришел к выводу о том, что наиболее упорядоченным структурным элементом турбулентного потока в этих случаях являются вихревые возмущения, возникающие в результате неустойчивости основного движения [71]. Они имеют простую кинематическую структуру одиночных вихревых трубок, которые, перемещаясь в направлении осредненного течения, испытывают неупорядоченные поперечные колебания.

Касаюсь вопроса о структуре безотрывного течения (т. е. простейшего случая руслового потока), Гришанин отмечает, что в безотрывном течении структура первичных элементов турбулентности является гораздо более сложной. Основной структурной формой является в этом случае «объем» или «струя» поперечного размера, соизмеримого с поперечным размером потока. При выделении этого объема или струи из окружающей жидкости на границах объема возникает вихревая пелена, быстро сворачивающаяся в индивидуальные вихревые трубки [71]. Последующее разрушение этих вихревых трубок приводит к сглаживанию границ индивидуального объема, и он, смешиваясь с окружающей жидкостью, теряет свою индивидуальность.

Схематизацию кинематической структуры потока Гришанин представляет в виде цепочки вихрей равной интенсивности, следующих с некоторым постоянным шагом. Центры этих вихрей расположены на середине глубины потока, а вектор вихрей, составляющих цепочку, принимается совпадающим с вектором вихря осредненного течения.

Гришанин схематизировал структуру турбулентности руслового потока в виде, представленном на рис. 3.7 [71].

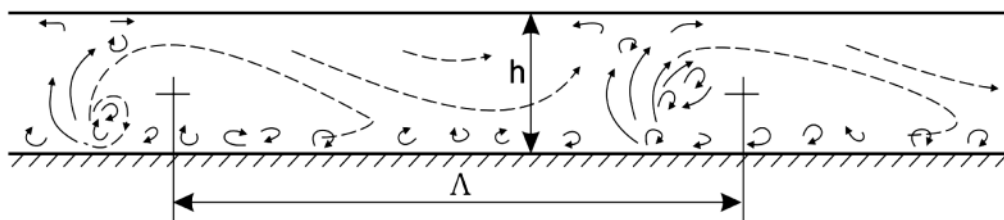


Рис. 3.7. Большие вихри руслового потока по К.В. Гришанину

А.В. Караушев, рассматривая кинематическую структуру руслового потока, отмечает, что турбулентное перемешивание определяется наличием в потоке вихрей, возникновение которых связано с влиянием дна и боковых стенок [108].

Процесс возникновения, развития и разрушения вихрей, по мнению Караушева, происходит непрерывно, а внутренняя структура вихревых элементов представляется сложной: наиболее крупные первичные вихревые образования состоят из вторичных меньшего размера, вторичные — из еще более мелких и т. д. Далее Караушев подчеркивает, что особенности кинематики осредненного и пульсационного полей скорости, а также интенсивность процесса турбулентного перемешивания определяются наиболее крупными и мощными вихревыми образованиями первого порядка.

Н.С. Знаменская, применяя предложенный Кондратьевым принцип фрагментирования, предложила схему кинематической структуры потока при наличии на его дне песчаных подвижных гряд [98]. В наиболее сложном варианте, когда водоворотная область подвалья оказывается неустойчивой и наблюдаются периодические выбросы завихренной жидкости из подвалья к поверхности потока, схема Знаменской состоит из 4-х фрагментов (рис. 3.8): транзитной зоны, для которой принимается потенциальный закон течения; водоворотной зоны подвалья гряды, где течение схематизируется в виде концентрических эллипсов; зоны катящихся по напорному склону гряды водоворотов, также (как и в схеме Кондратьева) схематизируемых в виде концентрических элементов; и зоны выбрасываемой из подвалья гряды завихренной жидкости. В последнем фрагменте механизм движения жидкости крайне сложен, но для условий плоской задачи и с целью упрощения общей схемы он также представлен системой восходящих к поверхности потока эллипсов. В третьем фрагменте промежутки между водоворотами первого порядка заполняются структурами высших порядков, именуемых Знаменской микровихрями.

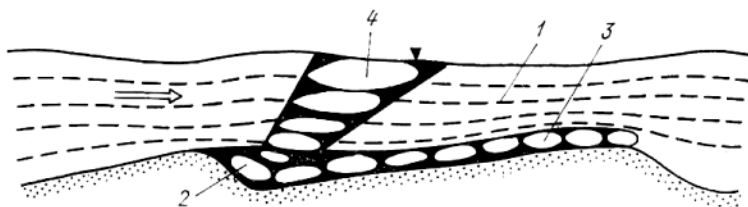


Рис. 3.8. Схема кинематической структуры потока при грядовой форме дна по Н.С. Знаменской:  
1 — транзитный поток; 2 — водоворотная зона подвалья гряд; 3 — зона вихрей, катящихся по напорному склону гряд; 4 — зона вихрей, вырывающихся из подвалья в толщу потока

Эта схема была разработана для расчета потерь энергии потока при грядовом рельефе дна с использованием формулы скорости рассеяния энергии [98]. Выполненные Знаменской расчеты привели к выводу о том, что наименьшее количество энергии рассеивается в транзитной зоне потока, а наибольшее — в микровихрях зоны катящихся водоворотов.

Маккавеев рассматривает турбулентный поток как некоторую сложную автоколебательную систему, которая осуществляет расходование энергии внешних сил для сохранения на постоянном статистическом уровне пульсационных движений, совершаемых объемами жидкости, именуемыми им «пульсационными

индивидуумами» [174–176]. Зарождение этих пульсационных индивидуумов происходит, по Маккавееву, вблизи граничных поверхностей и за счет энергии, подводимой к ним из основной зоны потока. Образовавшиеся у дна структурные элементы выбрасываются затем в толщу потока, где и осуществляется их рассеяние.

Автоколебательная система турбулентного потока имеет сложную структуру [176]. Она состоит из ряда частных автоколебательных систем, каждая из которых обладает определенными свойствами, зависящими от характера внешних поверхностей (дно, берега, ледяной покров и пр.), вблизи которых происходит формирование частной системы.

В 1952 г. Маккавеевым была предложена схема структуры турбулентного потока, в которой пульсационные индивидуумы представляются в виде водоворотов с вертикальной осью вращения, замкнутых одним концом на дне, а другим — на свободной поверхности [176]. В пределах каждого такого водоворота жидкость совершает осевые и вращательные движения. Расположение водоворотов в потоке таково, что за одним водоворотом, имеющим одно направление осевых и вращательных движений, следует другой, с противоположным направлением этих движений. Таким образом осуществляется смена восходящих токов жидкости нисходящими, пронизывающими поток на всю глубину и вызывающими на его поверхности чередование воронок понижений буграми вздутий. Первоначально вертикальные оси вращения водоворотов затем искривляются под действием градиента осредненных скоростей, что приводит к разрушению водоворотов. Образующиеся новые системы водоворотов обладают теми же свойствами, что и разрушившиеся, и могут отличаться от них только величиной параметров. На рис. 3.9 приведена схема кинематической структуры руслового потока, построенная нами в соответствии с описанными представлениями Маккавеева.

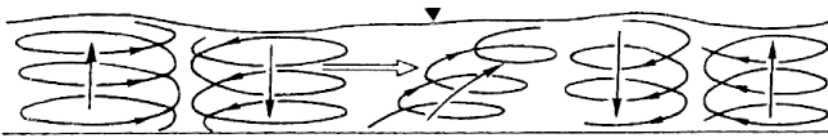


Рис. 3.9. Схема кинематической структуры потока по В.М. Маккавееву

А.А. Таунсенд, характеризуя процесс диссипации пульсационной энергии в изотропном турбулентном потоке с маломеняющейся средней скоростью, представляет структуру этого потока состоящей из вихрей разного масштаба [260]. Самые крупные вихри, по Таунсенду, получают энергию непосредственно от осредненного движения и передают ее вихрям меньшей величины. Этот процесс передачи энергии по каскаду вихрей совершается до того наименьшего их размера, вихри которого теряют энергию за счет непосредственного действия вязких напряжений.

В течениях с градиентом средней скорости по вертикали большие вихри, по свидетельству Таунсенда, имеют вытянутую по течению форму: их длина пре-



восходит ширину по меньшей мере в 3 раза. Внутренняя структура больших вихрей представляется простой.

По Т. Теодорсену, основным и универсальным элементом турбулентности принимаются возмущения типа закручивающихся вихревых трубок, возникающие в пристеночной области потока и названные им вихревыми подковами [261]. Самая большая вихревая подкова, или вихревая трубка первого порядка, создается основным потоком. Возникнув, она испытывает местный изгиб, и некоторая ее часть подъемной силой увлекается в толщу потока, что и придает вихревой трубке петлеобразную форму, напоминающую подкову. Вихревая подкова оказывает сопротивление движению основного потока, в результате чего на ее поверхности образуется система вихревых трубок второго порядка, которые, развиваясь и отбирая энергию у первичной вихревой трубки, как бы разрушают ее. Аналогичным образом вторичные вихревые трубки разрушаются третичными и так далее, вплоть до образования микроподков, диссипирующих непосредственно в теплоту. На рис. 3.10 приведена схема кинематической структуры потока по Теодорсену.

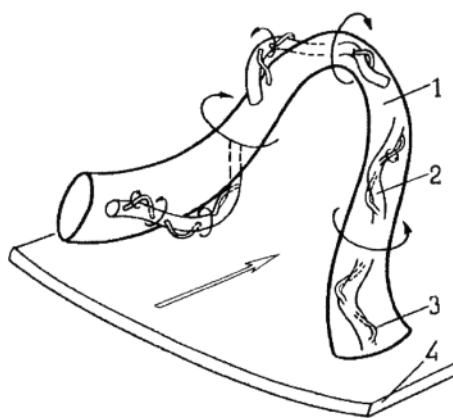


Рис. 3.10. Схема кинематической структуры потока по Т. Теодорсену

Приведенный очерк воззрений ученых, сложившихся к середине прошлого века относительно структуры русловой турбулентности и механизма турбулентного потока, с очевидностью обнаруживает наряду с некоторым единомыслием и существенно разные взгляды на ряд принципиально важных сторон этого сложного явления. Одной из причин такого положения, по нашему мнению, был, как уже отмечено выше, крайне ограниченный объем материалов непосредственных измерений структуры крупномасштабной русловой турбулентности, на основании которых можно было бы достаточно уверенно принимать или отвергать те или иные предложения и вместе с тем пытаться более глубоко раскрыть существо явления. Это обстоятельство (наряду с перечисленными в самом начале этой главы) послужило основанием для постановки серии лабораторных, а позже — и натурных экспериментов, к рассмотрению которых мы и переходим ниже.

### **3.2. Экспериментальные исследования русловой турбулентности, выполненные в ГГИ**

В ходе подготовки к лабораторным экспериментам первоочередному обсуждению были подвергнуты вопросы методологии исследований структуры русловой турбулентности. Наш научный наставник Н.Е. Кондратьев в этих обсуждениях

неизменно советовал исходить из концепции дискретности структуры руслового потока. Идея дискретности руслового потока, изложенная им впервые в работе [127], приводит к осознанию того, что скорость в турбулентном потоке есть лишь частное свойство некоторого объема жидкости, характеризуемого рядом других свойств. Суждение об объеме в целом, конкретных его свойствах и в том числе — о распределении скоростей в его пределах, может быть составлено значительно точнее и полнокровнее, если этот объем выделен как цельное образование в непрерывном скоростном поле потока.

Обращаясь к этой теме, Кондратьев часто приводил в качестве аналогии формы руслового рельефа, замечая, что представление о песчаной гряде или побочне оказывается значительно более многогранным и верным при непосредственном наблюдении их как цельных форм, нежели путем анализа изменений отметок дна, измеряемых в течение длительного времени в какой-либо точке этих форм.

Концепция дискретности руслового потока Кондратьева и общий арсенал сложившихся к середине прошлого века представлений о структуре русловой турбулентности и составили методологическую основу методики наших экспериментов.

### **3.2.1. Характеристика лабораторных установок, натуральных объектов, условий экспериментов и методики измерений**

Исследования русловой турбулентности были начаты с измерений поля актуальных скоростей потока в стеклянных лотках следующих параметров: малый лоток с изменяющимся уклоном длиной 5 м, шириной 0,068 м, с дном из органического стекла и боковыми стенками из обычного оконного стекла; малый лоток длиной 8 м и шириной 0,21 м, со стеклянным дном и стеклянными (из витринного стекла толщиной 0,005 м) боковыми стенками и в нем же с ровным шероховатым дном, выложенным зернистым материалом разной крупности [112, 114].

Поле мгновенных скоростей исследовалось в вертикальной плоскости, совпадающей с продольной осью лотков. Скорости течения измерялись путем фотографирования (или киносъемки медленно работающим киноаппаратом) мелких шароподобных частиц полистирола нулевой плавучести, освещаемых специальным щелевым фонарем. Исходная масса гранул полистирола предварительно подвергалась просеиванию на стандартных отечественных и немецких наборах сит для выделения требуемой в конкретных экспериментах крупности. Плотная масса полистирола имеет плотность, существенно большую единицы. Но за счет защемленных в ней пузырьков воздуха плотность конкретных гранул оказывается различной, в том числе и меньшей единицы. Поэтому выделенная для эксперимента механическим путем фракция гранул полистирола подвергалась затем гидравлической калибровке, в результате которой для использования в опыте отбирались только те частицы, гидравлическая крупность которых в воде данной температуры была равна или близка к нулю [112–114].

Щелевые фонари, с помощью которых из всей ширины потока высвечивалась только узкая вертикальная полоса, имели разные размеры и конструкцию

в зависимости от вида съемки и характеристик потока, но во всех случаях в них устанавливались две щелевые диафрагмы для придания световому пучку большей компактности в пределах всей глубины потока.

Требуемая дискретизация по времени достигалась с помощью внешнего obtюратора, устанавливаемого перед объективом фотоаппарата или медленно работающей кинокамеры [112–114].

Фото- и киносъемка изучаемой области потока выполнялись двумя способами: неподвижным и движущимся вдоль лотка аппаратом. Во втором случае съемочная аппаратура размещалась на специальной тележке, скорость которой задавалась близкой к средней скорости потока [112–114]. С помощью этого приема оказалось возможным зафиксировать (как в опытах Никурадзе и Фидмана) те структурные кинематические элементы, которые и составляют существо турбулентности руслового потока, т. е. вызывают, прежде всего, постоянно происходящие во всей области движения изменения скорости течения по величине и направлению. Таким образом, на начальном этапе наших исследований (60-е годы и начало 70-х годов) изучались двухмерная структура турбулентности, представляемая распределением по глубине продольной и вертикальной составляющих скорости, и свойства самих структурных элементов турбулентности также в плоском продольно-вертикальном разрезе.

На рис. 3.11 приведена фотография визуализированного течения, зафиксированного стационарным фотоаппаратом. Поле съемки включает всю глубину потока и расстояние в несколько глубин в продольном направлении, благодаря чему оказывается возможным наряду с чисто статистической обработкой материалов съемки выполнить еще и анализ траекторий частиц, визуализирующих течение.

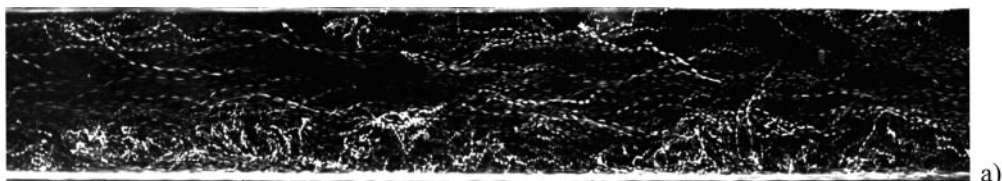


Рис. 3.11. Траектории индикаторов, зафиксированные стационарным фотоаппаратом в лотке с гладким дном из органического стекла

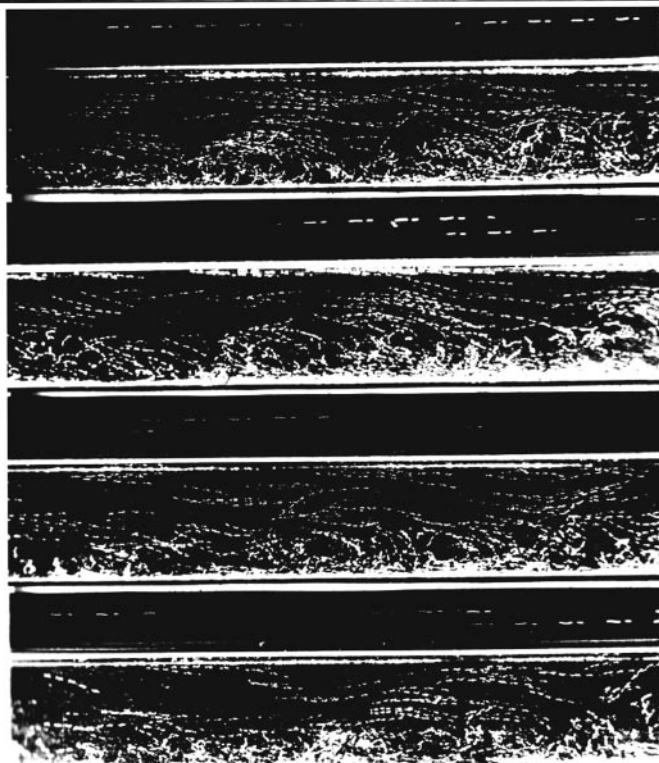
Экспозиция фотоаппарата (около 1 секунды) дробится на значительно меньшие (от 0,1 до 0,01 секунды, в зависимости от скорости потока) временные интервалы с помощью простого (т. е. с одинаковыми в пределах диска отверстиями) внешнего obtюратора. Траектория каждой освещенной плоским пучком света частицы в этом случае представляется последовательностью простых штрихов, позволяющих судить как о скорости течения, так и о его направлении.

При фотографировании визуализированного течения движущимся вдоль потока фотоаппаратом использование простого внешнего obtюратора затрудняет установление направления некоторых траекторий (рис. 3.12 (а)).

В связи с этим следящая съемка выполнялась с другим внешним obtюратором, на диске которого каждое большое отверстие сочеталось со значительно меньшим, и поэтому траектория каждой освещенной частицы воспроизводилась



а)



б)

Рис. 3.12. Траектории индикаторов, зафиксированные скользящей аппаратурой:  
а – фотокамерой ФК-18×24 в 5-метровом лотке; б – киноаппаратом «Конвас» в 8-метровом лотке

в виде штрихпунктирной линии, четко указывающей направление течения (рис. 3.12 (б)). В поле съемки помещались точечные неподвижные источники света, воспроизводившие траектории, направленные в противоположную сторону движению аппарата (жирные прямолинейные траектории над каждым кадром, рис. 3.12 (б)). По виду этих траекторий (прямолинейности и одинаковости штрихпунктирных отрезков) устанавливалось качество каждого конкретного снимка с последующим заключением о включении его в обработку или в брак.

Следящая съемка выполнялась преимущественно киноаппаратом, благодаря чему удавалось на 2-метровом рабочем участке лотка получить не один, а несколько последовательных снимков одной и той же области потока и таким образом судить об изменении структурной ситуации во времени (рис. 3.12 (б)).

В ходе статистической обработки материалов стационарной и следящей съемки визуализированного течения фотографии с траекториями частиц рас-

черчивались на продольные слои толщиной 1–2 мм в придонной области, где градиенты продольной компоненты скорости значительны, и толщиной 3–4 мм в центральной и приповерхностной областях, где градиенты продольной компоненты невелики. В каждом слое потока объем выборок значений актуальных скоростей составлял около 100 значений.

Применяя фото- и киносъемку визуализированного течения в стационарном и следящем вариантах, было выполнено около сотни экспериментов, половина из которых (как основная серия) были привлечены к последующему анализу и характеризовались следующими условиями.

Эксперименты в лотках с гладким дном: глубина 0,69–8,0 см, скорость течения 7,0–64 см/с, число Рейнольдса 348–25570, число Фруда 0,26–1,59, уклон поверхности равномерного потока 0,00010–0,0133.

Эксперименты в лотке с шероховатым дном: глубина 5,0 см, скорость течения 55,0 см/с, число Рейнольдса 23 500, число Фруда 0,77, уклон поверхности равномерного потока 0,0067–0,0130, шероховатость дна, выложенного песчано-гравийной смесью, гравием, щебнем и разнофракционными составами гравия 3,0–15,0 мм (всего 9 вариантов).

Хотя приведенные данные и свидетельствуют о широком диапазоне граничных условий в выполненных экспериментах, все же они были получены на лабораторных установках, сильно отличающихся от природных русловых потоков и размерами, и специфичностью собственно русла. Потребность вынесения эксперимента на натурные объекты и, вместе с тем, невозможность использования в природных условиях методических приемов экспериментирования, освоенных в лаборатории, побудили поиски новых путей дальнейшего исследования структуры турбулентности руслового потока.

Один из реализованных вариантов измерения актуальных скоростей течения в реке состоял в переоборудовании стандартной полевой гидрометрической вертушки ВЖМ-3. Ее контактное колесо было дополнено тремя контактами, благодаря чему частота сигналов увеличилась (а временное и пространственное сглаживание, соответственно, уменьшились) в 4 раза. Эксперимент с использованием такой переоборудованной вертушки был проведен на р. Поломети в половодье 1970 г. Измерения выполнялись на трех вертикалях, приуроченных к напорному склону, гребню и подвалю гряды, при расходе воды 30 м<sup>3</sup>/с, глубине 1,5 м, скорости течения 1,2 м/с, числе Рейнольдса  $1,5 \cdot 10^6$  и числе Фруда 0,3. Песчано-гравийная гряда имела высоту 0,45 м и длину 5,0 м.

Однако полученная в этом эксперименте информация, хотя и представляла определенный интерес при сравнении результатов с лабораторными данными (о чем будет сказано ниже), все же оказалась весьма скромной, поскольку измерялась только продольная компонента скорости.

Получить существенно более полную информацию о структуре речного потока оказалось возможным с помощью нового средства измерения — трехкомпонентного измерителя актуальной скорости, способного отслеживать не только собственно мгновенную скорость потока, но и мгновенное направление течения [94]. Методика определения всех трех компонент актуальной скорости состоит в следующем. Если величину актуального вектора скорости обозначить

через  $V$ , а актуальное направление вектора выразить двумя углами: углом  $\alpha$  в горизонтальной плоскости и углом  $\beta$  — в вертикальной, то в прямоугольной системе координат, ориентированной продольной осью параллельно осредненному направлению течения, а вертикальной осью — по вертикали, получим следующие соотношения для вычисления компонент актуальной скорости:

$$u = V \cos\alpha \cos\beta; \quad (3.1)$$

$$v = V \sin\beta; \quad (3.2)$$

$$w = V \sin\alpha \cos\beta, \quad (3.3)$$

где  $u$ ,  $v$  и  $w$  — соответственно продольная, вертикальная и поперечная компоненты актуальной скорости.

Созданный с использованием этого принципа прибор [94] представляет собою микровертушку с флюгером, производящую 6 бесконтактных импульсов на один оборот лопастного винта и закрепленную в карданном механизме. Направление течения, т. е. вектора скорости, отслеживается индукционными датчиками и далее в преобразованной форме передается вместе с сигналами вертушки на малоинерционный перьевой самописец. Прибор крепится на штанге, которая устанавливается на платформе, транспортируемой к месту измерений на поплавках-понтонках и обеспечивающей (после ее установки и удаления поплавков с водной поверхности) неизменяемость координатной системы и невозмущенность потока в области измерений.

С использованием этой методики были выполнены измерения турбулентности на ряде водных объектов, гидравлические и морфологические характеристики которых приведены в табл. 3.1.

Анализ полученной на этих водных объектах информации в совокупности с результатами лабораторных экспериментов позволил более надежно обосновать ранее сформулированные выводы и убедиться в возможности их распространения на реки и каналы. Вместе с тем, эти данные позволили составить достаточно ясное представление о третьей (поперечной) компоненте пульсационной скорости и с ее учетом — построить простые расчетные соотношения для количественной оценки различных характерных значений всех трех компонент актуальной скорости, а также составить представление о трехмерной структуре турбулентности руслового потока.

Примененный в натуральных условиях принцип измерения актуальной скорости потока оказался, на наш взгляд, настолько эффективным и сравнительно простым, что спровоцировал желание применить его (наряду с фото-кинематографическим приемом) в лабораторных условиях.

В лабораторном варианте прибора скорость потока измерялась термоанемометром на полупроводниковом терморезисторе, а горизонтальный и вертикальный углы — соответственно двумя парами (горизонтальной и вертикальной) закрепленных в зоне гидрофлюгера электродов, которые вместе с подвижным электродом, размещенным на конце гидрофлюгера, вызывают изменение сопротивления электропроводящей жидкости, заключенной между ними. Прибор был изготовлен в двух вариантах, несколько отличающихся по конструк-

Таблица 3.1.

## Гидравлические и морфологические характеристики водных объектов

Водный объект	Расход воды, м <sup>3</sup> /с	Глубина, м	Ширина русла, м	Средняя скорость течения, м/с	Число Фруда	Гидравлический уклон	Характеристика донного рельефа и русловых наносов
р. Гороховка, Ленинградская область	5,0	2,6	12,0	0,33	0,08	0,0004	мелкозернистый песок с илом, отдельные неровности высотой до 0,05 м
р. Полометь, д. Зеленый Бор	70,0	1,5	75,0	0,62	0,17	0,0002	среднезернистый песок в форме гряд на мезоформах
р. Полометь, д. Зеленый Бор	25,0	1,0	60,0	0,40	0,13	0,00025	то же
р. Полометь, с. Яжелбицы	11,8	0,9	21,2	0,62	0,21	0,00019	гравелисто-песчаные отложения в мезоформах без гряд
р. Вычегда, п. Коряжма	102	2,7	250	0,34	0,07	0,0001	среднезернистый песок в форме гряд на поверхности побочной
р. Турунчук	20,0	1,3	48,0	0,34	0,09	0,00005	мелкозернистый песок в форме гряд высотой 0,18 м и длиной 6,5 м
канал Шават	102	2,7	50,0	0,74	0,12	0,0001	песчаные гряды высотой 0,25 м, длиной 10,0 м

ции [92]. С помощью этих приборов, а также кинематографическим методом (при просвечивании вертикальных и горизонтальных отсеков — слоев потока) были выполнены измерения всех трех компонент актуальной скорости в гидравлическом лотке длиной 100 м и шириной 1,0 м при глубинах воды над ровным металлическим дном 0,1; 0,2 и 0,3 м.

Таким образом, кинематическая структура руслового потока изучалась в исследованиях ГГИ путем измерения актуальных скоростей потока разными методами (измерения в отдельной точке в течение длительного времени и измерения поля скорости в некоторой области потока, включавшей всю глубину и 5–10 глубин в продольном его направлении); использовались разные средства измерения (фотографирование и киносъемка поля скорости, стандартная гидрометрическая вертушка ВЖМ-3 с тремя дополнительными контактами на рабочем колесе, трехкомпонентный измеритель актуальной скорости для работы в реках, термоанемометры для работы в гидравлических лотках и на гидравлических моделях водных объектов); измерения выполнены в широком диапазоне граничных условий в лаборатории и в натуре; анализ результатов этих

измерений выполнялся разными приемами (путем рассмотрения изменений актуальной скорости в точке во времени и путем установления пространственных и кинематических характеристик структурных элементов поля актуальных скоростей).

Результаты этих измерений приведены в следующем параграфе, но прежде, чем приступить к их обсуждению, заметим, несколько забегая вперед, что выявленные в разных условиях и разными методическими приемами свойства кинематической структуры руслового потока (на структурном уровне макротурбулентности) оказались весьма устойчивыми.

Этот сам по себе замечательный, на наш взгляд, результат важен еще и в том отношении, что он подтверждает еще раз правомерность методологической концепции о дискретности кинематической структуры руслового потока и не противоречит концепции непрерывности поля актуальных скоростей. Вместе с тем этот результат свидетельствует о надежности и эффективности использованных методических приемов и технических средств.

### 3.2.2. Двухмерная структура русловой турбулентности

Основной экспериментальный материал для описания двухмерной структуры русловой турбулентности был получен, как уже отмечалось выше, в лабораторных лотках с помощью фотографирования и киносъемки частиц полистирола нулевой плавучести в осевой вертикальной продольной плоскости потока.

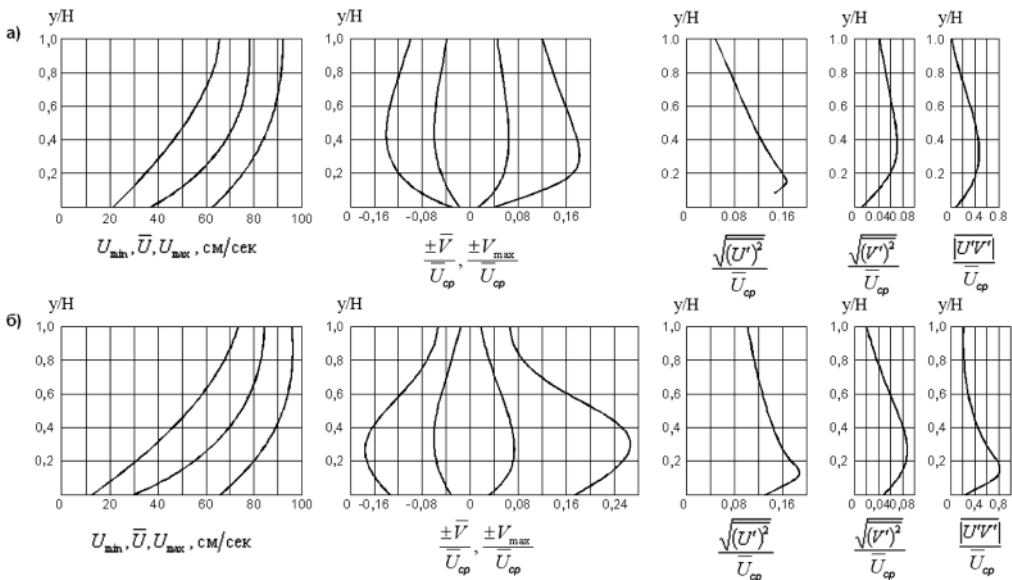


Рис. 3.13. Распределение кинематических характеристик по глубине потока в двухмерном измерении: а – над гладким стеклянным дном; б – над шероховатым дном (гравий крупностью 13–15 мм).

Примечание: Традиционные характеристики кинематической структуры руслового потока приведены на рис. 3.13 в отношении к средней скорости течения



При удачно подобранном количестве подаваемых в поток частиц полистирола вся освещенная область течения на рабочем участке лотка довольно равномерно маркируется траекториями ярко светящихся индикаторов. Выполняя статистическую обработку и анализ траекторий, зафиксированных неподвижной и движущейся вдоль лотка съёмочной аппаратурой, удалось получить представление о кинематической структуре в двухмерном измерении как в традиционных характеристиках (рис. 3.13), так и в виде структурных (дискретных) элементов (рис. 3.12), образование и движение которых в русловом потоке составляет существо его турбулентной природы и выявляет характер распределения по глубине (а также и по ширине, о чем будет сказано ниже) традиционно определяемых кинематических характеристик потока.

### 3.2.2.1. Свойства структурных элементов турбулентности и схема кинематической структуры

Изучение материалов следящей фото- и киносъемки визуализированного течения начиналось с детального анализа снимков, последующей их доработки путем более четкого воспроизведения некоторых полутоновых траекторий и, наконец, составления по каждому конкретному фотоснимку или кинокадру структурной схемы, на которой обозначались контуры наиболее четко видимых структурных кинематических элементов (рис. 3.14). Далее определялись размеры структурных элементов и значения орбитальных (т. е. вдоль образующего их контура) скоростей.

Анализ полученных таким образом сведений позволил составить довольно определенное представление о структуре турбулентности в вертикально-продольной плоскости потока (т. е. в двухмерном измерении).

Область течения в пределах всей глубины потока заполнена разными по величине и форме структурными вихревыми элементами. Наиболее четко обнару-

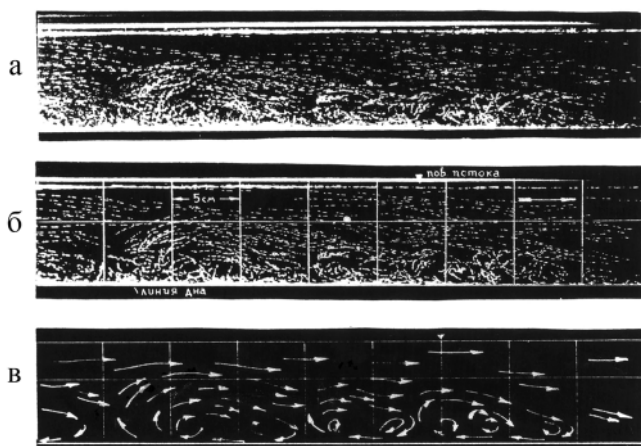


Рис. 3.14. Пример подготовки материала к обработке: а – кинокадр с траекториями индикаторов, зафиксированных киноаппаратом, движущимся вдоль потока; б – корректив кинокадра; в – схема структуры течения, составленная по откорректированному кинокадру

живаются вихри, вертикальный размер которых равен или близок глубине потока. Такие вихри имеют вытянутую вдоль потока форму, их размер варьирует от 3 до 10 глубин, составляя в среднем для условий гладкого стеклянного дна  $6,7 H$  ( $H$  — глубина потока).

Большие вихри прослеживаются довольно четкими группами, что позволяет характеризовать их размещение вдоль потока шагом  $L$ , составляющим в среднем также около 7 глубин.

Большие вихри имеют асимметричную форму: их тыловые области, обращенные против течения, представлены крутовосходящими от дна к поверхности потока траекториями, а области, обращенные по течению, представлены сравнительно полого опускающимися от поверхности ко дну траекториями. Большие вихри имеют сложную структуру, занимаемое ими пространство потока заполнено вихревыми элементами меньшего размера. Последние также составлены еще более малыми.

Определенно обнаруживается следующее общее свойство вихревой структуры потока: с уменьшением размера структурных элементов их форма все более стремится к форме круга, а орбитальные скорости уменьшаются. Характер этих закономерностей иллюстрируется графиками, представленными на рис. 3.15 и рис. 3.16.

Вместе с тем определенно обнаружено, что максимальные значения продольной и вертикальной пульсационных компонент приурочены к траекториям, ограничивающим контур наибольших структурных элементов турбулентности, у которых вертикальный размер  $b$  равен или близок глубине потока  $H$ .

Все структурные элементы турбулентности имеют преимущественно одинаковое направление вращения, совпадающее с моментом градиента осредненно-го течения (при течении слева направо вращение по ходу часовой стрелки).

Структурные элементы турбулентности оказываются в целом неустойчивыми образованиями. Однако при этом более упорядочены и устойчивы самые большие вихри с вертикальным размером, равным или близким глубине.

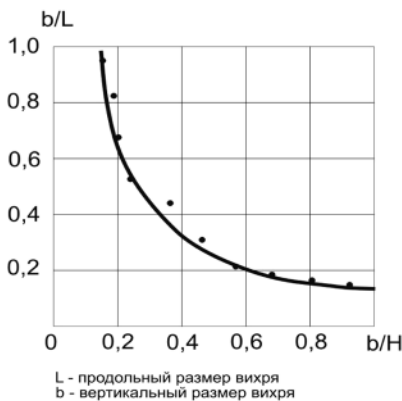


Рис. 3.15. Зависимость формы вихревых образований от их вертикального размера (в масштабе глубины потока)

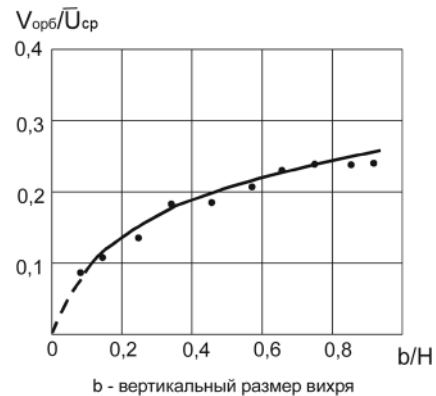


Рис. 3.16. Зависимость орбитальной скорости вихревых образований ( $V_{орб}$ ) от их вертикального размера ( $\bar{U}_{ср}$  — средняя скорость потока)

С учетом рассмотренных свойств построена схема двухмерной турбулентности в вертикальной продольной плоскости потока в виде, изображенном на рис. 3.17. В этой схеме находят отражение отдельные фрагменты представлений разных исследователей о структуре крупномасштабной турбулентности, описанные в п. 3.1. Вместе с тем, будучи построенной по материалам непосредственных наблюдений и измерений, она наиболее близко отражает действительную картину структуры потока (при исключении из общего движения осредненной по глубине продольной компоненты скорости) и в связи с этим представляется обобщающей современные представления.



Рис. 3.17. Схема кинематической структуры руслового потока, построенная по материалам лабораторных экспериментов ГГИ

С учетом этой схемы физически ясно объясняется собственно механизм турбулентного потока, механизм формирования гидравлического сопротивления, механизм приведения в движение и транспорта русловых наносов, генезис русловых форм (в частности, микроформ), характер распределения по глубине актуальных скоростей течения.

Вместе с тем, нужно заметить, что фотографии мгновенного состояния потока, полученные движущимся вдоль него со скоростью, близкой к средней по глубине скорости, киноаппаратом, отражают некоторый мгновенный, сформированный интегральным действием всех элементов механизма турбулентного потока образ. Этот конкретный образ лишь в общих и наиболее значимых чертах (которые и отмечены нами выше) отражается в представленной на рис. 3.17 схеме, но именно сам факт отражения ею наиболее значимых черт структуры русловой турбулентности является доказательством эффективности данного методического приема. Поэтому высказываемое иногда мнение о некорректности или даже недопустимости применения данного методического приема в условиях градиента продольной скорости по глубине потока не имеет по существу серьезных оснований. Безосновательность подобных заключений становится более понятной, если принять во внимание возможность сравнительно легкой и элементарной операции пересчета (при необходимости) мгновенных скоростей, зафиксированных в режиме движения фото- и киноаппаратуры, в абсолютные (т. е. зафиксированные неподвижной съемочной аппаратурой) значения мгновенных скоростей.

Таким образом, полученные с использованием приема отслеживания в течение некоторого времени некоторой области потока (т. е. исключением из рассматриваемого процесса осредненной по глубине переносной скорости) картины мгновенного состояния его кинематической структуры весьма близки к реально осуществляющемуся процессу движения жидкости и значительно правдо-

подобнее (конкретнее и детальнее) воспроизводят кинематическую структуру потока, нежели, например, профили осредненных по времени продольной и поперечных компонент актуальной скорости. В связи с этим и схема структуры русловой турбулентности, построенная на основе этих экспериментальных материалов, при некоторой формализации отдельных деталей процесса в целом адекватно отражает основные черты механизма турбулентного потока.

Заканчивая этот параграф, заметим, что часто, объясняя физический механизм какого-либо процесса в русловом потоке, используют профиль осредненных продольных скоростей как один из аргументов (тоже физических), забывая при этом, что он является всего лишь моделью, весьма схематично отражающей реальную картину турбулентного течения и, вероятнее всего, никогда не реализующейся. Профиль осредненных продольных скоростей воспринимается при этом как некий скелет (или основа) кинематической структуры потока, к которому добавляются, или из которого вычитаются, некоторые пульсационные случайные значения скорости. Представляется, что такой подход к описанию структуры турбулентного потока допустим лишь как некоторый технологический элемент в разного рода расчетных методиках, и он ни в коем случае не может использоваться для объяснения существа физического механизма русловой турбулентности и для объяснения связанных с нею особенностей других свойств руслового турбулентного потока.

На наш взгляд, есть лишь один случай, когда профиль осредненных продольных скоростей может быть использован как действительно существующий элемент кинематической структуры потока. Этот случай — переход или превращение ламинарного потока в турбулентный. В связи с этим позволим здесь следующее, относительно переформирования ламинарного потока в турбулентный, рассуждение, которое из-за отсутствия соответствующих материалов построено в значительной мере на домысливании уже очевидного. Переход потока из режима внутренне стационарного (ламинарного) в режим внутренне нестационарный (турбулентный) начнется с появления самых крупных блоков нестационарности, т. е. (с учетом вышеприведенной схемы) с образования самых больших вихрей, возникающих в результате изменения в соотношении силы физической вязкости, удерживающей поток в состоянии послойного движения, и движущей силы, пропорциональной все возрастающему градиенту профиля скорости и стремящейся опрокинуть поток. Максимальный опрокидывающий момент выразится произведением максимальной скорости течения (свойственной поверхностным слоям потока) на его глубину, что и приводит к превращению послойного параллелеструйного течения в блоки качения и, таким образом, к появлению поперечного (или вертикального в пределах всей глубины) молярного обмена. Может быть, первоначально эти вихри имеют эллиптическую форму и простую внутреннюю структуру, но именно с этого момента продольный профиль скорости превращается из реально существующего элемента кинематической структуры потока в модель или схему, отражающую осредненный элемент структуры потока.

В процессе вертикального молярного обмена жидкость из относительно медленно движущихся придонных слоев потока переносится к поверхности, в

зону относительно быстро движущихся слоев, затормаживая их и приобретая дополнительную скорость, а поверхностные объемы жидкости, опускаясь ко дну, ускоряют движение в придонных слоях, утрачивая при этом свою собственную скорость.

Этот самый первый этап перехода от ламинарного режима движения потока к турбулентному как раз и представляет собою первое звено в концепции Ричардсона – Колмогорова – Обухова, раскрывающей энергетический механизм турбулентности — отбор энергии общего, или основного, движения (которое на этом этапе по существу своему еще совпадает с осредненным движением) структурами низкой частоты и, соответственно, большого размера. Но эти структуры, развиваясь на градиентном переносном течении, в своих поперечных (по вертикали) движениях оказываются (как отмечено только что выше) несогласованными с ним, в результате чего возникает иной, чем при ламинарном режиме, механизм гидравлического сопротивления.

Возникающая в связи с формированием больших вихрей пульсация скорости течения неизбежно вызывает и соответствующую ей пульсацию гидродинамического давления и, как следствие, — выброс уже не связанных собственно с большими вихревыми структурами масс медленно движущейся у дна жидкости в направлении поверхности потока.

Эти массы (или моли) жидкости в силу очевидной инерционности оказываются еще более несогласованными с переносным течением (градиент которого с переходом от дна к поверхности теперь уже заметно утрачивает черты монотонного изменения) и поэтому еще более усиливают специфику нового механизма гидравлического сопротивления. Вместе с тем эти массы жидкости, пронизывая область больших вихрей, способствуют преобразованию их формы и внутренней структуры к тому виду, который и воспроизводится на фотографиях развитого турбулентного течения, выполненных движущимся вдоль потока киноаппаратом, и в основных чертах отражен в приведенной схеме (рис. 3.17).

#### **3.2.2.2. Распределение продольной и вертикальной компонент скорости по глубине потока**

В настоящее время имеется довольно большой арсенал формул, описывающих распределение по глубине, например, осредненных значений продольной компоненты скорости. Воспринимая эти формулы как попытки их авторов создать инструмент для различного рода расчетов, мы, тем не менее (и может быть в значительной мере под влиянием высказываний Н.Е. Кондратьева относительно бесперспективности усилий, направленных на поиск универсального соотношения для достаточно надежного описания профиля продольной скорости в многочисленных морфологических ситуациях деформируемого потоком речного русла), представили имеющийся экспериментальный материал в форме, позволяющей, насколько можно, ощутить связь, с одной стороны, распределений по глубине осредненных во времени значений каких-либо характеристик с мгновенными их значениями, а с другой стороны — ощутить связь собственно мгновенных

значений скорости со структурными элементами турбулентности и прежде всего — с кинематическими характеристиками самых больших вихревых структур.

Рассматривались осредненные во времени  $\bar{U}$  и предельные (наибольшие и наименьшие)  $u_{\max}$  и  $u_{\min}$  значения продольной компоненты актуальной скорости, нормированные средней скоростью потока; осредненные во времени положительные (направленные от дна к поверхности)  $\frac{+\bar{v}}{U_{cp}}$  и отрицательные (направленные от поверхности ко дну  $\frac{-\bar{v}}{U_{cp}}$ ), а также предельные положительные и отрицательные  $\frac{\pm v_{\max}}{U_{cp}}$  значения вертикальной компоненты актуальной скорости; интенсивность турбулентности продольной и вертикальной компонент актуальной скорости.

При формировании выборок продольной и вертикальной компонент актуальной скорости использовались данные и стационарной, и скользящей фото- и киносъемки (для каждого слоя потока объем выборки составлял около 100 значений).

Типичный вид распределения перечисленных выше характеристик по глубине потока, сформированного гладким стеклянным дном и ровным шероховатым дном, приведен на рис. 3.18. Анализ довольно большого экспериментального материала, подобного представленному на рис. 3.18, обнаруживает ряд следующих характерных особенностей в распределении по глубине компонент актуальной скорости.

Размах пульсации продольной компоненты актуальной скорости, определяемый разностью  $u_{\max} - u_{\min}$  (эпюры 1 и 3 на рис. 3.18), возрастает от поверхности ко дну, достигая наибольшего значения вблизи дна.

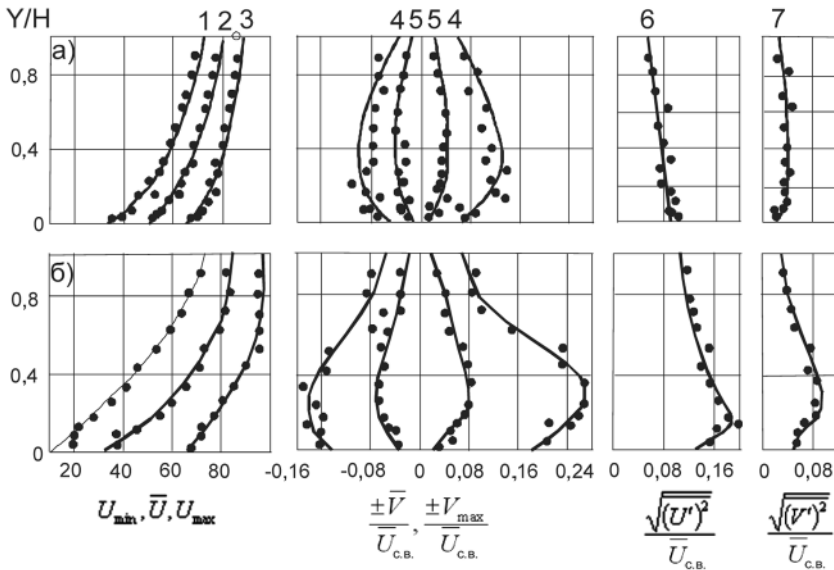


Рис. 3.18. Распределение характеристик турбулентности по глубине потока в масштабе средней скорости: а — гладкое дно; б — гравий диаметром 13–15 мм

Размах пульсации вертикальной компоненты актуальной скорости (эпюры 4 на рис. 3.18) достигает наибольших значений в слое потока, отстоящем от дна на  $(0,15-0,4)H$ ; от этого слоя вертикальная компонента убывает до близких к нулю значений на дне и до малых, но также не равных нулю значений на поверхности потока.

Интенсивность турбулентности продольной компоненты скорости (эпюра 6) возрастает (как и размах этой компоненты) от поверхности ко дну, а интенсивность турбулентности и осредненные значения вертикальной компоненты (эпюры 7 и 5) изменяются по глубине аналогично изменению ее предельных значений (эпюры 4).

Поскольку предельные значения компонент актуальной скорости являются действительными величинами, а осредненные — фиктивными, то очевидно, что именно первые (эпюры 1, 3, 4) оказывают определяющее влияние на распределение по глубине прочих характеристик: осредненных значений продольной компоненты (эпюра 2), осредненных значений вертикальной компоненты (эпюры 5) и значений интенсивности турбулентности обеих компонент (эпюры 6, 7).

В свою очередь предельные значения компонент актуальной скорости формируются в потоке самыми большими вихрями, осуществляющими массообмен в пределах всей глубины. Этот вывод иллюстрируется рис. 3.19, на котором связь предельных осредненных по глубине положительных и отрицательных значений вертикальной компоненты со средней скоростью потока представлена по данным стационарной (наибольшие в рядах значения) и скользящей (значения, приуроченные к внешним (граничным) траекториям больших вихрей) кино съемки; те и другие точки одинаково хорошо группируются около прямых графика. Оказалось также, что положительные значения примерно в 1,5 раза

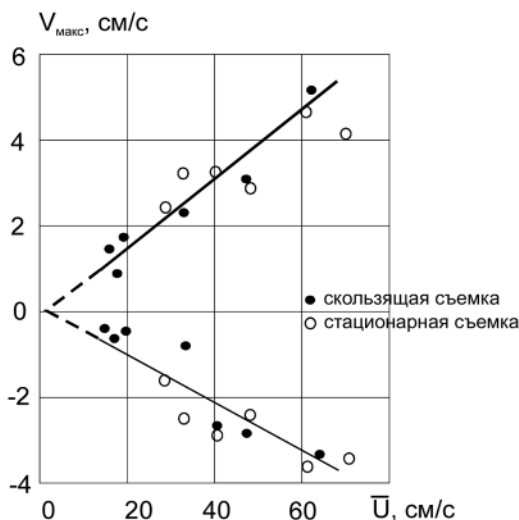


Рис. 3.19. Связь осредненных по глубине максимальных положительных и отрицательных значений вертикальной компоненты актуальной скорости со средней скоростью потока

больше отрицательных, что еще раз подтверждает вывод об асимметрии в форме больших вихрей и представление об анизотропности русловой турбулентности на уровне внешних масштабов.

Таким образом, совместный анализ материалов о скоростной структуре руслового потока, полученных с помощью стационарной и скользящей фото- и кино съемки частиц полистирола нулевой плавучести, приводит к заключению об определяющем влиянии наиболее крупных структурных кинематических элементов руслового потока на характер распределения по глубине всех статистических характеристик русловой турбулентности.

### 3.2.2.3. Оценка влияния шероховатости дна на структуру турбулентности и гидравлические характеристики потока

С этой целью была выполнена серия экспериментов, в которых практически при постоянных расходах воды, глубины и средней скорости потока (см. п. 3.2.2.1) в довольно широких пределах изменялись условия на дне: от гладкой стеклянной поверхности до гравия крупностью 13–15 мм. Кроме собственно крупности частиц исследовалось влияние окатанности их поверхности (гравий и щебень одинаковой крупности), а также — влияние процентного содержания фракций в двухфракционных смесях с одинаковым значением предельных крупностей.

Развернутая характеристика экспериментов приведена в табл. 3.2, а на рис. 3.20 — результаты, освещающие распределение характеристик турбулентности по глубине потока.

Анализ приведенных в таблице 3.2 и на рис. 3.20 экспериментальных данных, а также результатов обработки многочисленных кинокадров скользящей кино съемки с зафиксированными на них структурными элементами турбулентности обнаруживает следующие изменения в гидравлических характеристиках и кинематической структуре потока с увеличением шероховатости дна.

- Возрастает дефицит осредненных значений продольной компоненты скорости и градиент профиля осредненных скоростей, что является следствием увеличивающегося молярного обмена.

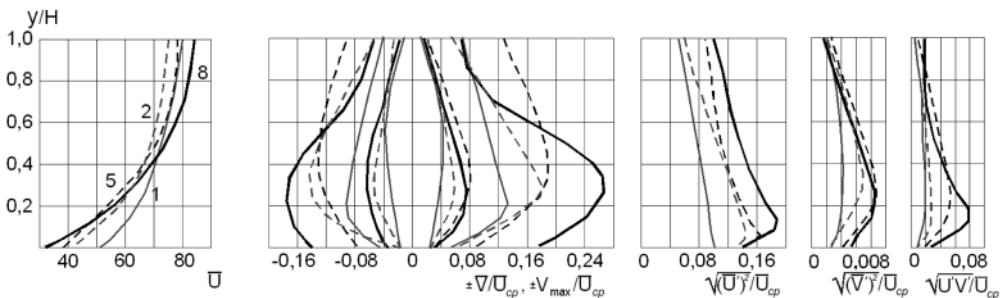


Рис. 3.20. Сопоставление эпюр распределения по глубине характеристик турбулентности.

1, 2, 5, 8 — номера опытов



Таблица 3.2.  
Основные гидравлические характеристики опытов

№ опытов	Характер дна	Расход воды, Q, л/с	Глубина потока, H, см	Скорость потока, U, см/с	Уклон свободной поверхности	Число Фруда $Fr = \frac{\sqrt{gH}}{v}$	Относительная гладкость $\frac{d_{ср.}}{H}$	Динамическая скорость $U_* = \sqrt{gHI}$ , см/с	Температура воды, t°С	Кинематический коэффициент вязкости, $\nu$ , см <sup>2</sup> /с	Число Рейнольдса	
											$Re_H = \frac{\bar{u}H}{\nu}$	$Re_{*d} = \frac{V_*d}{\nu}$
1	Гладкое	5,85	5,10	55,15	0,0034	0,78	—	4,12	15	0,011	25569	—
2	Гравий d=1–5 мм	5,85	5,17	54,47	0,0067	0,77	16,15	5,83	13	0,012	23467	155
3	Гравий d=3–5 мм	5,85	5,05	55,71	0,0079	0,79	12,62	6,25	15	0,011	25545	182
4	Гравий d=9–11 мм	5,85	5,20	54,09	0,0095	0,76	5,20	6,96	13	0,012	23439	580
5	Щебень d=9–11 мм	5,85	5,15	54,61	0,0080	0,77	5,15	6,35	13	0,012	23467	529
6	Гравий d=5–15 мм	5,85	5,15	54,62	0,0075	0,77	5,15	6,15	13	0,012	23433	512
7	Гравий d=13–15 мм	5,85	5,05	55,80	0,0100	0,79	3,61	7,04	15	0,011	25609	980
8	Гравий d=5–7 (67 %), 13–15 (33 %)	5,85	5,12	55,10	0,0130	0,78	—	8,07	11	0,012	23509	—
9	Гравий d=5–7 (33 %), 13–15 (67 %)	5,85	5,08	55,34	0,0096	0,78	—	6,91	12	0,012	23427	—

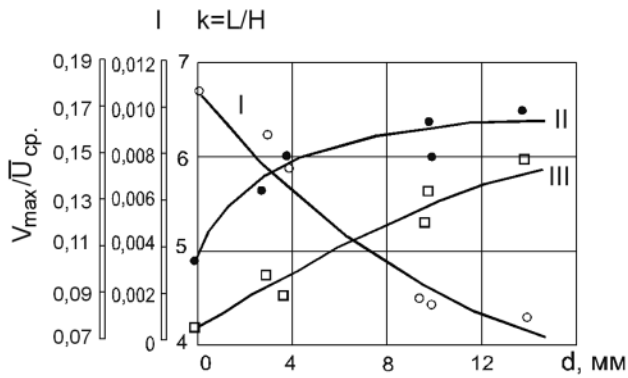


Рис. 3.21. Зависимость относительного продольного размера крупномасштабных элементов (I), уклона поверхности потока (II) и относительного значения вертикальной компоненты (III) от диаметра наносов (шероховатости дна)

- Возрастает размах пульсаций продольной и вертикальной компонент скорости, связанный с движением больших вихрей.
- Уменьшается продольный масштаб (или шаг) больших вихрей.
- Возрастает гидравлический уклон потока.

Применительно к условиям данного эксперимента эти выводы иллюстрируются рис. 3.21, при рассмотрении которого выявляется логическая связь интегральных характеристик потока (гидравлический уклон) с его актуальными и локальными характеристиками (предельные значения продольной и вертикальной компонент скорости), формируемыми крупномасштабной частью турбулентной структуры (большие вихри): с ростом шероховатости дна происходит одновременное увеличение массообмена в больших вихрях и их общего числа на единицу длины потока, что в совокупности вызывает рост потерь энергии, проявляющийся в возрастающем уклоне потока.

Как в условиях гладкого дна, так и при различной шероховатости проявляется зависимость формы структурных элементов от их размера: наибольшую вытянутость в продольном направлении имеют большие вихри с вертикальным размером  $(0,8-1,0)H$ , а форму, близкую к кругу, — малые вихри с вертикальным размером  $(0,05-0,2)H$ .

Степень окатанности частиц, слагающих дно, незначительно влияет на характеристики турбулентности (рис. 3.20). Поскольку эта оценка выполнена для условий течения в лотке с крупнозернистым донным материалом (гравий и щебень размером 13–15 мм, т. е. при относительной шероховатости около 0,28), можно ожидать, что этот вывод тем более справедлив в условиях меньшей относительной шероховатости, которые обычны в лабораторной и натурной русловой практике.

Сравнение двухкомпонентных смесей с вариацией «скелета» и «заполнителя» ( $d=13-15$  мм — 67 %,  $d=5-7$  мм — 33 % и  $d=13-15$  мм — 33 %,  $d=5-7$  мм — 67 %) обнаруживает существенные изменения и в распределении по глубине, и в численных значениях всех приведенных на рис. 3.20 характеристик турбулентности.

С учетом влияния шероховатости граничной поверхности на форму больших вихрей зависимость для определения их шага может быть записана в виде [114]:

$$L = kH. \quad (3.4)$$

Здесь  $k$  — коэффициент, зависящий от относительной шероховатости и изменяющийся от 6,7 для гладкого стеклянного дна до 4,0 при  $d/H = 0,28$ .

Используя гипотезу «замороженной турбулентности», получим зависимость для периода больших вихрей:

$$T = \frac{L}{\overline{U}_{cp}} = \frac{kH}{\overline{U}_{cp}}. \quad (3.5)$$

Здесь  $\overline{U}_{cp}$  — средняя по глубине (переносная) скорость потока.

К.В. Гришанин получил формулу, теоретической основой которой является предположение о зависимости периода больших вихрей от темпа их генерации и от поперечного размера потока. Формула имеет вид:

$$T = \frac{H}{\overline{U}_{cp}} \left( \frac{C^2}{g} \right)^{1/3}. \quad (3.6)$$

Линейный масштаб больших (глобальных по Гришанину [71]) вихрей определяется выражением:

$$L = T\overline{U}_{cp} = H \left( \frac{C^2}{g} \right)^{1/3}. \quad (3.7)$$

Хотя зависимости (3.6) и (3.7) получены теоретически, а (3.4) и (3.5) — строго эмпирическим путем, они имеют одинаковую структуру. Для использования зависимостей (3.6) и (3.7) нужно знать величину коэффициента Шези —  $C$ , а для использования зависимостей (3.4) и (3.5) — значение коэффициента  $k$ . Поскольку остальные характеристики в этих зависимостях одинаковы, то оче-

видно, что  $k = \left( \frac{C^2}{g} \right)^{1/3}$ .

Так как большие вихри имеют определяющее значение в структуре русловой турбулентности и, вместе с тем, как уже отмечено, являются относительно более устойчивыми и упорядоченными элементами этой структуры, имеет смысл именно с ними связывать величину числа Струхалья, значения которого в этом случае составляют в среднем около 0,2, изменяясь (в зависимости от условий на граничной поверхности в приведенном выше диапазоне) от 0,15 до 0,25.

#### 3.2.2.4. Сопоставление лабораторных данных с натурными

Некоторые свойства двумерной структуры русловой турбулентности, установленные в лабораторных исследованиях, оказалось возможным сравнить с соответствующими характеристиками натурального речного потока. Сравнивались периоды больших (с вертикальным размером, близким к глубине) вихрей. Однако,

поскольку примененный в лаборатории кинематографический метод регистрации структуры потока в вертикальной его плоскости не мог быть по очевидным причинам применен на реке, сравнение периодов больших вихрей прежде всего было сделано опосредованным путем, исходя из следующих соображений.

Известно, что, когда донные гряды находятся в согласованном состоянии с речным потоком (т. е. их параметры соответствуют гидравлическим характеристикам потока), на поверхности потока возникают мощные возмущения бугристой формы и очень сложной внутренней структуры, сильно насыщенные наносами. Это массы воды, выбрасываемые потоком к поверхности из подвалев гряд. Механизм этого явления связан, по-видимому, с неустойчивостью водоворотной области подвала, состояние которой в конкретные моменты времени определяется гидродинамической ситуацией в транзитной зоне потока, т. е. зависит от его нестационарности. Как установлено выше, поток представляет собой цепочку больших вихрей, движение которых вызывает наибольшие колебания скорости и гидродинамического давления и тем самым — поддерживает крупномасштабную нестационарность на определенном статистическом уровне.

Под воздействием крупномасштабной нестационарности транзитного потока водоворотная область подвала должна последовательно испытывать то избыточное (пригрузка), то недостаточное (обезвешивание) давление. В моменты обезвешивания вода, заполняющая область подвала в виде сателитного водоворота, утрачивает устойчивость и, пронизывая транзитный поток, достигает его поверхности. Вместе с этой водой в толщу потока выбрасываются (на разную высоту и вплоть до его поверхности) наносы, составляющие подвалев гряды.

Представляется, что в описанном явлении заключено физическое существо и молярного обмена, и механизма гидравлического сопротивления, и механизма выведения наносов из состояния покоя, распределения их по глубине и движения их в турбулентном потоке.

Если описанный механизм явления близок к действительному, то логично допустить близость значений периодов больших вихрей и периодов возмущения поверхности потока. Наблюдения Ю.М. Корчохи [154] за возмущениями поверхности потока на р. Поломети (при определенной глубине и скорости потока над гребнями хорошо развитых гряд) показали, что их период составляет в среднем около 8 с, изменяясь в пределах экспериментального участка русла от 5 до 10 с.

Расчетные значения периодов больших вихрей, полученные с помощью соотношений (3.4)–(3.7) для тех же гидравлических условий на Поломети, составили в среднем около 8 с, что практически совпадает с результатами наблюдений Корчохи. Заметим, что позже подобные оценки выполнялись и по другим рекам, меньшим и значительно большим, чем Полометь, и во всех случаях период возмущений на свободной поверхности потока оказывался в хорошем согласии с периодом больших вихрей.

По материалам измерений продольной компоненты скорости на Поломети стандартной гидрометрической вертушкой по методике, описанной в п. 3.2.1, были построены эмпирические графики автокорреляционных функ-

**Таблица 3.3. Периоды крупномасштабной пульсации скорости на р. Полонети (по измерениям в половодье 1970 г.)**

N точек на вертикали	Напорный склон гряды		Гребень гряды		Подвалье гряды	
	$h$ , м	$T_p$ , с	$h$ , м	$T_p$ , с	$h$ , м	$T_p$ , с
1	0,15	13	0,15	6,0	0,15	—
2	0,45	4,4	0,25	4,7	0,45	10,2
3	1,64	3,5	0,64	4,0	0,65	4,9
4	—	—	1,44	3,3	0,80	4,4
5	—	—	—	—	1,89	3,5

Примечание:  $h$  — расстояние от точки измерений до дна, м;  $T_p$  — период, соответствующий второму максимуму автокорреляционной функции  $R(u_1 u_2)_t$ .

ций  $R(u_1 u_2)_t$  и определены периоды крупномасштабной пульсации как время, соответствующее второму максимуму на графиках этих функций. Графики  $R(u_1 u_2)_t$  были построены для разных точек по глубине потока на вертикалях, приуроченных к напорному склону, гребню и подвалью гряды. Результаты оценки приведены в табл. 3.3.

Данные этой таблицы свидетельствуют об изменчивости периода  $T_p$  по глубине, что является следствием определения его из автокорреляционной функции. Вместе с тем эти данные вполне удовлетворительно согласуются (с учетом сложности граничных условий и несовершенства измерительного средства) с размерами больших вихрей, определенными с использованием зависимостей (3.4) и (3.6). Среднее значение периода  $T_p$  в точках, приуроченных к придонной зоне потока над напорным склоном и гребнем гряды (точки 1) и над водоворотной областью подвалья (точка 3), составляет около 8 с, а рассчитанное по зависимости (3.4) при средней скорости над гребнем гряды 1,0 м/с, глубине над гребнем 1,5 м и  $k=4$  около 6 с, что свидетельствует об удовлетворительной сходимости результатов оценок и дает основание считать большие вихри транзитной зоны потока ответственными за появление примерно с таким же периодом возмущений на свободной поверхности потока.

По материалам измерений на р. Полонети в половодье 1970 г. были построены эпюры распределения по глубине различных характеристик продольной компоненты скорости (рис. 3.22) [247].

На рис. 3.22 видно, что хотя на каждой вертикали есть определенная специфика в распределении характеристик по глубине, обусловленная влиянием конкретного участка гряды (напорного склона, гребня, подвалья), вместе с тем четко обнаруживается закономерность, свойственная и потоку в стеклянном призматическом лотке: размах пульсации, определяемый наибольшими и наименьшими значениями продольной компоненты актуальной скорости, увеличивается от поверхности ко дну, формируя соответствующий профиль и осредненных скоростей, и такой интегральной характеристики турбулентности, как среднеквадратичные отклонения скорости.

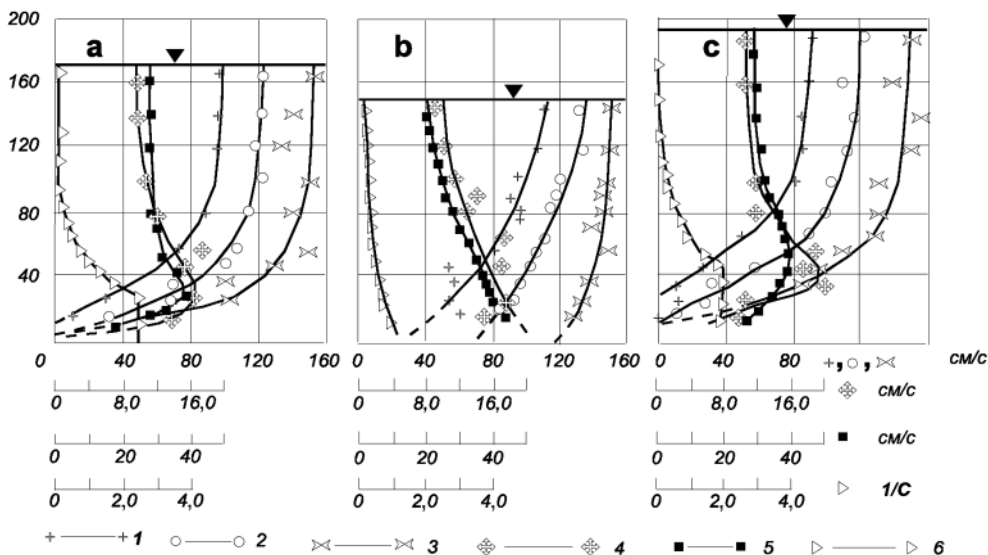


Рис. 3.22. Распределение характеристик турбулентности по глубине речного потока:  
 1 – минимальные; 2 – осредненные; 3 – максимальные значения скорости; 4 – среднеквадратичные отклонения скорости; 5 – размах пульсаций; 6 – градиент осредненной скорости.  
 а – напорный склон; б – гребень; с – подвалье гряды

Таким образом, один из основных результатов лабораторного исследования турбулентности руслового потока проявился и в натуральных измерениях продольной составляющей актуальной скорости: ведущая роль в формировании распределения по глубине интегральных характеристик турбулентности принадлежит предельным актуальным значениям скорости, частота появления которых связана с образованием и движением в потоке больших вихрей, а величина существенно зависит от состояния граничной поверхности.

Другим важным выводом, следующим из сравнения результатов лабораторных и натуральных измерений, является подтверждение «одинаковости» некоторых свойств структуры турбулентности малых и больших русловых потоков. Этот вывод, с одной стороны, свидетельствует еще раз о правомерности и эффективности примененных в лабораторных экспериментах методов исследования и измерения (в частности, метода скользящей киносъемки), а с другой стороны — подсказывает возможность существования полного кинематического подобия (или полного подобия структуры русловой турбулентности, по крайней мере в крупномасштабных ее элементах) и ориентирует на поиск того инструмента, с помощью которого было бы возможно объединение результатов, полученных в самых разных граничных условиях.

Фидман предложил использовать в качестве масштаба пульсационных скоростей динамическую скорость [275]. Но прежде чем обратиться к этому инструменту, нами была предпринята попытка измерения в натуральных, а затем и в лабораторных условиях всех трех компонент актуальной скорости, т. е. — попытка установления трехмерной структуры русловой турбулентности.

### 3.2.3. Трехмерная структура русловой турбулентности

Трехмерность структуры русловых потоков очевидна. Теоретически она описывается уравнениями гидродинамики, а непосредственно наиболее четко обнаруживается наблюдениями подкрашенного течения на повороте русла (опыты Миловича [184], Гончарова [68]). Характеризуя структуру течения в прямолинейном призматическом русле, Великанов назвал его продольно-винтовым [43], подчеркивая тем самым его трехмерность.

Однако измерения характеристик трехмерного течения до недавнего времени ограничивались в основном лабораторными данными (частично о них упоминается в п. 3.1.2).

В Русловой лаборатории ГГИ был создан прибор для измерения всех трех компонент актуальной скорости в натуральных условиях [94], что позволило существенно пополнить арсенал экспериментальных данных в расширенном диапазоне граничных условий, в которых формируется трехмерный русловой поток.

#### 3.2.3.1. Распределение продольной, вертикальной и поперечной компонент актуальной скорости по глубине потока

Измерения вектора актуальной скорости, выполненные на реках Гороховка, Вычегда, Полометь и на канале Шават, дали достаточно большой экспериментальный материал, анализ которого позволил установить следующее.

Распределение по глубине предельных значений продольной компоненты скорости имеет в общем такой же характер, как и в лабораторных лотках (рис. 3.23).

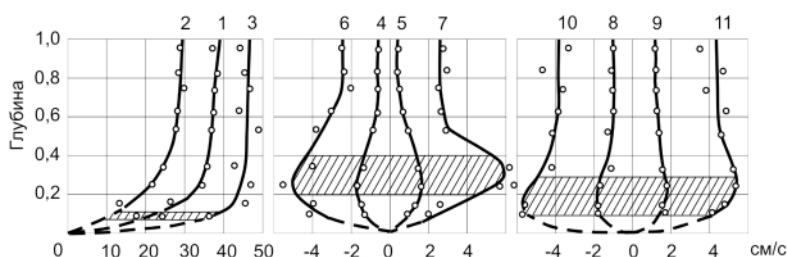


Рис. 3.23. Распределение продольной, вертикальной и поперечной компонент скорости по глубине потока (р. Полометь, половодье 1980 г.)

Аналогичен лабораторным результатам и общий характер распределения по глубине вертикальной компоненты: максимум осредненных и предельных значений наблюдается в слое потока, отстоящем на  $(0,15-0,4)H$  от дна. Вместе с тем отмеченное в п. 3.2.2.3 соотношение предельных положительных и отрицательных значений вертикальной компоненты, равное 1,5, натурными данными устойчиво не подтверждается. Более того, в ряде случаев отрицательные значения этой характеристики оказываются (по абсолютной величине) даже заметно большими положительных.

Объясняется это явление тем (как показало дополнительное исследование), что на результаты измерений в натуральных условиях накладывает существенный

отпечаток структура поля осредненных скоростей, которая, в свою очередь, испытывает влияние руслового рельефа. Это влияние проявляется в том, что траектории осредненных скоростей, как известно, не параллельны линии дна или свободной поверхности, но составляют с ними довольно значительный угол. В зависимости от расположения вертикали (напорный скат, гребень, подвалье гряды) этот угол может быть положительным или отрицательным.

Методика же измерений актуальных скоростей не учитывает эти особенности структуры поля осредненных скоростей (система прямоугольных координат измерительного средства ориентируется осью ординат строго по вертикали). Поэтому измеренная вертикальная компонента актуальной скорости, верно отражая общий размах пульсации, может быть несколько искажена в положительных и отрицательных значениях. Положительные значения оказываются завышенными, а отрицательные — настолько же заниженными, если направление осредненного течения образует с горизонталью положительный (т. е. расположенный в направлении течения выше горизонтали) угол, и наоборот — в случае отрицательного угла.

Учитывая эти обстоятельства, соответствующие характеристики представлялись в виде средних (полусуммой положительных и отрицательных) значений.

Распределение по глубине поперечной компоненты актуальной скорости, представленное эпюрами осредненных и предельных значений, имеет такой же вид, как и распределение соответствующих характеристик вертикальной компоненты, рис. 3.23. Здесь также обнаруживается определяющая роль предельных значений в формировании профиля осредненных значений. Вместе с тем, максимальные значения характеристик поперечной компоненты размещаются несколько ниже, в зоне (0,1–0,3) Н от дна.

В целом по глубине значения поперечной компоненты оказываются несколько большими значений вертикальной компоненты и меньшими значений продольной компоненты. Отношения  $u'^2 : w'^2 : v'^2$  в среднем по глубине (по данным измерений на р. Турунчук [70]) равны 16:1,9:1.

### 3.2.3.2. Масштаб пульсационных скоростей

Если абсолютные значения пульсационной скорости отнести к динамической скорости, то результаты измерений, полученные в разных условиях, образуют довольно тесные распределения по глубине. Первым, как отмечено выше, на это обратил внимание Фидман [275]. Позже И.К. Никитин воспользовался динамической скоростью для представления данных о вертикальной компоненте в относительных величинах [199]. Связь среднеквадратичных значений вертикальной компоненты с динамической скоростью оказалась достаточно надежной.

Нами была проверена возможность такой связи на предельных значениях актуальных скоростей.

На рис. 3.24 приведены эпюры распределения по глубине пульсационных скоростей, измеренных в лабораторном лотке и в речном потоке. Несмотря на большое различие в размерах потоков и скоростей (глубина в реке 1,8 м, а в лотке 0,1 м; скорость в реке — 0,75 м/с, а в лотке — 0,23 м/с), характер распределения по глубине и величины характерных пульсационных скоростей оказались



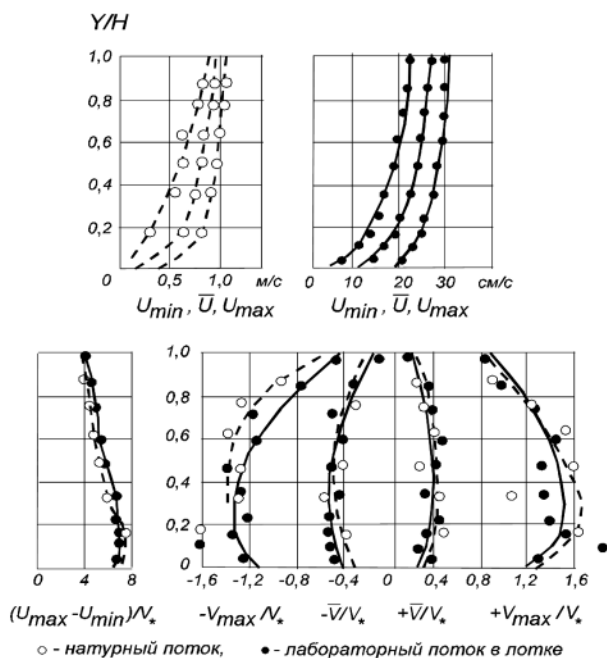


Рис. 3.24. Распределение по глубине продольной и вертикальной компонент скорости в реке ( $H=1,8\text{ м}$ ,  $\bar{U}_{cp}=0,75\text{ м/с}$ ) и в лабораторном лотке ( $H=0,1\text{ м}$ ,  $\bar{U}_{cp}=0,23\text{ м/с}$ )

(как следует из рассмотрения рис. 3.24) весьма близкими как для продольной, так и для вертикальной компонент.

Существо такой связи понятно, если принять во внимание, что динамическая скорость (или скорость турбулентного трения) характеризует именно молярный обмен в потоке. В связи с этим понятно, что эта величина является, по существу, не аргументом, а функцией, и ее значение определяется интенсивностью молярного обмена и, следовательно, пульсационными скоростями.

Однако именно в обратном варианте эта связь представляется ценной, поскольку для условий равномерного (или близкого к равномерному) потока динамическая скорость определяется простым выражением и поэтому может быть удобным инструментом для оценки пульсационных скоростей:

$$v_* = \sqrt{gHI}. \quad (3.8)$$

Здесь  $g$  — ускорение силы тяжести,  $H$  — глубина,  $I$  — гидравлический уклон.

### 3.2.3.3. Характерные значения пульсационных скоростей

По материалам натуральных и лабораторных измерений актуальных скоростей были построены графики связи различных характерных значений пульсационных скоростей всех трех компонент с динамической скоростью. На рис. 3.25 приведен пример такой связи для максимальных значений вертикальной компоненты [118].

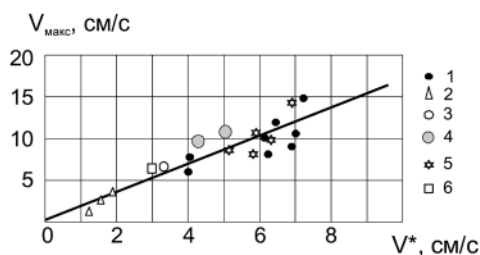


Рис. 3.25. Связь максимальных значений вертикальной составляющей скорости с динамической скоростью.

- 1 – лоток с шероховатым дном, глубина 5 см, ширина 21 см;  
 2 – лоток с ровным металлическим дном, глубина 10, 20 и 30 см, ширина 100 см;  
 3 – р. Гороховка; 4 – канал Шават, 5 – р. Полометь; 6 – р. Вычегда

Как в данном случае, так и в других, эта связь оказалась достаточно четкой и линейной, что позволило определить коэффициенты связи и построить простые соотношения, характеризующие:

— осредненный по глубине размах пульсации продольной компоненты:

$$\Delta u_{c.g.} = 5,0 v_*; \quad (3.9)$$

— осредненные во времени и по глубине положительные и отрицательные значения вертикальной компоненты:

$$\bar{v}_{c.g.} = 0,41 v_*; \quad (3.10)$$

— наибольшие осредненные по глубине положительные и отрицательные значения вертикальной компоненты:

$$v_{max\ c.g.} = 1,28 v_*; \quad (3.11)$$

— осредненные во времени и по глубине положительные и отрицательные значения поперечной компоненты:

$$\bar{w}_{c.g.} = 0,5 v_*; \quad (3.12)$$

— наибольшие осредненные по глубине положительные и отрицательные значения поперечной компоненты:

$$w_{max\ c.g.} = 1,65 v_*; \quad (3.13)$$

— наибольшие значения размаха пульсации продольной компоненты вблизи дна:

$$\Delta u_{max} = 6,8 v_*; \quad (3.14)$$

— наибольшие положительные и отрицательные значения вертикальной компоненты в зоне (0,15–0,4) Н от дна:

$$v_{max} = 1,75 v_*; \quad (3.15)$$

— наибольшие положительные и отрицательные значения поперечной компоненты в зоне (0,10–0,30) Н от дна:

$$w_{max} = 2,2 v_*. \quad (3.16)$$

Учитывая принадлежность предельных значений актуальной скорости к большим вихрям, приходим к выводу, что соотношения (3.9), (3.11), (3.13–3.16) реализуются в потоке с периодичностью, оцениваемой соотношениями (3.5) и (3.7).

Проверка соотношений (3.9)–(3.16) результатами измерений на р. Полонети на 8-и вертикалях гидроствора в целом показала удовлетворительное соответствие расчетных и измеренных значений [120]. Однако лабораторный эксперимент в лотке с очень крутыми грядами обнаружил большое расхождение измеренных и расчетных значений вертикальной и поперечной компонент, хотя по продольной компоненте получилось практически полное совпадение расчетных и измеренных значений [91]. Первоначально этот результат был объяснен исключительно особенностью граничных условий. Но позже появилась версия, в рамках которой расхождение расчетных и измеренных величин объясняется методико-техническими причинами.

#### 3.2.3.4. Трехмерная структура русловой турбулентности

Согласованность периодов продольной и вертикальной компонент была достаточно аргументирована при рассмотрении двухмерной модели русловой турбулентности. Согласованность периода поперечной компоненты с продольной и вертикальной подтверждается наличием значительного «всплеска» на одномерных частотных спектрах, соответствующего одной и той же частоте для всех трех компонент и продольному масштабу больших вихрей около  $4,0 H$  (измерения на р. Турунчук в 1984 г.) [70]. Подобные же «всплески» на спектрах всех трех компонент были обнаружены измерениями на Полонети при безгрядовой форме дна [120]. Один из них соответствовал в данном случае вихрям с продольным размером около  $7,0 H$ , т. е. именно большим вихрям, с которыми связаны предельные значения пульсационных скоростей.

Если цикличность колебаний компонент актуальной скорости примерно одинакова, то с учетом продольно-винтового характера движения воды в граничных областях больших вихрей их поперечный размер можно в первом приближении оценить соотношением осредненных по глубине максимальных значений поперечной и вертикальной компонент скорости. Это соотношение с учетом (3.11) и (3.13) равняется 1,3. Это значит, что, если за пространственный масштаб принять глубину потока  $H$ , то поперечный размер больших вихрей составит:

$$\alpha = 1,3H, \quad (3.17)$$

или в более общем виде:

$$\alpha = mH, \quad (3.18)$$

где  $m$  — коэффициент, учитывающий условия на граничной поверхности, аналогично коэффициенту  $k$  в зависимости (3.4).

Из (3.17) и (3.18) следует, что речной поток при ширине, превосходящей глубину, должен состоять из некоторого числа макроструй, в пределах которых формируются прежде всего макровихри.

В одной из своих статей В.М. Маккавеев отмечал, что рельеф речного русла есть отпечаток структуры турбулентного потока. Это же имел в виду и Н.Е. Кондратьев, указывая на связь микроформ речного дна с макротурбулентностью руслового потока. Принимая во внимание эти положения, отметим, что полученные нами и приведенные в этом разделе результаты оказались полезными в последующих наших попытках развития физически логичной методики воспроизведения руслового процесса на деформируемых моделях участков рек, особенно — участков равнинных рек. О возникающих в этом направлении проблемах и способах их преодоления рассказывается в главе 4.

## **ЛАБОРАТОРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ МЕТОДИЧЕСКИХ ПРОБЛЕМ МОДЕЛИРОВАНИЯ РЕЧНЫХ РУСЕЛ НА ГИДРАВЛИЧЕСКИХ ДЕФОРМИРУЕМЫХ МОДЕЛЯХ**

В силу недостаточной изученности руслового процесса даже на качественном уровне и отсутствия строгих математических методов и уравнений, описывающих количественные стороны этого сложного явления, методика и практика гидравлического моделирования речных потоков и руслового процесса с использованием жестких и деформируемых моделей речных русел далеки от совершенства. Дальнейшее развитие теории руслового процесса и методики его моделирования требует исследования многих еще не изученных сторон этого явления.

Ниже представлена краткая информация о методических исследованиях по воспроизведению и изучению в лабораторных условиях русел рек с различным типом руслового процесса, выполненных за рубежом и в России, а также различных аспектов и деталей механизма взаимодействия руслового потока с подстилающей сыпучей средой и подрусловым потоком, выполненных в Русловой лаборатории ГГИ с целью усовершенствования и учета при формулировании и обеспечении на гидравлических деформируемых моделях речных русел условий подобия, более полных по сравнению с уже известными условиями.

### **4.1. Воспроизведение типов руслового процесса в лабораторных условиях**

В гидравлических лабораториях мира вот уже более 100 лет продолжают попытки экспериментального воспроизведения русел рек различного типа. Цель этих исследований — изучение условий образования и механизма функционирования речных русел с различным типом руслового процесса. Такие исследования позволяют подробно изучать в лабораторных условиях причины и особенности формирования того или иного типа руслового процесса и присущие конкретному типу структуру руслового потока, формы руслового рельефа, характеристики транспорта руслового материала и режим русловых деформаций в условиях естественного водного режима или разнообразных инженерных воздействий на водный и русловой режимы и на естественный ход развития руслового процесса.

Краткую сводку наиболее интересных экспериментальных исследований по воспроизведению типов руслового процесса в лабораторных условиях представляется целесообразным начать с опытов по меандрированию речных русел.

#### **4.1.1. Опыты зарубежных и отечественных авторов**

*Опыты Н.Ф. Фридкина.* Н.Ф. Фридкиным в Виксбургской лаборатории США был выполнен большой цикл экспериментов по воссозданию в лабораторных

условиях русла меандрирующего типа [238, 342]. Русловая площадка имела размеры  $40 \times 4$  м. В экспериментах использовался песок р. Миссисипи крупностью  $0,1-0,3$  мм. Расход воды и уклоны дна русла соответственно менялись в пределах  $0,6-0,8$  л/с и  $0,005-0,01$ .

В опытах изучались условия, при которых расход воды, подаваемой в заранее подготовленную прямолинейную прорезь ( $0,5 \times 0,09$  м) трапецеидального сечения, формировал русло меандрирующего типа. В различных сериях экспериментов этот процесс изучался в условиях постоянного расхода воды без наносов, постоянного расхода воды с наносами и в условиях искусственного изгиба в начале экспериментальной прорези; отдельно при различных расходах воды, а также при переменном расходе воды (гидрографе).

На рис. 4.1 в качестве примера приведены фотографии экспериментального русла, сформированного в результате пропуска трех различных расходов воды (1,4; 2,8 и 4,2 л/с) при прочих равных условиях. Из этого рисунка видно, что с увеличением расхода воды размеры меандра увеличиваются.

Следует отметить, что все фотографии, сделанные Фридкиным для иллюстрации результатов его экспериментов, были получены после спуска воды с модели, при уменьшенном расходе воды и обнаженных русловых формах — побочнях. Это означает, что в опытах Фридкина исследовалось не меандрирующее русло, а побочное, а извилистое русло представляло собой внутрирусловой меженный тальвег, который изменялся в соответствии с развитием и движением побочней при руслоформирующих расходах воды. Меандрирование внешних границ русла в этих опытах получено не было.

*Опыты С.А. Шамма и Х.Р. Кхана.* В экспериментах, выполненных в Университете Колорадо США, исследовалось влияние уклона и расхода наносов на формирование в лабораторных условиях различных типов речного русла [439].

Эксперименты проводились в прямолинейном бетонном лотке длиной 30 м и шириной 7,2 м. В опытах использовался песок крупностью 0,7 мм.

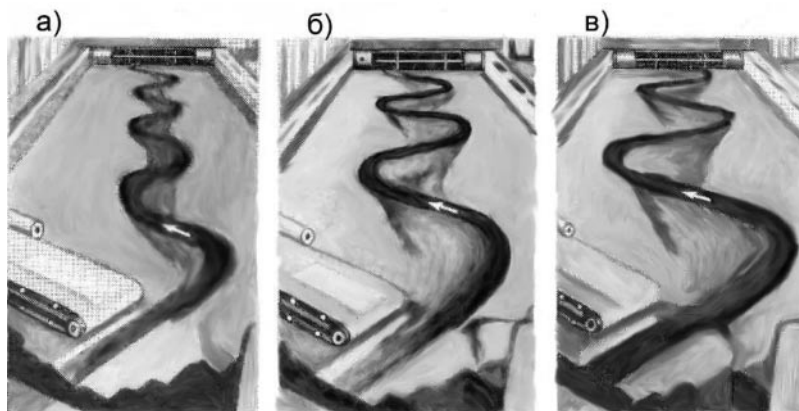


Рис. 4.1. Опыты Фридкина, иллюстрирующие влияние величины подаваемого на модель расхода на интенсивность меандрирования: а — русло, образовавшееся после 6-часового пропуска расхода воды 1,4 л/с; б — то же при расходе 2,8 л/с; в — то же при расходе 4,2 л/с

Пионерное русло (канал) прямоугольного сечения имело ширину 0,3 м и глубину 0,075 м. В опытах в начале лотка подавались наносы в количестве, необходимом для поддержания на модели постоянного уклона русла и водной поверхности. Было выполнено три серии экспериментов. В первой серии входной участок экспериментальной прорези оставался прямолинейным. В ходе опыта в русло подавался песок. Уклоны дна и относительная ширина В/Н менялись соответственно в пределах 0,0015–0,0040 и 17,3–33,5.

Во второй серии входной части экспериментальной прорези был придан угол  $40^\circ$  относительно продольной оси лотка. В поток во время опыта также подавался песок. Уклоны дна и В/Н менялись в диапазоне 0,001–0,002 и 6,8–19,7.

В третьей серии экспериментов вход в прорезь был устроен в виде излучины, а в поток вместе с песком подавались взвешенные наносы (глинистые частицы) в количестве 3 % по весу. Уклоны дна и В/Н в ходе опытов соответственно менялись в пределах 0,0026–0,0130 и 28,80–70,0. Формирование русла во всех сериях экспериментов производилось при расходе воды 4,2 л/с.

В экспериментах Шамма и Кхана, ставивших своей целью получение разных типов русла (прежде всего меандрирующего) в зависимости от расхода наносов по мере возрастания уклона дна (расхода наносов), на смену прямолинейного русла формировалось сначала русло побочного типа, которое авторами интерпретировалось как «меандрирование тальвега», а затем при больших уклонах дна (большом расходе донных наносов и числе  $Fg > 1,0$ ) оно трансформировалось в русло блуждающего типа в результате отторжения побочной от берега или их разрушения. На рис. 4.2 представлена



Рис. 4.2. Русло с меандрирующим тальвегом в экспериментах Шамма и Кхана

фотография русла с меандрирующим тальвегом. Полученная в этих экспериментах максимальная извилистость тальвега в первых двух сериях опытов Шамма и Кхана составляла 1,25, а извилистость собственно русла 1,04.

В третьей серии экспериментов с подачей взвешенных наносов на модель ставилась цель трансформировать побочни в пляжи, в результате отложения на их поверхности взвешенных наносов. По описанию авторов, в этих экспериментах глинистые наносы стабилизировали побочни. Произошло врезание русла и уменьшение его ширины. Побочни обнажились и превратились в пляжи. Сформировалось русло меандрирующего типа с коэффициентом извилистости 1,3.

Однако независимый от авторской версии анализ этих экспериментов показывает, что качественного прогресса в воспроизведении русла меандрирующего типа в лабораторных условиях экспериментами Шамма и Кхана по сравнению

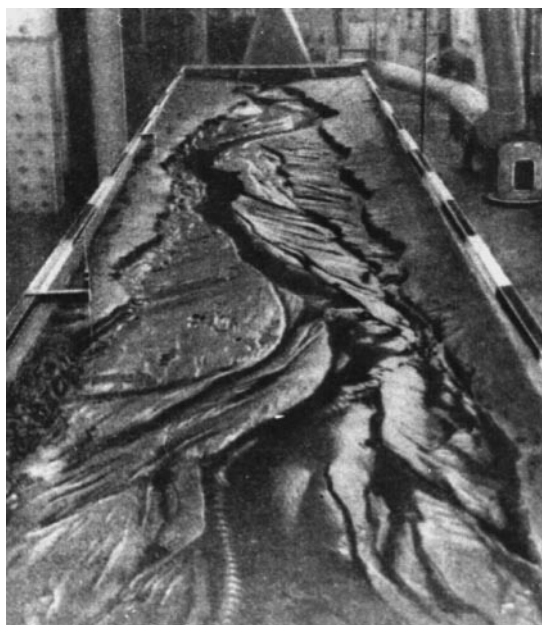


Рис. 4.3. «Микрорека», полученная в опытах Н.С. Шарашкиной

с опытами Фридкина достигнуто не было. Собственно процесс меандрирования в этих экспериментах не воссоздавался и не изучался.

*Опыты Н.С. Шарашкиной.*

В 1948–1951 гг. Н.С. Шарашкиной, под руководством М.А. Великанова, в Лаборатории русловых процессов АН СССР [238, 286] были выполнены эксперименты с целью получения в лабораторных условиях меандрирующего русла для изучения закономерностей формирования и функционирования русла этого типа.

Эксперименты выполнялись на русловой площадке длиной 15 м и шириной 2 м. Крупность наносов составляла 0,6–1,3 мм, а расход воды и уклоны дна менялись соответственно в диапазоне 0,3–1,2 л/с и 0,005–0,04.

На рис. 4.3 представлена «микрорека», полученная в опыте при уклоне дна 0,02 в результате пропуска на модели расхода воды 0,9 л/с в течение 230 ч. Первоначально дну модели придавалась форма двух пересекающихся в центральной части под углом  $170^\circ$  симметричных плоскостей с постоянным уклоном по длине модели. Наносы на модель в ходе опыта не подавались.

Полученная в эксперименте верхняя часть русла качественно напоминала меандрирование, а нижняя часть — русло блуждающего типа.

Позднее, в 1955–1957 гг., опыты по формированию типов руслового процесса в лабораторных условиях были продолжены Шарашкиной под руководством К.И. Россинского на открытой русловой площадке Звенигородской русловой станции. Эксперименты выполнялись на «русловых дорожках» — земляных лотках с гидроизоляцией, размерами от  $6 \times 30$  м до  $6 \times 60$  м [288]. Было выполнено 9 экспериментов, разделенных на 3 серии, по воссозданию рек с периодически расширяющимся руслом (по классификации К.И. Россинского и И.А. Кузьмина [234, 287]), меандрирующих и блуждающих.

Уклоны дна и расход воды в опытах изменялись соответственно в диапазоне 0,0035–0,02 и 1,0–50 л/с. Средняя крупность наносов изменялась от 0,27 мм до 0,50 мм. Формирование русла во всех опытах начиналось с прямолинейной пионерной прорези разной ширины и продолжалось в течение 26–602 часов в разных опытах. В ходе экспериментов в русло подавались наносы (донные и взвешенные). В экспериментах по воспроизведению русел с периодическим расширением поймы и берега слагались из супеси с  $d=0,27$  мм, основание берегов и дно — песком  $d=0,40$  мм.



Во всех трех сериях экспериментов для формирования русел всех типов по руслу пропускались расходы воды по ступенчатому гидрографу стока по различной схеме.

Основной вывод, полученный Шарашкиной в результате исследований, заключается в следующем. Процесс формирования русла состоит из двух стадий. Первая стадия включает период переформирования русла от прямолинейного до образования в нем побочной и протекает одинаково во всех экспериментальных руслах, независимо от расхода воды, уклона дна и гранулометрического состава наносов. Формирование типа руслового процесса во второй стадии зависит от следующих обстоятельств. Если побочни будут закреплены (в опытах это производилось посевом травы) и потеряют способность передвигаться, то будет развиваться меандрирующее русло. Если побочни сохранят способность смещаться вниз по течению, не разрушаясь, то будет иметь место периодическое расширение русла. Если побочни будут разрушаться, то русло станет блуждающим. Эти выводы, справедливые для условий выполненных Шарашкиной исследований, вызывают много вопросов при попытке их обобщения и использования в практических целях.

#### **4.1.2. Работы, выполненные в Русловой лаборатории ГГИ**

*Опыты З.М. Великановой.* Невозможность в настоящее время в лабораторных условиях получить русло меандрирующего типа с плановыми деформациями его внешних границ не является препятствием для лабораторных исследований многих других сторон этого явления. Так, известно, что величины и темпы внутрирусловых деформаций в меандрирующей реке существенно выше, чем темпы плановых перемещений русла. Это дает возможность исследовать многие аспекты взаимодействия потока и русла при фиксированных внешних границах меандрирующего русла, соответствующих различным стадиям развития речных меандр в плане.

Широкий комплекс таких исследований был выполнен З.М. Великановой в Русловой лаборатории ГГИ [44, 45]. Программа и методика этих опытов были основаны на гидролого-морфологической концепции руслового процесса [129, 132].

В предшествующих опытах различных авторов в основном изучались скоростная структура потока и рельеф водной поверхности в извилистых руслах разной кривизны [71, 75, 184, 238, 259]. При этом обращает на себя внимание тот факт, что в большинстве из известных предшествующих исследований параметр  $B/H$  имел малое значение, составляя: 4,0 в опытах А.Я. Миловича; 3,3 — в опытах Н.Ф. Данелия; 2,0 — в опытах Т.М. Прус-Часинского; 1,7 — в опытах А. Шукри; 2,8–3,3 — в опытах Н.И. Маккавеева и Б.Е. Романенко. По данным И.В. Попова, в меандрирующих реках  $B/H = 5,0–85,0$ , увеличиваясь от малых рек к большим рекам [217].

Процессы формирования рельефа русла и транспорта наносов в меандрирующих руслах в предшествующих экспериментах не исследовались. В опытах Великановой подробно изучались гидравлические характеристики и структура течений, процесс формирования руслового рельефа и его элементов (перекат,

пляж, плес), транспорт наносов в бесструктурной и структурной формах (микро-, мезоформы) и расход наносов.

Эти эксперименты были проведены в криволинейном лотке шириной 1,0 м при двух плановых положениях излучины с шагом 4,1 м и 3,2 м. Углы разворота излучин соответственно составляли  $103^\circ$  и  $179^\circ$ . Длина моделей — 21,0 и 26,4 м. Опыты проводились с песком средней крупности 0,5–0,6 мм (0,2–4,5 мм). Эксперименты выполнялись в широком диапазоне изменения гидравлических характеристик:  $Fr = 0,28–1,35$ ;  $B/H = 7,7–90,9$ ;  $Q = 2,0–60,0$  л/с;  $Q_m = 1,7–250$  г/с;  $I = 0,0015–0,0087$ .

В ходе экспериментов удалось проследить и количественно описать все детали взаимодействия потока и русла как на стадии формирования рельефа русла, так и в условиях его динамически равновесного состояния. Получен обширный материал по структуре течений, морфологии и динамике русла, режиму глубинных деформаций.

Было сделано заключение, что положение в меандрирующем русле плесов, перекатов, пляжей и размеры этих форм определяются кривизной русла, гидравликой потока (число Фруда) и параметром  $B/H$ .

На рис. 4.4 и 4.5 представлены рельеф дна, излучины свободного меандрирования и план скоростей потока соответственно при малых и больших значениях числа Фруда в опытах Великановой.

Одним из важнейших выводов по результатам этих опытов является доказательство того, что формирование дна в излучине происходит не за счет поперечного переноса частиц в результате общей циркуляции потока, а в ходе отложения у выпуклых берегов наносов, поступающих с выше расположенных участков, что приводит к оттеснению потока к вогнутому берегу и образованию плесов. Кроме того, в опытах при большой кривизне русла наблюдалось раз-

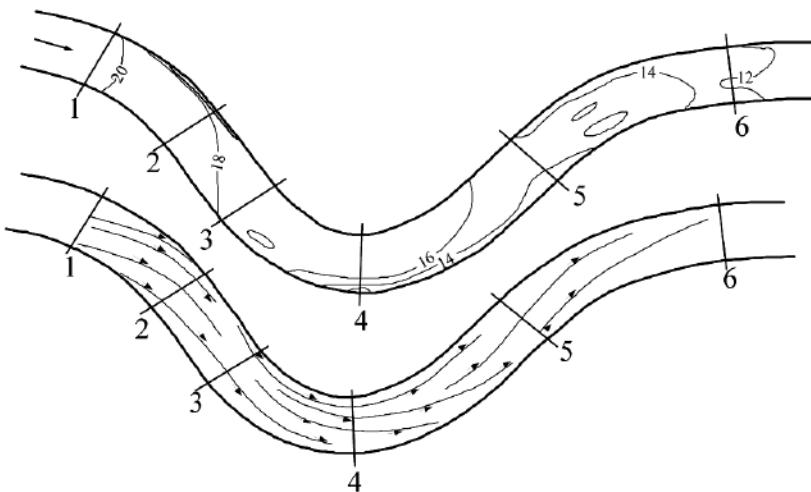


Рис. 4.4. Рельеф дна излучины свободного меандрирования и план скоростей при малых значениях числа  $Fr$  (по опытам Великановой)

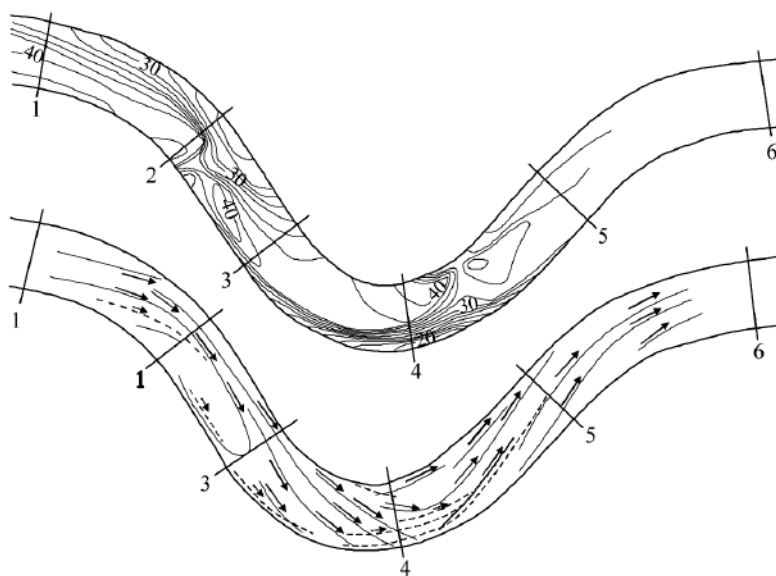


Рис. 4.5. Рельеф дна излучины свободного меандрирования и план поверхностных и донных скоростей при значительных величинах числа  $Fr$  (по опытам Великановой)

двоение плесов, что говорит в пользу гипотезы «отражения», а не «общей циркуляции потока» в извилистых руслах при значениях  $B/H > 10$ , при которых выполнялись опыты Великановой.

*Опыты В.М. Католикова.* Наиболее полные и подробные экспериментальные исследования образования и механизма функционирования русел побочного типа к настоящему времени выполнены В.М. Католиковым [109, 250]. Опыты проводились на открытой русловой площадке Русловой лаборатории ГГИ в 1980–1985 гг. В этих экспериментах исследовались причины и условия образования побочной, структура и гидравлические характеристики потока, транспорт наносов, геометрические и динамические характеристики русловых микро- и мезоформ, гидравлические сопротивления потоку.

В предшествующих исследованиях отечественных и зарубежных авторов побочный тип руслового процесса был получен либо для рек горно-предгорной зоны при числах Фруда  $0,57–1,50$  и малых значениях относительной гладкости потока, при которых воспроизводятся «чистые» мезоформы — побочки без вторичных грядовых образований (микроформ) на их поверхности, либо для условий первоначального искусственного возмущения руслового потока в результате естественного или искусственного сужения русла в начале модели (неразмываемый скальный боковой выступ берега, искусственная полузапруда, косой вход или начальный изгиб русла), а также в условиях переменного расхода воды, слоистого строения берегов и чередования расширений и сужений русла [35, 36, 133, 234, 287, 370].

Эксперименты по воспроизведению в лабораторных условиях русла побочного типа выполнялись Католиковым в бетонном гидравлическом лотке

**Таблица 4.1. Условия выполнения опытов и диапазон изменения гидравлических характеристик потока в 82-метровом гидравлическом лотке**

№ п/п	Характеристики русла и потока	Модель № 1	Модель № 2	Модель № 3	Модель № 4
1	Длина русла, м	82,0	82,0	82,0	82,0
2	Ширина русла, м	1,90	1,95	1,95	1,90
3	Глубина потока, м	0,1	0,1	0,1	0,074
4	Относительная глубина В/Н	19,0	19,5	19,5	25,6
5	Уклон дна	0,0011	0,0007	0,0017	0,0017
6	Расход воды, л/с	48,0	42,8	60,0	60,0
7	Число Фруда	0,27	0,21	0,34	0,48
8	Расход наносов, см <sup>3</sup> /с	0,56	0,21	5,0	5,0
9	Продолжительность опытов, час	830	1414	353	200



Рис. 4.6. Побочни в 82-метровом гидравлическом лотке

длиной 82,0 м и шириной 1,9 м при одном и том же составе песка при четырех гидравлических режимах, различающихся между собой расходом воды, уклоном дна и, соответственно, количеством твердого материала, подаваемого на модель в начале лотка. Средняя крупность опытного материала составляла 0,48 мм (0,16–1,03 мм). Условия выполнения экспериментов и диапазон изменения гидравлических характеристик в этих опытах Католикова представлены в табл. 4.1.

Наиболее интересные результаты исследований В.М. Католикова состоят в следующем.

В лабораторных условиях был впервые получен динамически устойчивый побочный тип руслового процесса, характерный для равнинных рек с песчаным дном, при котором транспорт донных наносов осуществляется микроформами по поверхности мезоформ — побочней (рис. 4.6).

Установлено, что причиной зарождения побочней на дне прямо-

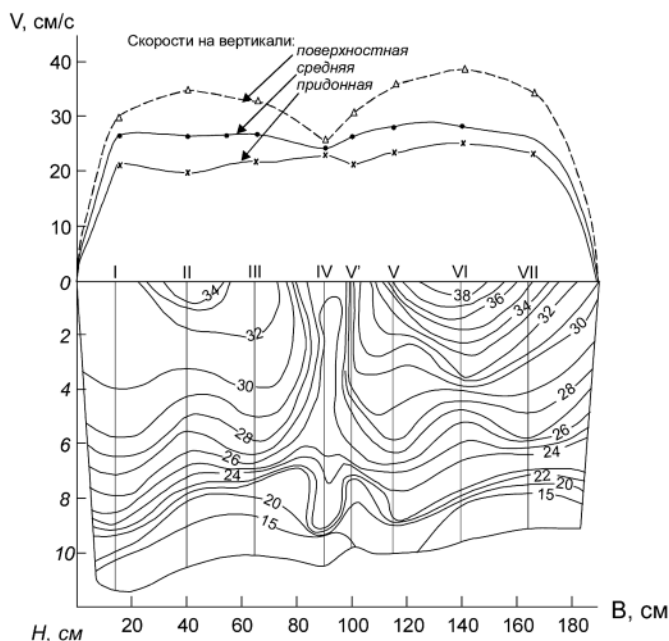


Рис. 4.7. Кинематическая структура потока на модели на первой стадии эксперимента в ств. 25 м

линейного потока являются длинноволновые колебания продольной составляющей скорости потока. Спектральный анализ составляющих скорости потока и отметок дна показал, что обнаруженные перед зарождением побочной длинноволновые колебания модуля скорости потока (16,8; 7,1 и 5,4 м) и отметок дна (17,4; 7,4 и 5,8 м) находятся в близком соответствии.

Детальные измерения поля осредненных скоростей потока в различных поперечных сечениях лотка перед возникновением побочной на модели показали, что в потоке существуют две обособленные струи, обуславливающие двухмодальные эпюры распределения скоростей потока по ширине русла (рис. 4.7).

Получена критериальная зависимость условий зарождения побочной в русле, имеющая вид:

$$Fr = 2,82 \left( \frac{B}{H} I \right)^{0,61}. \quad (4.1)$$

Выполнена экспериментальная проверка расчетной зависимости скорости перемещения мезоформ  $C_{\Delta}$  в прямолинейном или слабоизвилистом русле, установленная ранее в ГГИ [138]:

$$C_{\Delta} = 0,011 v \frac{h_r}{\Delta} Fr^3, \text{ м/с}, \quad (4.2)$$

или

$$C_{\Delta} = 950 v \frac{h_r}{\Delta} Fr^3, \text{ м/сут}, \quad (4.3)$$

где  $h_r$  — высота микроформ, а  $\Delta$  — высота мезоформы.

Сравнение расчетных величин перемещения побочной по формуле (4.3) с опытными данными приведено в табл. 4.2.

**Таблица 4.2. Результаты экспериментальной проверки формулы (4.3)**

$h_r$ , м	$\Delta$ , м	$v$ , м/с	$Fr = \frac{v}{\sqrt{gH}}$	* $C_{\Delta}$ , м/сут	Ошибка, %
0,014	0,105	0,27	0,33	1,18/1,02	15
0,010	0,085	0,20	0,26	0,39/0,37	5
0,017	0,095	0,31	0,38	2,91/2,90	0

\* числитель — расчетное значение; знаменатель — наблюдаемое

В экспериментах Католикова, в отличие от экспериментов предшествующих авторов, побочки были получены при установившемся, квазиравномерном режиме потока, в условиях отсутствия какого-либо начального возмущения потока, и возникали по всей длине модели одновременно, а не последовательно, начиная от участка искусственного возмущения потока. При этом поперечного переноса донных наносов от одного берега (борта лотка) к другому в процессе их транспорта вдоль потока не наблюдалось.

*Опыты М.М. Гендельмана.* В 1987–1988 гг. М.М. Гендельман в Русловой лаборатории ГГИ выполнил большой цикл экспериментов в 100-метровом гидравлическом стеклянном лотке шириной 1,0 м по воспроизведению русла побочного типа в широком диапазоне гидравлических характеристик потока [143]. В опытах использовался песок крупностью 0,33 мм. Расходы воды и уклоны дна менялись соответственно в пределах 5,0–15,0 л/с и 0,0012–0,0046. Глубина потока в различных опытах составляла 2,5–15,0 см. Соответственно, относительная глубина потока  $V/H$  менялась в пределах 6,7–40,0. Число Фруда в этих экспериментах изменялось в диапазоне 0,08–0,73.

Побочневый тип руслового процесса был получен при пяти разных гидравлических режимах потока (сочетаниях уклона дна и расхода воды).

Во всех опытах в условиях подачи наносов расходом, соответствующим динамически устойчивому состоянию потока и русла, довольно быстро устанавливался грядовой режим транспорта донных наносов и далее формировался побочневый рельеф дна с микроформами на поверхности побочной (рис. 4.8). Каждый эксперимент для получения устойчивых побочной установившегося профиля требовал длительного времени. Во всех экспериментах то состояние водной поверхности, которое устанавливалось сравнительно быстро с возникновением микроформ-гряд, в дальнейшем, по мере возникновения и развития побочной, не претерпевало изменений. Отсюда был сделан вывод о том, что мезоформы типа побочной не являются дополнительным источником гидравлических сопротивлений по сравнению с грядовой шероховатостью дна.

*Опыты А.Б. Клавена и В.Н. Коковина.* В экспериментах Клавена и Коковина (2008 г.) исследовалось образование побочного типа руслового процесса в реках горно-предгорной зоны при малых значениях относительной гладкости потока  $H/d$ , когда на поверхности побочной транспорт донных наносов осуществ-

вляется в бесструктурной форме, т. е. без образования микроформ [152].

Опыты были выполнены в 8-метровом стеклянном лотке шириной 0,21 м. В экспериментах использовался песок в диапазоне крупности частиц 0,5–2,0 мм со средневзвешенным диаметром 0,98 мм. Состав экспериментального материала состоял из трех основных компонентов: 0,5–0,7 мм (10 %); 0,7–1,00 мм (65 %) и 1,0–2,0 мм (25 %).

Гидравлические условия выполнения экспериментов и соответствующие им расчетные натурные условия в геометрическом масштабе 1:100 представлены в табл. 4.3.

В табл. 4.4 представлены морфометрические и динамические характеристики побочней, полученных в этих экспериментах (рис. 4.9).

Далее в экспериментах исследовалось влияние расчисток побочней на пропускную способность русла во время половодий и паводков. Была выполнена расчистка двух побочней. Протяженность образовавшегося карьера составила 2,4 м (240 м натуре), а глубина изъятия грунта 2,5 см (2,5 м натуре). Эксперименты показали, что выемка аллювия из русла в объеме двух смежных побочней не сказывается на пропускной способности русла, не вызывает понижения уровня воды и не решает проблемы защиты прирусловой (пойменной или иной) территории от затопления паводочными водами.

Время занесения карьера и восстановления побочневого рельефа русла в описанном опыте составило соответственно 73 и 193 минуты (12,1 и 32,2 часа натуре).

Как следует из этого примера, после воспроизведения в лабораторных условиях тех или иных типов руслового процесса на этих моделях можно изучать и решать практические задачи, связанные с конкретным типом руслового процесса. В данном случае исследовались влияние (эффективность) расчисток побочней на пропускную способность русла и возможность понижения уровня воды с целью защиты от паводков прибрежных территорий, а также режим расхода и сток донных наносов при заданных гидравлических характеристиках потока.

Можно привести и другие подобные примеры из практики Русловой лаборатории ГГИ.



Рис. 4.8. Побочневый тип руслового процесса (опыты М.М. Гендельмана) в 100-метровом гидравлическом лотке

Таблица 4.3.

## Гидравлические условия опытов в 8-метровом экспериментальном лотке

	Масштабные коэффициенты		Численные значения гидравлических характеристик	
	символ	значение	лаборатория	натура
Линейные характеристики потока				
Глубина	$\alpha_H$	100,0	1,0 см	1,0 м
Ширина	$\alpha_B$	100,0	20,0 см	20,0 м
Длина	$\alpha_L$	100,0	8,0 м	800,0 м
Гидравлические характеристики потока				
Уклон дна	$\alpha_I$	1,0	0,008	0,008
Крупность руслового материала Диапазон изменения Средневзвешенный диаметр	$\alpha_d$	100,0	0,5–2,0 мм 0,98 мм	5,0–20,0 см 9,8 см
Расход воды	$\alpha_Q = \alpha_H^{5/2}$	100 000	0,75 л/с	75 м <sup>3</sup> /с
Скорость потока $Fr = \frac{v}{\sqrt{gH}}$	$\alpha_v = \sqrt{\alpha_H}$	10,0	37 см/с	3,7 м/с
Относительная ширина русла В/Н	$\alpha_{В/Н}$	1,0	20,0	20,0
Число Фруда,	$\alpha_{Fr}$	1,0	0,79–0,92	0,79–0,92
Коэффициент Шези	$\alpha_C$	1,0	41,1 м <sup>1/2</sup> /с	41,1 м <sup>1/2</sup> /с
Масштаб времени морфологических и гидравлических процессов	$\alpha_t = \sqrt{\alpha_H}$	10,0	1 час	10 часов
Расход донных наносов	$\alpha_{Q_r} = \alpha_H^{5/2}$	100 000	0,73 см <sup>3</sup> /с	0,073 м <sup>3</sup> /с
Относительная гладкость потока Н/d	$\alpha_{Н/d}$	1,0	20,0	20,0

Таблица 4.4. Морфометрические и динамические характеристики лабораторных и природных побочней

	Длина		Высота		Скорость перемещения побочней	
	лаборатория	натура	лаборатория	натура	лаборатория	натура
Средняя	120,0 см	120,0 м	0,82 см	0,82 м	0,85 мм/с	30,6 м/ч
Максимальная	150,0 см	150,0 м	1,2 см	1,20 м	1,1 мм/с	39,6 м/ч
Минимальная	90,0 см	90,0 м	0,45 см	0,45 м	0,6 мм/с	21,6 м/ч

Так, в экспериментах Г.Г. Месерляна, имеющих своей целью разработку рекомендаций по рациональному проектированию русловых карьеров в речных излучинах, путем использования методики и результатов исследований З.М. Великановой на модели речной излучины, изучалось влияние русловых



карьеров разных размеров (полная ширина русла, половина ширины), расположенных в различных частях русла (перекат, пляж, вершина излучины), на гидравлические характеристики потока, русловые деформации, характеристики транспорта наносов и процесс занесения карьера наносами, а также время восстановления морфологического строения русла [182, 183].

На схематической модели русла с поймой при ограниченном меандрировании Н.С. Знаменской и М.М. Филаретовой были выполнены экспериментальные исследования гидравлики потока и формирования рельефа русла и поймы. Были подробно исследованы механизм затопления пойменного массива, структура течений на пойме при различных фазах половодья, формирование руслового рельефа, вынос донных наносов на пойму и формирование на ней береговых валов [99, 100].

Некоторые деформируемые модели Русловой лаборатории ГГИ, помимо их основного назначения, были использованы для детального изучения закономерностей и механизма формирования гранулометрического состава донных отложений в речных руслах, а методика и результаты описанных выше опытов Католикова были применены для специального изучения гидравлических сопротивлений и пропускной способности русла с побочным типом руслового процесса.

Результаты этих исследований изложены соответственно в главах 5 и 6 настоящей монографии.

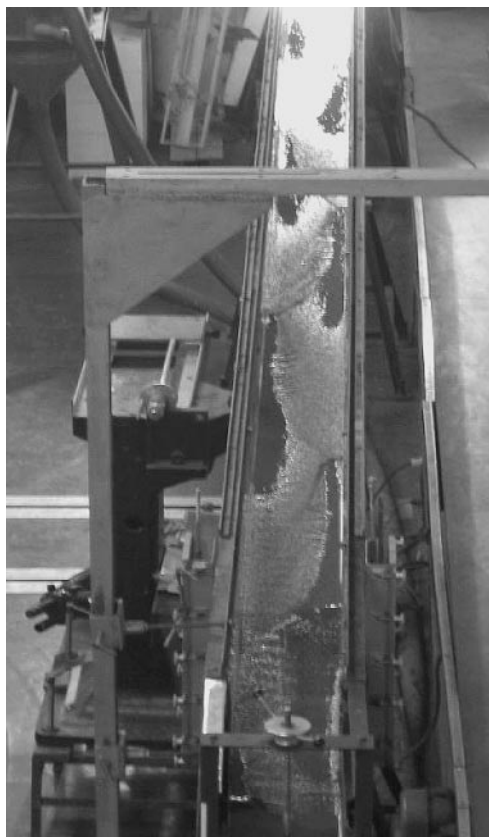


Рис. 4.9. Побочни в 8-метровом гидравлическом лотке. Вид против течения

## 4.2. Физические предпосылки моделирования участков рек на гидравлических деформируемых моделях

Многолетний опыт работы авторов на гидравлических жестких моделях речных русел свидетельствует о том, что выполнение условий:

$$Re_M > Re_{кр}, \quad (4.4)$$

$$Fr \cong idem, \quad (4.5)$$

оказывается достаточным, чтобы рассчитывать на удовлетворительную работу модели в части подобия осредненных характеристик потока: распределения глубин и скоростей потока поперек и вдоль русла, распределения расходов воды по рукавам и частных расходов в однорукавном русле, распределения продольных и поперечных уклонов поверхности потока.

Однако при этом в значительном числе случаев для выполнения условия (4.4) приходится масштаб глубин назначать более крупным по сравнению с плановым, тем самым искажая в целом форму русла и детали его рельефа. И почти всегда для выполнения условия (4.5) приходится задавать модели дополнительную искусственную шероховатость, тем большую, чем больше генерализован (усреднен) действительный рельеф речного русла и чем больше мера несоответствия горизонтального и вертикального масштабов, т. е. искажение моделируемого участка реки. Этой операцией достигается подобие модели и природы по гидравлическому сопротивлению. При этом размеры шероховатости устанавливаются путем подбора, т. е. последовательным приближением глубин и уклонов модельного потока к расчетным значениям.

Усложнение задачи исследований на жесткой гидравлической модели (например, исследование разбавления сточных вод или исследование структуры течений у гидротехнических сооружений) влечет за собой и более жесткие требования к самой модели (например, требование одинаковости масштабов плана и глубин).

Переход от жесткой к деформируемой модели речного русла существенно увеличивает состав требований, определяющих ее адекватность исследуемому речному объекту, что сильно усложняет работу на модели и в целом значительно ограничивает возможности моделирования.

Тем не менее, исследования речных потоков на деформируемых моделях, как за рубежом, так и в России, предпринимались давно и продолжаются до настоящего времени. Известно, что первая деформируемая модель участка р. Гаронны была построена Л.Ж. Фаргом в 1875 г., и на ней исследовались выправительные сооружения [343].

Попытки создания деформируемых моделей в лабораториях Германии в начале XX века оказались, по мнению предпринимавших их исследователей, неудачными: в процессе опытов в модельном русле возникали песчаные рифеля, создававшие большое гидравлическое сопротивление потоку, и модель становилась неподобной прототипу не только морфологически, но и по основным гидравлическим характеристикам (глубинам, скоростям течения, отметкам и уклонам водной поверхности). Иными словами, элементы руслового рельефа становились помехой эксперименту. Рекомендовалось даже выглаживать эти русловые формы перед выполнением измерений на модели (что, по нашему мнению, совсем не поправляет дело).

Многочисленные предложения по проблеме деформируемых гидравлических моделей, сложившиеся со времен Фарга по настоящее время, весьма разнообразны, как в части методического обоснования (в частности, выработки условий подобия), так и в части технического обеспечения модельных исследований. Вместе с тем большинству этих предложений присуще одно общее

свойство — в них рассматриваются проблемы бесструктурного транспорта наносов потоком [117].

Только во второй половине XX века появился ряд предложений, предусматривающих необходимость учета микроформ руслового рельефа в транспортировании наносов потоком (О.В. Андреев, И.А. Ярославцев, Г.А. Малютин [15], Дж. Цвамборн [503, 504], М.С. Ялин [487, 491], М.А. Михалев [190], Н.С. Знаменская [102]), и в их числе предложения О.В. Андреева и др. [15] и М.А. Михалева [190] о необходимости воспроизведения на модели подвижных форм руслового рельефа, подобных формам на моделируемом участке реки.

В целом современное состояние проблемы характеризуется отсутствием единства мнений не только в деталях, но и по принципиальным вопросам. По этому поводу Дж. Шарп, подводя итог обзорной части своей монографии [289], замечает: «Однако, несмотря на достигнутые успехи, моделирование размываемых русел по-прежнему вызывает полемику, и проектирование моделей в значительной степени определяется влиянием эмпирического начала».

Принимая в полной мере это заключение Дж. Шарпа и учитывая известное представление о русловом процессе как о процессе изменений в морфологическом строении речного русла и речной поймы, постоянно происходящих под действием текущей воды, авторы предприняли попытку разработки гидроморфологического подхода к проблеме моделирования речных потоков и речных русел на деформируемых гидравлических моделях. Полученные в этом направлении результаты пока рассматриваются на уровне физических предпосылок к методике, т. е. на уровне выяснения тех свойств взаимодействующих сред и тех механизмов их взаимодействия, которые в совокупности являются определяющими в формировании кинематической структуры потока и морфологического облика моделируемого участка реки и которые должны быть приняты во внимание при выработке условий подобия.

Ниже мы приводим результаты некоторых экспериментов, которые имели своей целью установление свойств взаимодействующих в русловом процессе сред и установление особенностей механизма их взаимодействия.

#### **4.2.1. Подрусловой поток и его взаимодействие с русловым потоком**

Большое число выполненных к настоящему времени лабораторных экспериментальных исследований скоростной структуры потока, гидравлических сопротивлений русла, механизма и закономерностей бесструктурного (безрядового) движения частиц на дне водных потоков производилось преимущественно в условиях искусственно закрепленной на дне зернистой шероховатости русла, т. е. отсутствия фильтрационного взаимодействия и взаимообмена между русловым и подрусловым потоками воды.

Измерения скорости потока, выполненные Г.В. Васильченко в лабораторном лотке электрохимическим методом, показали, что эпюры продольных скоростей не завершаются на поверхности дна нулевыми значениями, а продолжают в зернистой толще наносов, достигая близких к нулю значений лишь

на некоторой глубине [40]. Этими же измерениями была обнаружена пульсация скорости в подрусловом потоке.

Эксперименты В.Н. Спиридонова показали, что профиль осредненной скорости в подрусловом потоке определяется гидравлическими характеристиками руслового потока и крупностью зернистого материала, слагающего дно в лабораторном лотке [252].

Фильтрационные явления при нестационарном воздействии на грунт детально изучались А.И. Богомоловым, В.С. Алтуниным, Н.А. Петровым, А.М. Прудовским, В.А. Кисиним в исследованиях размыва грунта волной прорыва.

Экспериментальными исследованиями Н.А. Михайловой и ее сотрудников [188], В.П. Троицкого [265], Д.В. Штеренлихта и М.В. Земляниковой [293] установлено влияние фильтрационного потока на значения неразмывающих скоростей и на характеристики руслового рельефа. Движение воды в пустотах зернистой толщи отложений было обнаружено Н.Е. Кондратьевым, изучавшим механизм рассеяния энергии стоячей волны в волновом лотке [129, 173]. Им установлено, в частности, что движения собственно волны и движения воды в грунтовой толще несколько несогласованы в соответственных фазах цикла.

Эксперимент Кондратьева был повторен в Русловой лаборатории ГГИ в широком диапазоне крупности грунта, составляющего фильтрующий слой отложений, и глубин воды. Эксперименты выполнялись в трехсекционном волновом лотке, приведенном выше на рис. 2.9.

Условия в секциях отличались состоянием дна. В первой секции дно (также как и три вертикальные стенки) было выполнено из ровного металла, покрытого краской. Во второй секции на дно выкладывался песок или гравий слоем в одну частицу, а в третьей — такой же грунт, но слоем около 30 см (рис. 4.10).

Для возможности наблюдения и киносъемки передняя стенка лотка была стеклянной. Во всех трех секциях синхронизированными волнопродукторами создавались стоячие волны. Затем волнопродукторы мгновенно убирались, и наблюдалось затухание волн с измерением времени затухания. Результаты измерений приведены на рис. 4.11.

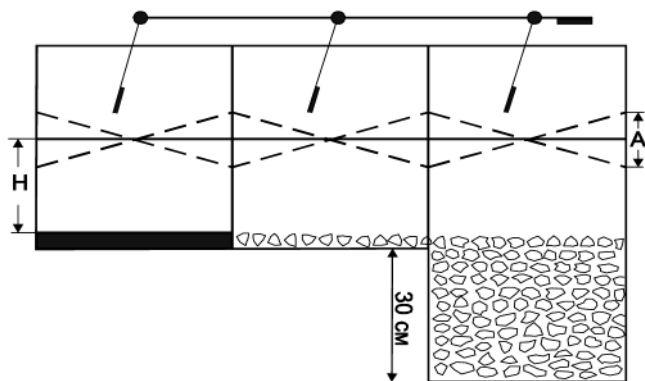


Рис. 4.10. Трехсекционный волновой лоток (схема эксперимента)

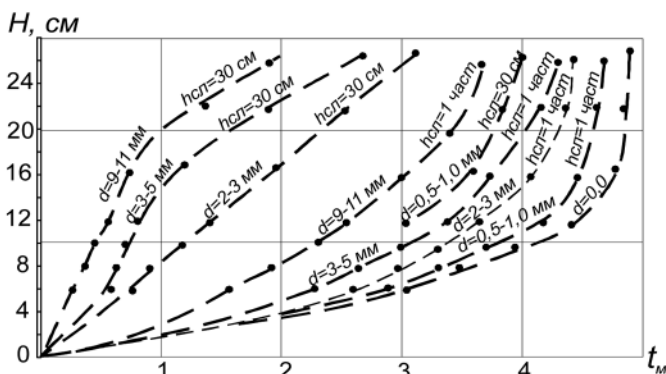


Рис. 4.11. Зависимость времени затухания стоячей волны от глубины воды, крупности грунта и качества подстилающей поверхности

Основной вывод из этой серии экспериментов состоит в том, что в диапазоне рассмотренных глубин затухание волны над фильтрующим слоем грунта (особенно при крупных частицах) происходит существенно быстрее, чем в соседней секции с шероховатым дном той же крупности.

Киносъёмкой частиц нулевой плавучести, размещенных в сетчатых боксах в разных частях фильтрующего слоя в волновом лотке, зафиксированы сложные движения воды, в целом повторяющие движение волны, но несколько несогласованные с ней по фазе.

Обе серии экспериментов со стоячей волной приводят к выводу о том, что в результате воздействия волны на воду, заключенную в фильтрующем слое, между этой водой и волной образуется молярный обмен. Но из-за демпфирующего влияния фильтрующего слоя на движение молей жидкости оно оказывается несогласованным с движением самой волны, что вызывает увеличение гидравлического сопротивления и относительно быстрое затухание волны в сравнении с затуханием ее при однослойной шероховатости дна такими же частицами грунта.

Поскольку большие вихри руслового потока вызывают изменение скорости и давления в предельных значениях, и это изменение носит квазипериодический характер, логично предположить, что в русловом потоке, так же как и при колебаниях стоячей волны, возникает молярный обмен между ним и подруловым потоком (или подруловой водой).

Проверка этого предположения осуществлялась в 8-метровом гидравлическом лотке Русловой лаборатории (рис. 2.4). В качестве частиц, образующих фильтрующий слой на дне лотка, использовалась ружейная свинцовая дробь диаметром 2,25 мм, которая выкладывалась на стеклянном дне лотка слоем в одну частицу (дробинку) и слоем 30 мм.

Использование дроби в качестве фильтрующего слоя грунта давало возможность изменять скорость потока в широком диапазоне при сохранении неподвижности частиц и в целом повышало чистоту (качество) экспериментов. Благодаря шарообразной форме и строго выдержанному размеру дробинок, оказалось возможным уложить ее исключительно ровным слоем как в одну частицу, так

и слоем в 30 мм, и таким образом исключить влияние на гидравлическое сопротивление непредусмотренных задач факторов.

Эксперименты выполнялись в две серии при разных скоростях течения и глубинах потока [111]. Результаты приведены на рис 4.12. Их осмысление приводит к следующим основным выводам:

— В диапазоне имевших место в экспериментах глубин и скоростей течения четко проявляется эффект возрастания сопротивления за счет фильтрующего слоя.

— При постоянном значении скорости течения эффект возрастания сопротивления усиливается с уменьшением глубины, а при постоянной глубине — с увеличением скорости потока.

— Влияние фильтрующего слоя на сопротивление наиболее четко проявляется при довольно больших числах Фруда.

Таким образом, предположение о возможности молярного обмена между русловым и подрусловым потоками четко подтвердилось экспериментом: действительно, фильтрующий слой донных отложений формирует существенно большее гидравлическое сопротивление потоку, чем выложенная толщиной в одну частицу шероховатость такой же крупности. Т. е. в силу демпфирующего влияния зернистой толщи фильтрующего слоя наносов на формирующиеся в подрусловом потоке структурные элементы последние оказываются в несогласованном состоянии со структурными элементами руслового потока.

В связи с этим физически понятны второй и третий приведенные выше выводы. С уменьшением глубины (при постоянной скорости) возрастает число рас-

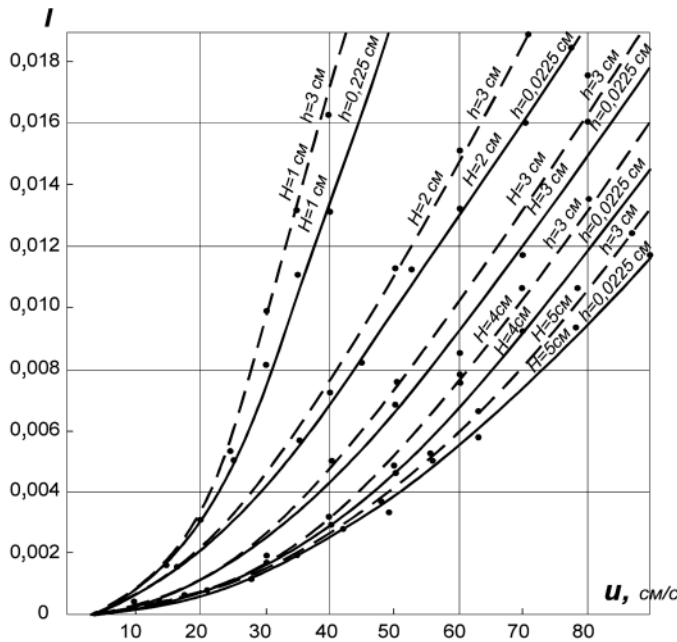


Рис. 4.12. Зависимости гидравлического уклона от скорости течения, глубины потока и качества граничной поверхности (зернистая шероховатость, фильтрующий слой из частиц той же крупности)

согласований на любом фиксированном участке руслового потока, а увеличение скорости течения при постоянной глубине вызывает более сильное рассогласование по фазе каждого кинематического крупномасштабного элемента руслового потока с подруловым потоком. В обоих этих случаях увеличивается гидравлическое сопротивление на любой фиксированной длине руслового потока.

Поскольку число Фруда содержит в своей структуре отношение скорости к глубине, интенсивность нестационарности возрастает с увеличением скорости или с уменьшением глубины, т. е. с ростом числа Фруда, но при этом возрастает и степень рассогласования руслового и подрулового потоков, что и отражают графики, представленные на рис. 4.12.

Результаты опытов со свинцовой дробью инициировали серию других экспериментов, в которых широко варьировалась крупность песчаных частиц и глубина воды (серия 1), крупность гравия и скорость потока при постоянной глубине, при этом изучался механизм воздействия потока на тяжелую частицу (серия 2), изучались формы перемещения русловых наносов при разной кинетичности потока (серия 3), измерялись некоторые характеристики взаимодействия руслового и подрулового потоков (серия 4).

**Серия 1.** Эксперименты (как и в опытах со свинцовой дробью) выполнялись в 8-метровом лотке Русловой лаборатории. В качестве донных наносов использовался песок восьми фракций. Опыты начинались с гладкого дна (силикатное стекло) и далее продолжались по возрастанию крупности песка от 0,1 мм до 2,0 мм. С каждой фракцией песка эксперимент выполнялся дважды: с наклеенным на стеклянное дно песком слоем в одну частицу и с песком, уложенным ровным слоем толщиной около 3,0 см. Глубина потока составляла 2, 3, 4, 5, 6,

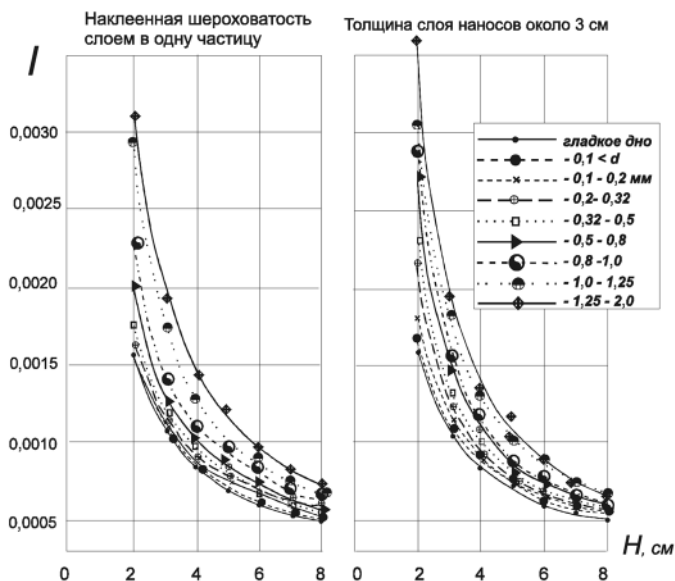


Рис. 4.13. Зависимость гидравлического уклона от глубины потока, крупности частиц и качества подстилающей поверхности

7 и 8 см; при этом средняя скорость течения поддерживалась путем изменения расхода воды и уклона потока (для обеспечения равномерного режима течения) близкой к размывающей для каждого сочетания крупности песка и глубины.

Результаты этих опытов приведены на рис. 4.13 в виде зависимостей гидравлического уклона от крупности частиц и глубины потока в вариантах наклеенной шероховатости и фильтрующего слоя песка. Сопоставление графиков позволяет заключить, что влияние шероховатости (наклеенные частицы) и фильтрующего слоя частиц песка на гидравлическое сопротивление проявляется сильнее в области малых глубин и заметно сглаживается с переходом к большим глубинам. При глубине 8 см все графики сходятся в довольно узкий пучок с практически одинаковыми значениями уклона для соответственных крупностей в обеих группах опытов.

В лотке шириной 21 см дальнейшее увеличение глубины вызвало бы влияние боковых стенок на гидравлическое сопротивление, поэтому опыты были ограничены глубиной 8 см. Однако тенденция графиков в обеих группах опытов допускает предположение об автомодельности гидравлического сопротивления при некоторых значениях относительной шероховатости. Экстраполяция графика для песка крупностью 0,1 мм выводит его в область автомодельности при глубине около 10 см, т. е. при относительной шероховатости около 0,001. Такое же значение границы области автомодельности гидравлического сопротивления по относительной шероховатости было получено К.В. Гришаниным по материалам натуральных наблюдений [73].

**Серия 2.** Динамическое взаимодействие руслового и подруслового потоков.

Предположение о молярном обмене между русловым и подрусловым потоками влекло за собой допущение о возникновении на границе раздела вертикальных импульсов, направленных из подруслового в русловой поток или в обратном направлении. Наличие таких импульсов и устанавливалось путем визуального наблюдения за поведением тяжелой частицы специальной формы, установленной на зернистом дне потока в 8-метровом лотке.

Тяжелая частица представляла собой усеченный конус (вкладыш) с основанием, обращенным к поверхности потока. Вкладыш помещался в соответствующую ему по форме шайбу таким образом, что верхняя и нижняя плоскости его являлись точным продолжением соответствующих торцевых плоскостей шайбы, а коническая поверхность его была притерта к внутренней конической поверхности шайбы (рис. 4.14). Обе детали изготовлены из оргстекла толщиной 5,0 мм, диаметр верхней плоскости вкладыша — 16,0 мм, нижней — 10,5 мм. В собранном виде обе детали устанавливались заподлицо с поверхностью плоского дна, выложенного слоем гравия толщиной 6,0 см. Конструкция тяжелой частицы и



Рис. 4.14. Тяжелая частица из оргстекла в виде усеченного конуса



способ ее установки на дне сводили к минимуму воздействия силы лобового гидродинамического давления и позволяли хотя бы качественно оценить роль подъемной силы (связанной не с несимметричным обтеканием частицы осредненным потоком, а именно с формированием мгновенных гидродинамических ситуаций в придонной области руслового потока и в верхних слоях подруслового) во взвешивании тяжелых частиц.

Опыты проводились с гравием крупностью 2–3, 4–5 и 6–7 мм. Масса этих частиц гравия в воде составила, соответственно, 0,0003, 0,025 и 0,159 г, а масса вкладыша — 0,177 г. В первой ситуации вкладыш был взвешен при скорости потока 77,0 см/с ( $H=5,0$  см;  $I=0,0132$ ), во второй — при скорости 55,0 см/с ( $H=5,0$  см;  $I=0,0070$ ), в третьей — при скорости 51,4 см/с ( $H=5,0$  см;  $I=0,0066$ ).

Во второй ситуации при скорости потока 50,0 см/с ( $H=5,0$  см;  $I=0,0062$ ) удалось наблюдать в микроскоп вибрацию вкладыша. Подскакивание вкладыша осуществлялось на высоту в несколько десятых долей миллиметра, причем часто приподнималась часть вкладыша, обращенная вниз по течению, т. е. тыловая.

**Серия 3.** Для того чтобы убедиться в правомерности распространения обнаруженных процессов на частицы естественного грунта, в Русловой лаборатории ГГИ была выполнена серия экспериментов в 8-метровом стеклянном лотке, в которых методом кино съемки обезвешенных в воде частиц полистирола измерялось поле скоростей потока в осевой продольной плоскости лотка и фиксировались перемещающиеся вблизи дна русловые наносы при разной кинетичности потока. Перемещение наносов, выходящих из состояния покоя, фиксировалось скоростной кинокамерой СКС-1м со скоростью протяжки пленки от 150 до 300 кадров в 1 с. Этот методический прием был применен ранее Ц.Е. Мирцхулавой и позволил ему установить в мельчайших деталях механизм выведения из состояния покоя отдельных частиц в ходе размыва потоком связанного грунта [186, 187]. Основные характеристики выполненных нами экспериментов [111] приведены в табл. 4.5.

Многочисленный просмотр кинофильма в замедленном режиме и анализ последовательных положений частиц песка, полученных в результате обработки кинофильма, привели к следующим основным выводам [111].

- При малой кинетичности потока выход частиц из состояния покоя совершается преимущественно путем перекачивания, т. е. под воздействием силы лобового гидродинамического давления (рис. 4.15, ситуации А-1 и А-2, Б-4 и Б-5).
- При средней и большой кинетичности потока (групповое и в рядовой форме движение частиц) выход частиц из состояния покоя совершается преимущественно под воздействием вертикального силового импульса, способствующего подскоку частицы (рис. 4.15, Б-3 и Б-6, В-7 и В-8, Г-9 и Г-10). В этих случаях частицы как бы плывут в потоке вблизи дна, почти не вращаясь или слабо вращаясь вокруг своего центра.
- При всех режимах потока определяющее влияние на выведение частиц песка из состояния покоя оказывает продольная компонента актуальной скорости, поскольку и ее максимальные значения (от 15 см/с в режиме А до 28 см/с в режиме Г), и размах ее колебаний (от 11 см/с в режиме А

Таблица 4.5. Основные гидравлические характеристики экспериментов

Серия-опыт	Крупность грунта, мм	Расходы воды, л/с	Глубина, см	Средняя скорость потока, см/с	Уклон потока	Состояние дна
1–1	1,0–1,25	2,6	5,0	24,8	0,00116	Предельное равновесие частиц, вибрация
1–2	1,0–1,25	3,2	5,0	30,0	0,00144	Движение отдельных частиц
1–3	1,0–1,25	4,0	5,0	38,1	0,00225	Групповое движение частиц
1–4	1,0–1,25	5,0	5,0	46,6	0,00378	Движение частиц по поверхности асимметричных гряд длиной 30–35 см, высотой 0,5 см
1–5	1,0–1,25	6,5	5,0	61,9	—	Движение частиц по поверхности симметричных гряд
2–1	1,25–2,0	3,2	5,0	30,0	0,00193	Предельное равновесие частиц, вибрация
2–2	1,25–2,0	3,8	5,0	36,2	0,00250	Движение отдельных частиц
2–3	1,25–2,0	4,8	5,0	45,7	0,00320	Групповое движение частиц
2–4	1,25–2,0	6,5	5,0	62,0	0,00607	Движение частиц по поверхности несимметричных гряд длиной 18–20 см, высотой 0,4 см
2–5	1,25–2,0	8,5	5,0	81,0	—	Движение наносов по поверхности симметричных гряд

до 20 см/с в режиме Г) в непосредственной близости от дна значительны и поэтому достаточны как для образования действенного опрокидывающего импульса (режим А ситуации 1 и 2 и режим Б ситуации 4 и 5), так и для формирования достаточного подъемного импульса (ситуации 3 и 6 в режиме Б, 7 и 8 в режиме В, 9 и 10 в режиме Г). В то же время вертикальная компонента скорости во всех четырех режимах имеет в придонном слое весьма малые абсолютные значения, не превышающие 4 см/с даже при грядовой форме дна, и поэтому она как силовой импульс недостаточна для выведения частиц песка из состояния покоя, гидравлическая крупность которых составляет 16 см/с.

Полученные в этой серии опытов результаты полностью согласуются с представлениями Гришанина и Мирцхулавы. Касаясь механизма выведения частиц донных наносов из состояния покоя, Гришанин пишет следующее: «Подъемная сила, приложенная к частице, лежащей на дне, образуется разностью между давлением в заторможенной жидкости под частицей и давлением в ускоряющейся жидкости над ней. В турбулентном потоке эта разность колеблется вместе с пульсирующей продольной скоростью, и подсакивание частиц происходит

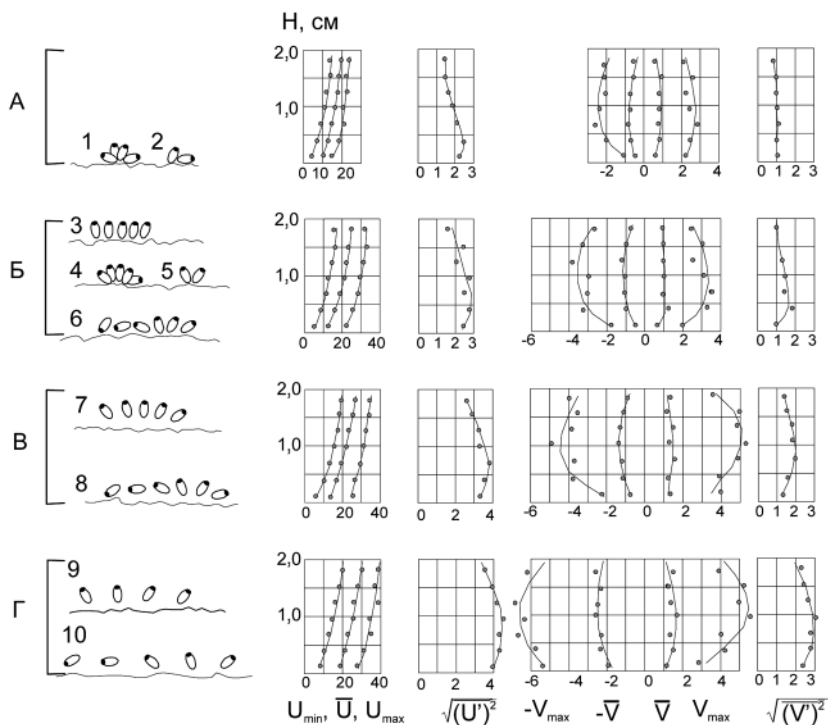


Рис. 4.15. Формы движения частиц песка при разном уровне кинетичности потока. А, Б, В и Г соответствуют условиям 1–2, 1–3, 1–4 и 1–5 в табл. 4.1

в моменты максимумов  $u'$ . Заметим, что нормальная ко дну компонента мгновенной скорости никакой роли в захвате частиц потоком не играет, ибо при  $Z=\Delta$  она очень мала» [71. с. 200]

Мирцхулава, анализируя результаты своих экспериментов, отмечает, что выталкивание песка в поток под действием подъемной силы является преимущественной формой выведения его из состояния покоя при скорости потока, достаточно превышающей неразрывающую скорость [187].

Рассматривая механизм размыва связного грунта, И.Ф. Карасев связывает подъемный импульс, развиваемый потоком на покоящихся на дне частицах, с пульсационным характером течения в придонном слое, в результате чего возникает фазовый сдвиг в характерных состояниях поля давления над частицами грунта и под ними [110].

**Серия 4.** Представляется, что фазовый сдвиг в характерных состояниях поля давления в русловом и подрусловом потоках может быть главным звеном в механизме выведения донных наносов из состояния покоя и в механизме, определяющем формы перемещения русловых наносов на структурных уровнях отдельных частиц грунта и микроформ руслового рельефа.

Проверка этого предположения, а также приведенных выше представлений Гришанина, Мирцхулавы и Карасева была осуществлена в серии экспериментов, в которых с помощью миниатюрных термоанемометров исследовался

характер пульсации скорости в русловом и подрусловом потоках. Опыты проводились в 8-метровом лотке Русловой лаборатории по следующей методике.

Один из термоанемометров устанавливался на середине лотка в непосредственной близости от дна, а второй — на этой же вертикали, но ниже поверхности дна в толще грунта. В каждом эксперименте при глубине 5 см скорость потока постепенно увеличивалась до значений, соответствующих состоянию предельного равновесия частиц данной крупности, и в такой ситуации измерения повторялись до 4 раз при неизменном положении первого (руслового) термоанемометра и последовательном заглублении в грунт второго (подруслового) термоанемометра. Сигналы обоих термоанемометров синхронно регистрировались на ленте самописца.

Поскольку условия измерений были несколько необычными (измерения в грунте, значительное искусственное усиление сигнала грунтового термоанемометра) и не было полной уверенности в объективности измеренных значений скорости, анализировался лишь характер пульсации, а именно — периоды пульсации и степень их синхронности. Результаты этих измерений приведены в табл. 4.6.

Анализ приведенных в табл. 4.6 результатов позволяет констатировать следующее.

- В русловом и подрусловом потоках наблюдаются крупномасштабные пульсации скорости двух характерных периодов: основного, продолжительностью 1,5–7,5 с, и в пределах него — двух-трех вторичных, продолжительностью 0,5–3,5 с.
- Наиболее близки периоды в той ситуации, когда грунтовой термоанемометр расположен на уровне нижней грани частиц первого (верхнего) ряда. С заглублением грунтового термоанемометра наблюдается рост периода пульсации обоих масштабов.
- Характерные пиковые значения (максимумы) в записи сигналов грунтового термоанемометра совершаются с некоторым запаздыванием и с заметным уменьшением размаха пульсации относительно прибора в русловом потоке. Время запаздывания увеличивается, а размах пульсации уменьшается по мере заглубления грунтового термоанемометра и с уменьшением крупности грунта.
- Пульсация в подрусловом потоке обнаруживается только при больших значениях коэффициента усиления грунтового термоанемометра. Это свидетельствует о том, что пульсация скорости (и, следовательно, давления) существенно уменьшается с удалением от границы раздела в толщу грунта.

Два последних вывода наиболее существенны, поскольку раскрывают физический механизм динамического взаимодействия руслового и подруслового потоков. Подъемная сила, воздействующая на частицы руслового аллювия на границе раздела, формируется разностью актуальных значений давления на верхней и нижней гранях частиц, а эта разность зависит, при прочих равных условиях, от амплитуды пульсации давления на нижней грани частиц и от времени запаздывания характерных ситуаций в подрусловом потоке относительно этих же ситуаций в русловом потоке, т. е. от фазового сдвига. Если фазовый

**Таблица 4.6. Гидравлические и кинематические характеристики руслового и подруслового потоков с ровным дном, сформированным из грунта разной крупности**

№ опыта	Крупность грунта, мм	Расход воды, л/с	Глубина, см	Скорость потока, см/с	Уклон	Заглубление грунтового термомометра от поверхности дна, см	Период крупномасштабной пульсации в потоке, с	Период крупномасштабной пульсации в грунте, с	Время запаздывания максимума в грунте, с	Отношение коэффициентов усиления грунт/поток
1	0,10	0,85	5,0	17,0	0,00052	0,10 0,01–0,05 0,00–0,01	6,0 и 2,0	7,4 и 3,5 7,4 и 3,5 6,0 и 2,0	1,0 0,5 0,1–0,3	10 4 1
2	0,10–0,20	0,90	5,0	18,0	0,00055	0,10 0,03–0,05 0,00–0,02	5,3 и 1,8	7,6 и 3,5 6,3 и 2,2 5,7 и 2,9	0,5–0,9 0,2–0,5 0,1–0,3	4 2 1
3	0,20–0,32	1,00	5,0	20,0	0,00058	0,20 0,10 0,03–0,05 0,00–0,02	4,9 и 1,6	6,0 и 3,0 6,9 и 3,3 6,7 и 3,3 5,1 и 2,6	— 0,1–0,6 0,2–0,7 0,1–0,4	10 10 10 1
4	0,32–0,63	1,10	5,0	22,0	0,00091	0,25 0,10 0,00–0,02	4,1 и 1,4	— 5,2 и 2,0 4,4 и 1,7	— 0,1–0,5 0,1–0,3	20 4 1
5	0,63–1,00	1,25	5,0	25,0	0,00111	0,30 0,20 0,10	3,6 и 1,2	— 5,1 и 2,0 4,0 и 2,0	— 0,1–0,5 0,1–0,3	10 4 1
6	1,00–1,40	1,50	5,0	30,0	0,00195	0,80 0,50 0,20	3,0 и 1,0	— 4,1 и 2,0 3,9 и 2,0	— 0,1–0,3 0,1–0,3	10 4 1
7	2,0–3,0	2,20	5,0	44,0	0,00415	2,5 1,5 0,5	1,5 и 0,5	— 1,7 и 0,8 1,5 и 0,8	—	2,5 — 1

сдвиг обозначить через  $\Delta t$ , характерный период крупномасштабной пульсации в русловом потоке через  $T$ , а соответствующие этому периоду амплитуды пульсации (скорости или давления) в русловом и подрусловом потоках соответственно через  $A_1$  и  $A_2$ , то с помощью этих величин можно составить критериальные соотношения, характеризующие особенности взаимодействия руслового и подруслового потоков и условия устойчивости частиц, слагающих русло.

В ряду многочисленных возможных ситуаций выделяются три характерных случая взаимодействия руслового и подруслового потоков.

Первый случай характерен для русел, сложенных очень мелкозернистым аллювием. В этой ситуации нестационарность руслового потока, из-за сильного демпфирующего влияния мелкозернистой аллювиальной среды, практически не воспринимается этой средой, и поэтому поля скорости и давления в ней проявляются в осредненных и постоянных во времени значениях. Это значит, что все гидродинамические процессы в русловом потоке и на ограничивающей его поверхности определяются только свойствами самого руслового потока. Критериальные соотношения для этого случая могут быть записаны в виде:

$$\Delta t \gg T \text{ и } A_2 \rightarrow 0. \quad (4.6)$$

Второй случай взаимодействия руслового и подруслового потоков характерен для русел с более крупным, чем в первом случае, аллювием. Нестационарность руслового потока инициирует в подрусловом потоке флуктуирующие поля скорости и давления, характеризуемые фазовым сдвигом и меньшими, чем в русловом потоке, амплитудами. В этой ситуации подрусловой поток уже оказывает влияние на процессы в русловом потоке и, в частности, на формы перемещения русловых наносов и на размеры донных гряд (микроформ). Критериальные соотношения для этого случая взаимодействия руслового и подруслового потоков записываются в виде:

$$0 < \Delta t < T \text{ и } 0 < A_2 < A_1. \quad (4.7)$$

Здесь можно допустить случай, когда фазовый сдвиг  $\Delta t = 1/2T$ . Он соответствует наименьшей устойчивости русловых наносов, поскольку в этой ситуации формируется максимально возможный подъемный импульс. Этим, по-видимому, объясняется и тот факт, что микроформы руслового рельефа, генетически связываемые с макротурбулентностью, тем не менее, в разных условиях имеют разные размеры, поскольку проявляется сформулированный Гришаниным принцип избирательной способности системы «поток-русло». Этот принцип заключается в том, что в конкретных сочетаниях гидравлических характеристик определяющим в воздействии потока на деформируемое дно является не весь спектр масштабов турбулентности, а лишь узкая его полоса.

Механизм избирательной способности системы «поток-русло» и заключается именно в способности конкретных масштабов турбулентности формировать максимально возможный подъемный импульс, что достигается при условии  $\Delta t = 1/2T$  (при этом  $T$  — период не обязательно самых больших вихрей, но и вихрей второго и даже третьего уровня малости).

Третий случай взаимодействия руслового и подруслового потоков характерен для участков рек с крупным русловым аллювием, при котором нестационарность руслового потока распространяется в подрусловый поток без задержки по фазе и без изменения по амплитуде. Это, по существу, состояние отмотки русла, когда русловые наносы не испытывают действия подъемного импульса или этот импульс оказывается крайне малым. Очевидно, что этот случай характеризуется незначительными русловыми деформациями. Критериальные соотношения для него имеют вид:

$$\Delta t \rightarrow 0 \text{ и } A_2 \rightarrow A_1. \quad (4.8)$$

Таким образом, характеристики макротурбулентности и, в частности, характеристики больших вихрей оказываются значимыми в процессах взаимодействия руслового потока с деформируемым зернистым дном, т. е. эти характеристики в натуре и на модели должны быть соответственно подобными величинами.

Проверка этого заключения была выполнена в ходе экспериментов на моделях участков р. Полонети. Моделировались излучина в среднем течении реки у д. Зеленый Бор (рис. 4.16) и прямолинейный 100-метровый участок у с. Яжелбицы (рис. 4.17). На обоих участках были выполнены съемки руслового рельефа, измерены расходы воды, глубины, скорости течения, уклоны потока, параметры донных гряд, отобраны пробы русловых наносов. На излучине были измерены скорости течения трехкомпонентным струемером для определения периода крупномасштабной пульсации.

Модель излучины была выполнена в масштабе 1:25, модель прямолинейного участка — в масштабе 1:10 с уменьшением наносов в этих же масштабах соответственно [121]. В ходе экспериментов на этих моделях были получены характеристики потока и русла, вполне соответствующие натурным значениям. Но наиболее показательными результатами в этих экспериментах были сформированный в целом русловый рельеф и песчаные гряды (микроформы руслового рельефа). Их параметры приведены в табл. 4.7.

Основной вывод, следующий из табл. 4.7, состоит в том, что моделирование микроформ руслового рельефа на неискаженной модели с соблюдением условия  $Fr = idem$  и при уменьшении модельного грунта в масштабе модели при-



Рис. 4.16. Модель излучины р. Полонети (деформируемая) масштаба 1:25

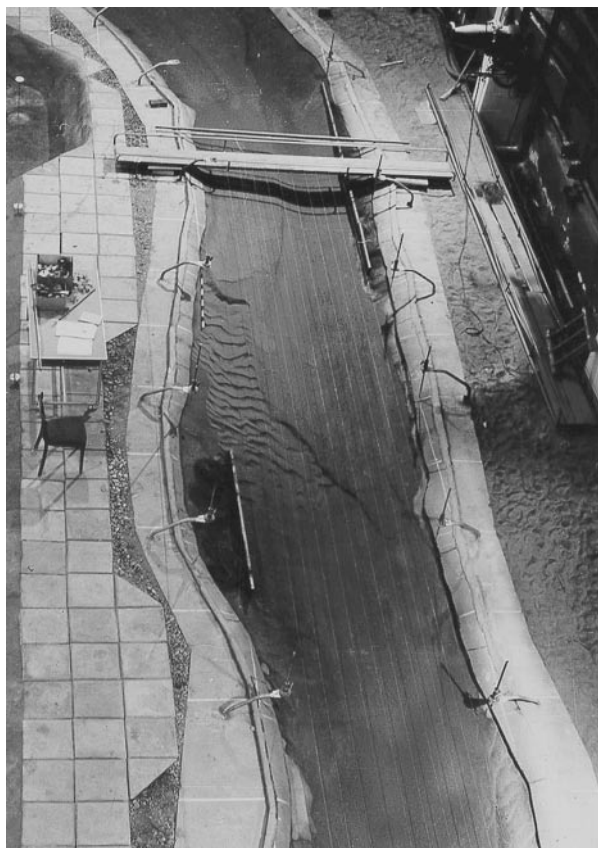


Рис. 4.17. Модель прямолинейного участка р. Поломети у с. Яжелбицы

Заметим, что зависимость (4.9) может быть представлена в ином виде, если принять во внимание, что произведение периода больших вихрей на скорость поступательного движения есть шаг цепочки больших вихрей  $L$ . Тогда число Струхалия в виде отношения глубины к шагу вихрей характеризует по существу форму больших вихрей и в таком качестве действительно оказывается постоянным в потоках с одинаковыми условиями на граничной поверхности. Но как критерий кинематического подобия, определяющий подобие взаимодействия потока с ограничивающей его деформируемой поверхностью, это соотношение не может использоваться.

В Русловой лаборатории ГГИ была выполнена большая серия экспериментов на моделях уже упомянутой выше излучины Поломети. Исследовались гидравлические осредненные характеристики потока, характеристики вторичных течений и периоды крупномасштабной пульсации скорости течения на 7-и моделях. Базовая модель имела масштаб 1:25 и неискаженный рельеф русла. Модели в масштабе 1:100 и 1:200 были выполнены в трех вариантах каждая: без искажения рельефа, с двукратным искажением ( $M_r$  1:100,  $M_b$  1:50;  $M_r$  1:200,  $M_b$  1:100) и с четырехкратным искажением рельефа ( $M_r$  1:100,

водит к удовлетворительному результату в отношении подобия геометрических характеристик микроформ.

Но если согласиться с тем, что микроформы руслового рельефа создаются макротурбулентной нестационарностью руслового потока, то придется признать, что макротурбулентность на этих моделях Поломети была подобна натурной.

Часто в качестве критерия кинематического подобия натурного и модельного потоков называется число Струхалия:

$$Sh = \frac{H}{TU}, \quad (4.9)$$

где  $H$  — некоторый характерный размер, например, глубина потока;  $T$  — некоторый характерный период, например, период больших вихрей;  $U$  — некоторая характерная скорость, например, средняя скорость потока.



**Таблица 4.7. Натурные и модельные значения длин (числитель)  
и высот (знаменатель) гряд**

№ створа, местоположение	Натура	Модель (в пересчете на натуру)	Несоответствие, %
р. Полометь — излучина <sup>x</sup>			
21а	4,60/0,35	3,25/0,32	29,0/9,0
23а	3,60/0,28	3,36/0,27	7,0/3,6
24а	5,30/0,34	3,50/0,37	34,0/9,0
р. Полометь — прямолинейный участок			
90-й м	3,70/0,33	2,60/0,20	30,0/39,0
80-й м	2,84/0,22	3,08/0,18	8,4/18,0
70-й м	2,41/0,19	2,43/0,18	0,8/5,0
60-й м	3,40/0,21	2,32/0,24	32,0/14,0
50-й м	2,56/0,20	3,00/0,24	17,0/20,0
40-й м	2,54/0,21	2,40/0,20	6,0/5,0
30-й м	3,20/0,24	3,03/0,28	6,0/17,0
20-й м	3,00/0,20	2,41/0,18	20,0/10,0

\* Створы расположены в верхней половине, в вершине и в нижней половине излучины [121].

$M_v$  1:25;  $M_r$  1:200,  $M_b$  1:50). Здесь  $M_r$  и  $M_b$  — горизонтальный и вертикальный масштабы моделей. Общий вид этих моделей приведен на рисунках 4.16, 4.18 и 4.19.

Основные гидравлические характеристики потока на этих жестких моделях оказались близкими, несмотря на разную степень искажения рельефа русла. Более чувствительными к искажению рельефа оказались вторичные кинематические структуры. Так, водоворотная зона в районе вершины излучины по мере увеличения искажения рельефа становилась более уплощенной, ее внешняя граница как бы выжималась транзитным потоком ближе к берегу.

Но особенно заметно влияние искажения рельефа сказалось на структуре макротурбулентности: шаг больших вихрей, рассчитанный по измеренному периоду крупномасштабной пульсации, изменялся соответственно глубинам модельных потоков. Вместе с тем, число Струхалья, рассчитанное по этому же периоду, оставалось неизменным по величине на всех моделях.

А это значит, что, если для решения поставленной задачи достаточно знания осредненных гидравлических характеристик потока и русла, моделирование даже при 4-кратном несоответствии горизонтального и вертикального масштабов даст приемлемый результат. Если же исследуемая на модели задача требует знания не только осредненных, но и актуальных характеристик движения потока и, в частности, знания характеристик его внутренней нестационарности, моделирование должно выполняться на неискаженной модели. Иными словами, критерий Струхалья, как критерий, ответственный за кинематическое подобие турбулентных потоков, оказывается неработающим критерием.

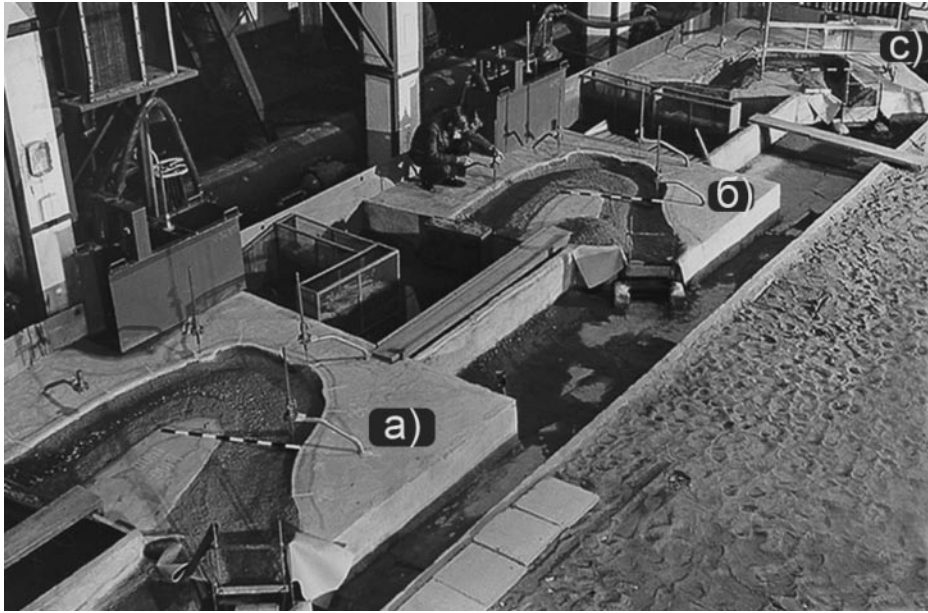


Рис. 4.18. Модели излучины р. Полонети в масштабах:  
 а –  $M_r 1:100$ ,  $M_b 1:100$ ; б –  $M_r 1:100$ ,  $M_b 1:50$ ; с –  $M_r 1:100$ ,  $M_b 1:25$



Рис. 4.19. Модели излучины р. Полонети в масштабах:  
 а –  $M_r 1:200$ ,  $M_b 1:200$ ; б –  $M_r 1:200$ ,  $M_b 1:100$ ; с –  $M_r 1:200$ ,  $M_b 1:50$

Соотношение  $\frac{B}{H} = idem$ , обеспечивающее подобие русла, оказывается и критерием кинематического подобия, поскольку в этом случае на модели формируется макротурбулентность, подобная натурной макротурбулентности (большие вихри и составляющие их структурные элементы).

Кроме того, на неискаженной модели масштаб осредненных и пульсационных скоростей оказывается единым и равным корню квадратному из геометрического масштаба модели, т. е.:

$$\alpha_u = \alpha_{u'} = \alpha_L^{1/2} = \alpha_H^{1/2}. \quad (4.10)$$

Эксперименты, выполненные в гидравлических лотках и на моделях участков  $p$ . Полонети, послужили основой для составления физически логичного комплекса условий, выполнение которых было бы достаточным, чтобы деформируемая модель была подобна натуре как в гидравлических, так и в морфологических характеристиках.

### 4.3. Комплекс условий подобия для деформируемых моделей

Приведенный ниже комплекс условий подобия предусматривает подобие руслового процесса на структурном уровне отдельных частиц, микроформ и мезоформ, т. е. в пределах собственно речного русла, исключая деформации пойменных берегов, сложенных связными грунтами, и склонов долины, сложенных коренной породой.

Прежде всего, масштаб модели должен быть таким, чтобы выполнялось условие  $Re_m > Re_{кр}$ , означающее кинематическое подобие модели и натуры по режиму течения. Далее выполняется условие:

$$\frac{B}{H} = idem. \quad (4.11)$$

равнозначное условию одинаковости горизонтального и вертикального масштабов  $\alpha_L = \alpha_H$ , т. е. условие неискаженности рельефа модели и вместе с тем, условие кинематического подобия на уровне макротурбулентности.

Динамическое подобие модели выражается условием  $Fr = idem$ .

Геометрическое подобие модельных наносов выражается условием:

$$\frac{d}{H} = idem, \quad (4.12)$$

где  $d$  — диаметр наносов.

Динамическое подобие модельных наносов (подобие подвижности наносов) выражается условием:

$$\frac{W}{U_0} = idem, \quad (4.13)$$

где  $W$  — гидравлическая крупность русловых наносов;  $U_0$  — характерная, например, размывающая скорость потока.

При выполнении этих условий достигается самопроизвольно подобие микроформ, что отражается соотношениями:

$$h_2/H = idem, \quad (4.14)$$

$$h_2/l_2 = idem \quad (4.15)$$

и

$$C_2/l_2 = idem, \quad (4.16)$$

где  $h_r$  — высота микроформ,  $l_2$  — длина микроформ,  $C_2$  — скорость деформации микроформ.

Мезоформы руслового рельефа создаются а priori при первоначальной формовке модели, и далее предполагается, что их геометрия и динамика будут сохраняться в подобном натуре состоянии за счет подобия собственно потока и подобия микроформ.

С использованием этих условий подобия были промоделированы участки рек Хара-Мурин, Хани, Утулик и других. Это реки горного типа, и поэтому все приведенные выше условия подобия оказалось возможным выполнить в полной мере. Методика и результаты этих модельных исследований приводятся ниже. Здесь отметим только, что подобие модельных и натуральных характеристик и процессов оказалось вполне удовлетворительным, и поэтому результаты моделирования были использованы в проектах инженерных мероприятий, направленных на регулирование потока и русловых деформаций на этих участках рек.

С использованием этих же условий моделировались и участки р. Полонети (см. выше рис. 4.16 и 4.17). Здесь выполнение условий подобия было достигнуто за счет крупных масштабов (1:25 на излучине и 1:10 на прямолинейном русле). Благодаря малым размерам реки оказалось возможным детально и качественно измерить грядовой рельеф дна и другие характеристики потока и русла. Полученные на модели характеристики потока и микроформ вполне удовлетворительно соответствовали натурным значениям.

Вместе с тем, даже в таком относительно простом и строго определенном варианте моделирования могут быть ситуации, когда при выполнении всех условий подобия модель оказывается неподобной натуре ни в гидравлических, ни в морфологических характеристиках. Такие ситуации могут быть связаны либо с неучетом каких-то незамеченных в моделируемом объекте факторов, либо с проявлением в определенных условиях какого-то нового свойства, например масштабного эффекта.

В связи с этим в Русловой лаборатории ГГИ была выполнена масштабная серия экспериментов в гидравлических лотках, имевших стеклянные боковые стенки и песчаное дно [111, 380]. В серии были приняты масштабы:

- 1:1 (условная «натура», ширина лотка и потока — 1,0 м, глубина — 20 см, средняя скорость потока 45 см/с, расход воды — 90 л/с, крупность песка, выложенного горизонтально ровным слоем толщиной 10 см, — 0,5–1,0 мм);
- 1:2 (лоток шириной 0,5 м, расход воды — 15,9 л/с, крупность песка — 0,25–0,5 мм);

- 1:5 (лоток шириной 0,2 м, расход воды — 1,61 л/с, крупность песка — 0,1–0,2 мм);
- 1:10 (лоток шириной 0,1 м, расход воды — 0,287 л/с, крупность песка  $\leq 0,1$  мм).

Каждый эксперимент начинался с горизонтального дна и с установления расчетных гидравлических характеристик, полученных при условии  $Fr = idem$  и  $\frac{d}{H} = idem$ .

Результаты моделирования в самой общей форме приведены на рис. 4.20 в виде фотографий в перспективе (для масштабов 1:1 и 1:2) и в виде фотографий в плане (для всех четырех масштабов).

Сравнение фото 1 и 2 (и соответственно их планов 4 и 5) убеждает в том, что, несмотря на строгое выполнение всех условий моделирования, не достигнуто подобие не только в величинах характеристик потока и русла, но даже в качественном виде русловых форм. Неподобные «натурным» более крутые гряды второго уровня малости вызвали значительно большее гидравлическое сопротивление, что проявилось в большем, чем в «натуре» (примерно в 2,5 раза), уклоне поверхности потока.

Такой же результат получился и на лотковой модели масштаба 1:5 (рис. 4.20, фото 7). Вместе с тем модель масштаба 1:10, на которой наносы имели крупность 0,1 мм и несколько меньше, оказалась подобной условной натуре не только по качеству сформировавшегося в лотке рельефа, но и по количественным

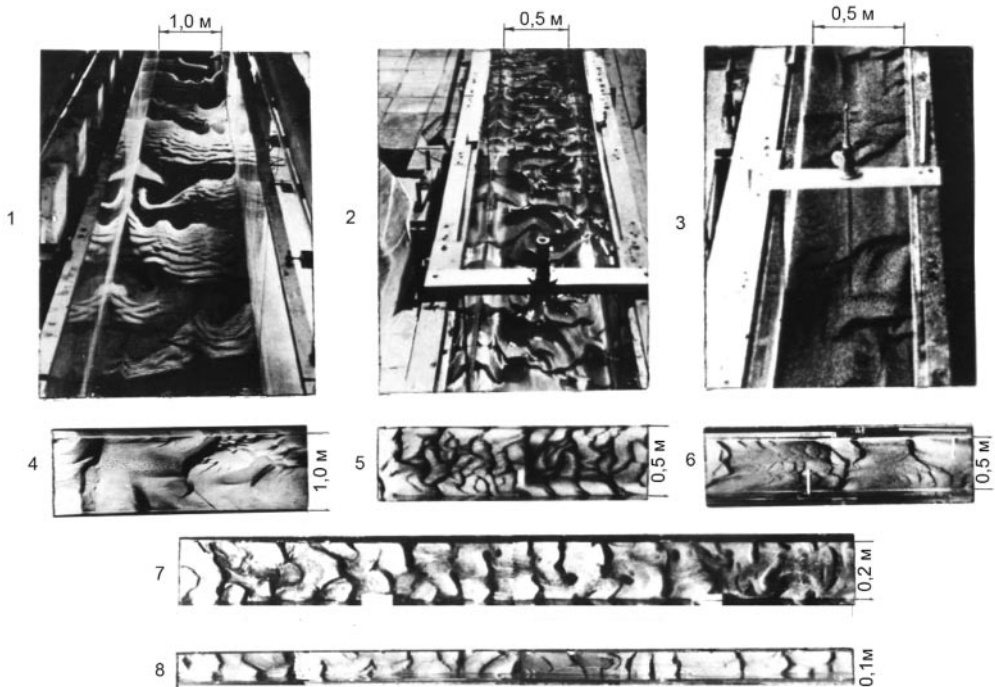


Рис. 4.20. Рельеф дна, сформированный потоком в лотковых моделях разного масштаба

характеристикам гряд обеих уровней (рис. 4.20, фото 8 — к сожалению, вторичные более мелкие формы не видны на фото, так как их высота составляла всего 0,1 см).

Поправить результат в эксперименте масштаба 1:2 удалось только путем укрупнения модельного грунта. В порядке первого приближения был взят грунт условной природы крупностью 0,5–1,0 мм. В результате при небольшой форсировке расхода воды, составившей всего 7 %, был получен рельеф, качественно и количественно подобный «натурному» (рис. 4.20, фото 3 и фото 6), а гидравлический уклон оказался больше «натурного» всего в 1,6 раза.

Наряду с фотоматериалами, дающими лишь визуальное восприятие результатов экспериментов, были выполнены измерения донного рельефа по продольным створам и затем — корреляционный анализ полученных таким образом рядов с отметками дна. В лотковых моделях масштабов 1:1, 1:2 и 1:5 в каждой лотке назначалось 3 продольных створа: по оси лотка, вдоль левого и правого бортов. Полученные в результате корреляционного анализа данные о длинах основных и вторичных гряд приводились к единому значению простым осреднением. В модели масштаба 1:10 длины и высоты основных и вторичных гряд измерялись непосредственно, с последующим простым осреднением. Результаты измерения гидравлических и морфологических характеристик потока и донного рельефа приведены в табл. 4.8.

В табл. 4.8 некоторые гидравлические и морфологические характеристики неодинаковы в расчетных и измеренных значениях — это неизбежный результат подобного рода экспериментов. Вместе с тем, приведенные результаты вполне удовлетворительно подтверждают изменение геометрических характеристик основных и вторичных гряд с изменением масштаба модели.

Однако сравнение высот и длин вторичных гряд (графы 3 и 4) между собой и характеристиками «природы» обнаруживает наиболее заметное отклонение от подобия соответственных величин в графах 2 и 3 и значительно большее их соответствие в графах 2 и 4. Отношение длины основных гряд к длине вторичных в «натуре» составляет около 7; это же отношение по графе 3 составляет всего 2,5, а по графе 4 — около 7. Отношение высоты основных гряд к высоте вторичных в «натуре» составляет около 6; это же отношение по графе 3 составляет менее 3, а по графе 4 — 5.

Таким образом, не только качественная оценка подобия образовавшихся в лотковых моделях русловых форм, но и количественные их показатели свидетельствуют о том, что в ходе эксперимента в «правильном» комплексе исходных данных был получен «неправильный» результат, а в «неправильном» комплексе исходных данных (т. е. при нарушении условия  $\frac{d}{H} = idem$ ) результат получен вполне приемлемый. Но по существу в обоих случаях проявились и основные, и вторичные русловые формы (в том числе и на модели масштаба 1:5). Только в «правильном» варианте масштаба 1:2 и на модели масштаба 1:5, в силу сформулированного Гришаниным принципа избирательной способности системы «поток—русло», максимальный обезвешивающий импульс формировался, по видимому, не самыми большими вихрями руслового потока, а вихрями меньшего

Таблица 4.8. Гидравлические и морфологические характеристики потока и русла в лотковых моделях

Характеристики потока, наносов и донного рельефа	«Натура»	Масштаб модели		
		1:2	1:2	1:5
Ширина русла, см	100	50/50	50/50	20/20
Глубина потока, см	20	10/10	10/10	4/4
Скорость потока, см/с	45	32/32	35/32	20,1/20,1
Расход воды, л/с	90,0	15,9/15,9	17,0/15,9	1,61/1,61
Диаметр песка, мм	0,5–1,0	0,25–0,5/0,25–0,5	0,5–1,0/0,25–0,5	0,1–0,2/0,1–0,2
Уклон	0,00075	0,00180/0,00075	0,00125/0,00075	0,00210/0,00075
Число Фруда	0,32	0,32/0,32	0,34/0,32	0,32/0,32
Длина основных (больших) гряд, см	170	90/85	100/85	32/34
Высота основных (больших) гряд, см	7,0	3,1/3,5	3,0/3,5	2,4/1,4
Скорость основных (больших) гряд, см/мин	0,51	–/0,36	2,7/0,36	–/0,23
Длина вторичных гряд, см	25	20/12,5	17/12,5	10/5
Высота вторичных гряд, см	1,2	1,1/0,6	0,6/0,6	0,9/0,24
Скорость вторичных гряд, см/мин	4,98	1,8/3,5	13,3/3,5	0,22/2,2

Примечание: в числителе — измеренные значения, в знаменателе — расчетные (по масштабам модели) значения.

размера, которые и способствовали через определенные формы движения частиц русловых наносов образованию наиболее развитых вторичных гряд руслового рельефа.

На это обстоятельство обращает внимание и М.А. Михалев, замечая, что только через подобие форм движения наносов на деформируемой модели можно рассчитывать на подобие морфологических (русловой рельеф) и гидродинамических (русловой поток) процессов [189, 190].

Таким образом, результаты экспериментов в лотковых моделях приводят к необходимости дополнить приведенные выше условия подобия условиями, определяющими подобие механизма взаимодействия сред. Такими условиями могут быть отношение фазового сдвига к периоду больших вихрей:

$$\frac{\Delta t}{T} = idem \quad (4.17)$$

и отношение размаха пульсации скорости или давления в подрусловом потоке к соответствующему размаху пульсации этих величин в русловом потоке, относящимся к периоду  $T$ ,

$$\frac{A_2}{A_1} = idem. \quad (4.18)$$

Эти дополнительные условия, по существу, являются условиями динамического подобия, поскольку они составлены из величин, в комплексе определяющих механизм выведения частиц наносов из состояния покоя посредством действующего на них мгновенного вертикального импульса, формируемого мгновенной разностью давлений на верхней и нижней гранях частиц (Гришанин [71]).

Заметим, что, поскольку мгновенные давления на поверхности дна связаны с полем мгновенных скоростей, а последние — со структурой макротурбулентности, то русловой процесс на уровне отдельных частиц (групп частиц) следует воспринимать не как бесструктурный процесс транспортирования наносов, а как сугубо обусловленный структурой поля актуальных скоростей процесс.

Приведенные дополнительные условия подобия не могут в настоящее время использоваться как рабочий инструмент, поскольку нет рекомендаций по оценке входящих в них характеристик  $\Delta t$  и  $A_2$ . Но эти условия, кажется, правильно отражают физику процесса взаимодействия жидкой и твердой сред. Поэтому ряд результатов, приведенных в этом разделе, и в их числе дополнительные условия подобия формы движения частиц наносов, приводятся нами здесь не как элементы методики моделирования руслового процесса на деформируемых моделях, а лишь как физические предпосылки к ней.

Дополнительные условия (4.17) и (4.18), по существу, предопределяют требование воспроизведения на модели того же типа взаимодействия руслового и подруслового потоков, который присущ натуре. Т. е., уменьшение натуральных наносов до модельных значений должно контролироваться соотношениями (4.17) и (4.18).

Это, в частности, означает, что, если взаимодействие руслового и подруслового потоков моделируемого объекта подчиняется условию (4.6) (т. е. русло сложено мелкими наносами), то подрусловой поток может не приниматься во внимание, и состав условий подобия в этом случае ограничивается соотноше-



ниями (4.4), (4.5) и (4.11)—(4.13). Однако осложняющим моментом здесь оказывается невозможность выполнения условия (4.12), поскольку и без того мелкие натурные грунты практически трудно уменьшить в линейном масштабе модели, если он даже составляет 1:20 или 1:10.

Вместе с тем, если принять во внимание автомодельность гидравлического сопротивления при относительной зернистой шероховатости  $d/H \leq 0,001$ , то можно, по-видимому, преодолеть это осложнение, взяв для модели более крупный грунт, чем того требует ее линейный масштаб. Однако при этом модель и моделируемый объект должны удовлетворять условию (4.6). В то же время должно выполняться условие подобия подвижности наносов (4.13). Последнее означает, что модельный грунт должен иметь меньшую, чем натурный грунт, плотность.

Отклонение от условия  $\frac{d}{H} = idem$  влечет за собой необходимость внесения коррективов в масштабные множители скорости и времени морфологических процессов и в масштабный множитель расхода наносов. Однако если достигнуто подобие макротурбулентности речного потока, эта корректировка представляется вполне определенной операцией, выполняемой в ходе расчета характеристик модели и не изменяющей основных условий моделирования, приведенных выше.

Если моделируемый объект по характеру взаимодействия руслового и подруслового потоков соответствует условию (4.7), то в довольно широком диапазоне крупности натуральных и модельных наносов выполнение условий (4.4), (4.5) и (4.11)—(4.13) оказывается достаточным для обеспечения подобия гидравлических (кинематических) и морфологических процессов. С учетом рассмотренных выше представлений о механизме взаимодействия руслового и подруслового потоков это означает, что в данном диапазоне крупностей грунтов выполняются и дополнительные условия (4.17) и (4.18).

Вместе с тем есть некоторый диапазон крупности модельного грунта (около 0,2—0,5 мм), в котором, по-видимому, характер зависимостей  $\Delta t = f(d)$  и  $A_2 = f(d)$  изменяется и, следовательно, не выполняются условия (4.17) и (4.18). В результате на модели образуется донный рельеф, неподобный натурному, вызывающий нарушение гидравлического и кинематического подобия. Это, по существу, и есть проявление масштабного эффекта, избежать которого можно двумя путями: либо укрупнением модельного грунта с соответственным уменьшением его плотности (при этом обязательны корректировки масштабных множителей скорости и времени морфологических процессов и расхода русловых наносов), либо укрупнением линейного масштаба модели.

Поскольку еще нет расчетных приемов оценки величин  $\Delta t$  и  $A_2$ , выбор нужного грунта для модели может осуществляться подбором путем постановки градуировочных экспериментов в гидравлическом лотке.

Глава 5

**ЛАБОРАТОРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ  
И МЕХАНИЗМА ФОРМИРОВАНИЯ ГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКОГО СОСТАВА  
ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ В РЕЧНЫХ РУСЛАХ**

Механическое взаимодействие потока и русла представляет собой внутреннее звено в цепи факторов, определяющих русловой процесс.

Размеры и форма русла, подвижность наносов, геометрические и динамические характеристики русловых мезо- и микроформ, расход и сток донных наносов, темпы плановых и внутрирусловых деформаций являются результатом этого взаимодействия. Заданная в данных климатических и геоморфологических условиях система поток—русло обладает свойством саморегулируемости. Характер непосредственного механического взаимодействия активной жидкой и инертной сыпучей сред определяется прежде всего их структурой и является самым чувствительным элементом этой саморегулируемой системы.

Вместе с тем до сих пор в литературе исследованию структуры потока уделяется несравненно больше внимания, чем характеристикам сыпучей среды, слагающей русло. Если при исследовании турбулентной структуры потока привлекается и широко используется аппарат математической статистики, то при описании свойств наносов, как правило, ограничиваются заданием среднего диаметра смеси песка и иногда — характеристикой неоднородности в какой-либо форме отношения двух обеспеченных диаметров, снятых с интегральной кривой гранулометрического состава. При этом используется б-фракционный анализ.

Очевидно, одной из основных причин неудовлетворительного состояния методов расчета русловых деформаций и таких характеристик движения наносов, как критические скорости сдвига частиц, сплошность и скорость их перемещения, расход донных и взвешенных наносов, формирование и динамика микроформ, взаимодействие взвешенных и донных наносов, является отмеченная выше грубая схематизация сыпучей среды. Средний диаметр смеси не выражает достаточно полно динамических свойств всей смеси. Необходимость использования в расчетах транспорта наносов более чувствительных, чем средний диаметр, статистических характеристик неоднократно отмечалась в литературе и ранее, но вопрос о том, какими именно характеристиками нужно пользоваться, остается открытым.

Встречающееся в настоящее время в литературе мнение о том, что роль крупности и гранулометрических характеристик наносов особенно велика в русловом процессе горных рек и потоков при значениях относительной гладкости потока  $\frac{H}{d} \leq 10^3$  и очень мала при  $\frac{H}{d} > 10^3$ , нам представляется справедливым лишь отчасти, так как и в руслах крупных равнинных рек со значениями  $\frac{H}{d} = 10^4 \div 10^5$  повсеместно наблюдается четкая дифференциация и сортировка донных наносов по длине и ширине речного русла в соответствии с его морфологическим строением и структурой руслового потока.

В Русловой лаборатории ГГИ были выполнены лабораторные исследования переформирования гранулометрического состава наносов на размываемых моделях речных русел, основанные на методе статистического анализа, разработанном во Всесоюзном нефтяном научно-исследовательском геологоразведочном институте (ВНИГРИ) [139, 140, 230, 231, 233].

Экспериментальное исследование гранулометрического состава наносов на деформируемых моделях, в отличие от методики, принятой в геологии [230, 232], позволяет более полно охватить детали процесса и механизма гидродинамической пересортировки сыпучего материала в руслах рек, количественно освещая характеристики грунтов и активной среды седиментации (осадконакопления) в данных фациальных (осадкообразующих) условиях. При этом представляется возможным располагать сведениями и об исходном грунте, подаваемом на модель. Получение всех этих характеристик в натуральных условиях весьма затруднительно.

### **5.1. Методика статистического анализа гранулометрического состава наносов, разработанная во ВНИГРИ**

В геологии (литологии) обычно рассматриваются три основные макрофазии по условиям образования осадков<sup>1</sup>: континентальная, прибрежная и морская. Каждая из этих макрофазий подразделяется на целый ряд фаций и микрофаций. Например, речная и дельтовая фации входят в континентальную обстановку седиментации.

Для описания механизма дифференциации обломочного материала в природе методика ВНИГРИ наряду с общепринятым методом гранулометрического анализа по массе рекомендует метод гранулометрического анализа, основанный на косвенном счете зерен [229, 230]. Специальными исследованиями было установлено [230], что для осадков различных фациальных типов переход на косвенный счет зерен дает различный эффект в трансформации эмпирических полигонов распределения, построенных по массе. Например, в условиях сильного динамического воздействия на частицы осадков, претерпевших длительный перенос и неоднократную динамическую пересортировку и переработку (пески пустынь, морских пляжей), пересчет по счету не приводит к существенной трансформации эмпирических полигонов распределения, построенных по массе. В этом случае несколько сдвигаются лишь меры расположения распределений в сторону мелких размеров частиц. Для других типов осадков (продуктов природного разрушения магматических пород, речных наносов, отложений морских впадин) эмпирические полигоны распределений (ЭПР) одних и тех же проб по массе и по косвенному счету могут давать противоречивые результаты. Косвенный счет зерен увеличивает статистическую значимость мелких фракций,

---

<sup>1</sup> Под осадками в геологии подразумеваются продукты разрушения земной коры, отложившиеся на поверхности суши или в водной среде в результате их переноса ветром, водой или льдом.

но умаляет представительность крупных. При анализе по массе, наоборот, увеличивается статистическая значимость крупных фракций, но умаляется значение мелких фракций. Получается, что по массе статистическое значение имеет даже несколько самых крупных зерен, например, общей массой  $p_i$  г, а при переходе на косвенный счет их статистическое значение исчезает, но зато статистическую значимость по счету приобретают тысячи мелких зерен, в сумме также составляющих  $p_i$  г.

Исследование гранулометрического состава обломочного материала одновременно по массе и методом косвенного счета способствует получению более полной и подробной информации о динамических условиях седиментации в различных фациальных условиях, чем при использовании только метода по массе.

Переход на косвенный счет зерен частных фракций дробного ситового рассева можно производить делением суммарной массы частной фракции на массу зерен среднего размера этой же фракции по формуле:

$$n_i = \frac{g_i}{\Delta g_i} = \frac{g_i}{\Delta W_i \Delta \gamma_T}, \quad N = \sum_{i=1}^m n_i, \quad (5.1)$$

где  $n_i$  — число зерен в  $i$ -той ситовой фракции;  $g_i$  — масса  $i$ -той ситовой фракции, г;  $\Delta g_i$  — масса зерен среднего размера  $i$ -той фракции, г;  $\Delta W_i$  — объем зерен среднего размера  $\Delta g_i$   $i$ -той фракции, мм<sup>3</sup>;  $\Delta \gamma_T$  — средняя плотность зерен кварц-полевошпатового состава для всех фракций (2,7 г/см<sup>3</sup>);  $N$  — общее число зерен по всем фракциям;  $m$  — число частных ситовых фракций.

Проведенные исследования показали, что наиболее подходящей геометрической формой для аппроксимации зерен песчаного размера при пересчете является трехосный эллипсоид. Большое значение имеет окатанность зерен. Большая степень окатанности сближает реальные зерна с моделью трехосного эллипсоида  $\Delta W_i = \frac{1}{6} \pi abc$ , где  $a$ ,  $b$  и  $c$  — соответственно, максимальный, средний и минимальный размеры частиц.

В тонкозернистых фракциях < 0,1 мм степень окатанности зерен уменьшается, зерна — угловатые, необработанные обломки. Однако трехмерность и главное — корреляционное соотношение размеров осей зерен этих фракций сохраняются.

Сравнение статистических оценок, полученных при аппроксимации формы реальных зерен как формой шара, так и трехосного эллипса с введением соответствующих пофракционных поправок — коэффициентов  $\Delta p_i$  (отношения массы среднего зерна — шара к среднему зерну — эллипсоиду), показало, что получаются практически одинаковые значения статистик. Это указывает на то, что переход на косвенный счет зерен можно осуществлять при аппроксимации зерен формой шара, при этом не требуется вводить никаких поправок на эллипсоидальность реальных зерен. Введение этих поправок нужно только для более точного определения абсолютного числа зерен в ситовых фракциях, значение которого при сравнениях проб не является существенным.

Переход на косвенный счет осуществляется при аппроксимации реальных зерен формой трехосного эллипса и вычисляется по формуле:

$$n_i = \frac{g_i}{\frac{\pi}{6} abc \Delta \gamma_T} = \frac{g_i}{0,52 \cdot 1,49 \cdot 1,14 \cdot 0,84 d_i^3 \cdot 2,7} = \frac{g_i}{1,96 d_i^3}, \quad (5.2)$$

$$N = \sum_{i=1}^m n_i, \quad a = 1,49d, \quad b = 1,19d, \quad c = 0,84d.$$

Для установления допустимой концентрации тяжелых минералов в осадках, при которой можно полагать, что средняя плотность зерен кварц-полевошпатового состава в целом составляет примерно  $2,7 \text{ г/см}^3$ , были проведены специальные эксперименты с оценкой статистик при разном выходе (содержании) тяжелых минералов в смеси. В результате этих опытов было установлено, что максимально допустимая концентрация тяжелых минералов в пробе осадков, не влияющая на ход пересчета, не должна превышать 2 % по массе. При этом условии среднюю плотность зерен можно принимать равной  $2,7 \text{ г/см}^3$ .

На примере десятков тысяч анализов было показано, что в абсолютном большинстве ситовых анализов содержание тяжелой фракции в естественных песках всех геологических возрастов колеблется от 0,2 до 2,0 %, т. е. ниже допустимого предела [230].

Во ВНИГРИ было накоплено около 4000 дробных ситовых анализов, из которых больше половины принадлежат современным осадкам и около половины — древним осадкам различного возраста.

Ситовой анализ может иметь различную дробность, которая определяется знаменателем геометрической прогрессии (ЗГП) или модулем размеров ячеек сит. Ситовой анализ частиц 2,0–0,05 мм может быть 36- (ЗГП=1,12), 19- (ЗГП=1,25), 12-фракционным (ЗГП=1,41) и 6- или 5-фракционным с постоянным и переменным модулем. В России широко используется малофракционный ситовой анализ. В геологии применяется ситовой анализ, состоящий из следующих частных фракций: 1,0; 1,0–0,5; 0,5–0,25; 0,25–0,1; 0,1–0,01 (модуль соответственно составляет 2; 2; 2,5; 10,0). В гидрологии гранулометрический состав часто разделяется на фракции: 2,0–1,0; 1–0,5; 0,5–0,2; 0,2–0,1; 0,1–0,05 мм (модуль 2; 2; 2,5; 2; 2). Иногда производится ситовой анализ, состоящий из 6 фракций, жестко связанных постоянным модулем 2,0, например: 2,5–1,25; 1,25–0,63; 0,63–0,135; 0,135–0,16; 0,16–0,08; 0,08–0,04 мм.

Вместе с тем и в России и за рубежом промышленность изготавливает наборы сит, позволяющие производить 36- и 19-фракционные ситовые анализы песчаных наносов.

Прежде чем окончательно остановиться на 19-фракционном анализе проб песка, во ВНИГРИ проводились специальные исследования по корреляции результатов ситовых анализов различной дробности. Для выбора наиболее информативного варианта было рассеяно 70 проб песков различного гранулометрического состава на 36, 19, 6 и 5 фракций с постоянными и переменными ЗГП [230].

Путем статистической обработки результатов рассева на ЭВМ методом моментов для каждого эмпирического полигона распределения были вычислены четыре пары (по массе, по счету) статистических параметров: средний размер, коэффициенты вариации, асимметрии и эксцесс. В результате сравнения полученных данных было установлено, что 36- и 19-фракционные анализы обладают одинаковой и наибольшей информативностью по сравнению с малофракционными анализами, которые могут быть использованы только для оценки средних размеров зерен. С очень большой осторожностью 6-фракционный анализ может быть использован для определения степени отсортированности осадков.

Специальными исследованиями также было установлено, что оптимальной навеской для 19-фракционного ситового анализа следует считать 50 г породы, а время механического рассева указанной навески не должно быть менее 15 мин. Увеличение дробности рассева тонкозернистых «хвостовых» фракций 0,032–0,025 мм при статистической обработке дает возможность более правильно оценить значения гранулометрических параметров.

В диапазоне 2,5–0,04 мм 19 частных фракций связаны знаменателем геометрической прогрессии 1,25. Обычно по оси абсцисс откладывают логарифмы частных фракций, а по оси ординат — их процентные содержания, которые вычисляются в двух вариантах: по массе и косвенному счету.

Наиболее часто при рассмотрении ЭПР наблюдается постепенное убывание содержания частных фракций по обе стороны от моды (наиболее часто повторяющейся величины). Однако бывает так, что вдоль оси крупности убывание содержания фракций сменяется возрастанием, т. е. на склоне ЭПР проявляется перегиб. В этом случае одна из частных фракций имеет минимальное содержание, или дефицит. Дефицитны обычно тонкозернистые фракции, чаще всего 0,05–0,063; 0,063–0,08 или 0,08–0,1 мм. Наличие дефицитов неодинаково в песках различного происхождения. В современных континентальных дюнах по данным ВНИГРИ дефицит наблюдается по массе в 2,4 % случаев, а по счету — в 0,6 % случаев, в речных песках соответственно в 24,2 и 18,6 % случаев. В среднем в песках всех геологических времен и современных дефицит по массе составляет 30 %, по счету — 16 %.

Наличие дефицитов физически объясняют наличием в осадках смеси двух независимых гранулометрических распределений: песчаного (2,0–0,05 мм) и алевритового (0,05–0,004 мм). Происхождение дефицитов связывают с гидродинамическими характеристиками, обуславливающими перенос песчаных частиц двумя различными способами: во взвешенном состоянии и сальтацией, или перекачиванием по дну. Этим различным механизмам движения частиц соответствуют свои модальные фракции.

Во ВНИГРИ также было установлено, что распределения песчаных осадков (логарифмические) преимущественно бывают одномодальными (более 82 %). При этом предполагается, что распределения могут быть дискретными и могут состоять из нескольких независимых гранулометрических субраспределений. Логарифмирование размеров зерен осадков маскирует их дискретное содержание.

В методе ВНИГРИ производится достройка тонкозернистых «хвостовых» фракций, и 19-фракционный анализ превращается в 22-фракционный. Весь

процесс производится автоматически. Правомерность этой процедуры проверилась математически на фактическом материале с помощью сит, позволяющих рассев тонкозернистых фракций [231].

Общий анализ всего накопленного во ВНИГРИ материала позволил составить вариационный ряд гетерогенности полимодальных и одномодальных ЭПР. Этот ряд состоит из 6 членов, которые отражают основные условия динамической переработки обломочного материала в природных условиях.

Первые два члена ряда — четко выраженные трехмодальные и двухмодальные (гетерогенные) ЭПР. Процентные содержания подсовокупностей в этих природных смесях могут быть совершенно различными. Статистическая обработка таких ЭПР фактически сводится к индивидуальному выделению подсовокупностей, т. е. нахождению их средних размеров, стандартов и процентного содержания.

Третий член ряда — пологовершинный гетерогенный ЭПР с небольшим перегибом в центре распределения между двумя обычно очень слабовыраженными модами. Такой ЭПР часто обладает симметричностью, а его эксцесс приближается к минимальному значению — 2,0.

Четвертый член ряда — четко выраженный одномодальный сильноскошенный ЭПР, у которого  $|Cs| \geq 0,45$ , а  $|e| \geq 0,85$ . Процентное содержание подсовокупностей в таком ЭПР может изменяться от 25 до 50 %.

Пятый член ряда — слабогетерогенный, асимметричный, очень крутовершинный одномодальный ЭПР. Положительные значения асимметрии и эксцесса у таких ЭПР достигают наибольших значений. Эти ЭПР состоят из смеси двух совокупностей, причем одна из них (более крупнозернистая) является доминирующей, а тонкозернистая имеет, как правило, резко подчиненное значение, и ее содержание не превышает 25 %.

Шестой член ряда — гомогенный одномодальный симметричный ЭПР, обычно подчиняющийся логнормальному распределению, абсолютные величины коэффициента асимметрии и эксцесса его приближаются к нулевым значениям.

Было установлено, что в диапазоне распределения песчаных осадков преобладают одномодальные ЭПР, которые по массе составляют 91,7 %, а по косвенному счету частиц 85,1 %. Двухмодальные ЭПР соответственно составляют 7,6 и 13,6 %. Трехмодальные ЭПР обладают ничтожным распространением и соответственно составляют 1,7 и 1,3 % [230].

Статистическая обработка одномодальных ЭПР подразумевает определение следующих статистических характеристик: максимального и минимального размера зерен, мер расположения (мода, медиана, арифметический средневзвешенный размер), мер отсортированности осадков (стандарт, коэффициент вариации), а также коэффициента асимметрии и эксцесса.

Кроме перечисленных параметров, вычисляются и некоторые другие критерии, по которым можно судить о характере ЭПР и возможности его аппроксимации той или иной теоретической кривой, например, известный критерий «хи-квадрат», который позволяет судить о степени соответствия эмпирической кривой теоретической логарифмически нормальной.

Перечисленные статистические характеристики вычисляются по следующим зависимостям:

— арифметический средневзвешенный размер:

$$x = 0,01 \sum_{i=1}^m h_i n_i, \quad (5.3)$$

где  $h = -\ln d$ ;  $m$  — количество частных фракций в ситовом анализе;  $n$  — процентное содержание частных фракций по массе или по косвенному счету зерен;

— стандарт:

$$\sigma = \sqrt{0,01 \sum_{i=1}^m (h_i - x)^2 n_i}; \quad (5.4)$$

— коэффициент вариации:

$$C_v = \frac{\sigma}{x}; \quad (5.5)$$

— коэффициент асимметрии:

$$C_s = 0,01 \sum_{i=1}^m \left[ \frac{(h_i - x)}{\sigma} \right]^3 n_i; \quad (5.6)$$

— эксцесс:

$$\varepsilon = 0,01 \sum_{i=1}^m \left[ \frac{(h_i - x)}{\sigma} \right]^4 n_i - 3. \quad (5.7)$$

Величина  $\varepsilon$  принимает значения  $\varepsilon = 0$ ,  $\varepsilon > 0$  и  $\varepsilon < 0$ . Минимальное значение  $\varepsilon = -2$ . При  $\varepsilon = 0$  ЭПР по своей крутовершинности соответствует нормальной кривой. Если  $\varepsilon > 0$ , то ЭПР является более крутовершинным, чем нормальная кривая, а при  $\varepsilon < 0$ , наоборот, более пологовершинным.

Физический анализ гранулометрического состава осадков, отражающий динамическое воздействие среды седиментации на сыпучую среду, производится на основе используемых в методе ВНИГРИ статистических характеристик.

Меры расположения ЭПР (средний размер, медиана и модальная фракция) выражают общий гранулометрический уровень осадка.

Максимальный размер зерен в пробе связан с общей энергией потока и характеристиками турбулентности.

Стандарт и коэффициент вариации выражают меру отсортированности осадков. Большие значения этих параметров соответствуют худшей отсортированности, малые значения — лучшей отсортированности. Стандарт и вариация ЭПР осадков, очевидно, также связаны с турбулентностью потока, размахом пульсаций скорости.

Асимметрия и эксцесс являются чрезвычайно важными характеристиками, по которым непосредственно судят, в какой мере тот или иной ЭПР приближается к теоретическому логнормальному распределению. Благодаря этим параметрам можно производить оценку гетерогенности одномодальных асимметричных ЭПР.



Если размер моды больше среднего размера ЭПР, то такой ЭПР обладает положительной асимметрией, и его «хвост» находится в относительно тонкозернистых фракциях. Положительная асимметрия ЭПР означает, что его крупнозернистые фракции отсортированы хорошо, а тонкозернистые — плохо. Наоборот, если размер моды меньше среднего размера ЭПР, то такой ЭПР имеет отрицательную асимметрию, и его «хвост» расположен в более грубозернистых фракциях. Отрицательная асимметрия указывает на то, что тонкозернистые фракции ЭПР отсортированы лучше крупнозернистых. Абсолютные величины асимметрии дают возможность судить о количественной стороне разницы между средним размером и модой.

Асимметрия указывает на динамическую структуру взаимодействия потока и сыпучей среды, на динамическую особенность этого взаимодействия. Асимметрия ЭПР по косвенному счету указывает на степень участия в осадках зерен тонко- и крупнозернистых фракций, позволяя судить об относительной энергии сил среды седиментации. При этом абсолютная величина параметра имеет важное диагностическое значение для раскрытия и определения динамики осадконакопления.

Экссесс указывает на стабильность или интенсивность динамической пересортировки материала. Стабильность в определенной мере можно сопоставлять с длительностью или интенсивностью обработки материала.

При анализе иногда используются пятый и шестой моменты  $\mu_5$  и  $\mu_6$ . Пятый момент  $\mu_5$  повторяет смысл асимметрии с большей реакцией на «хвосты» распределения. Шестой момент  $\mu_6$  повторяет смысл эксцесса, но с большей реакцией на «хвосты» распределения.

Оба этих параметра изучены мало. Для выявления степени соответствия ЭПР с теоретическим, логнормальным законом распределения используется критерий различия  $\chi^2$ . Для ЭПР с 19-фракционным распределением степень свободы составляет  $19-1=18$ . По числу степеней свободы выбираются табличные значения критерия  $\chi^2$  на уровнях значимости 99 и 95 %, которые соответствуют значениям 7,01 и 9,39. Если значения критерия  $\chi^2$  меньше указанных значений, имеет место соответствие эмпирической, теоретической и логнормальной кривых распределений.

При палеодинамических реконструкциях во ВНИГРИ [232, 233] пользуются динамогенетической диаграммой «асимметрия-эксцесс» по косвенному счету зерен ЭПР (рис. 5.1). Графическая корреляция асимметрии эксцесса носит нелинейный характер и хорошо аппроксимируется параболой вида  $\pm\varepsilon=2C_s^2-1,5$ .

Эта диаграмма основана на количественной оценке дифференциации обломочного вещества в природе песчано-алевритовой размерности.

Эталонная диаграмма разделяется на ряд генетических участков. Эти участки на рис. 5.1 обозначены римскими цифрами. Участок I диаграммы характеризует застойный режим седиментации, в условиях которого основная масса осадка выпадает на дно из взвешенного состояния. При проверке на фактическом материале выяснилось, что в эту область попадают осадки проб с глубин 20–1985 м морских акваторий в зонах резкого перепада глубин. В районах активизации донных течений или мутьевых потоков происходит изменение гранулометри-

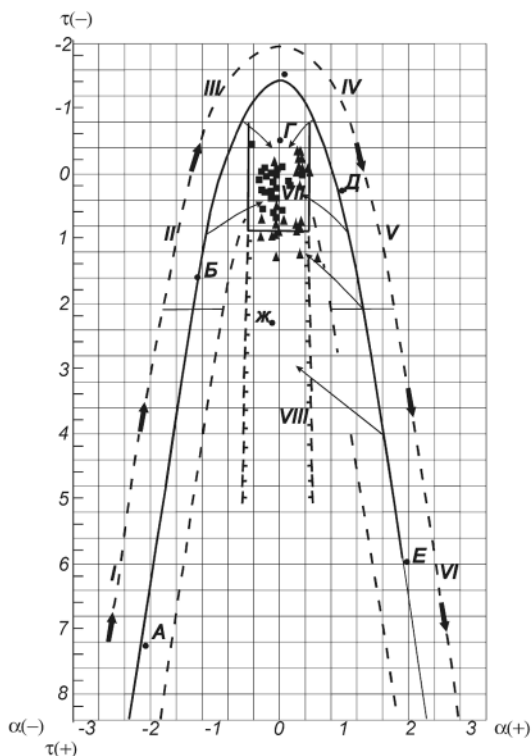


Рис. 5.1. Генетическая диаграмма «асимметрия – эксцесс» по косвенному счету зерен; квадрат – модель р. Иртыш, треугольник – модель р. Волги

по косвенному счету они состоят из частиц песчаного и алевритового распределений, смещенных почти в равных пропорциях относительно среднего размера всего распределения в целом, что дает значения асимметрии, близкие к нулю.

Все точки-пробы перечисленных речных микрофаций оказались сконцентрированными в вершине параболы: в верхней части II участка и на III и IV участках. Точки-пробы пойменных осадков крупных рек попали в верхнюю часть II участка параболы, III и IV участки отвечают речным течениям, причем III участок параболы соответствует медленным течениям, а IV участок параболы — быстрым. По гранулометрическому составу осадки при медленных течениях равнинных рек мало чем отличаются от осадков морских течений. 160 точек проб песков Каракумов и Кызылкумов заняли верхнюю половину прямоугольника (62 %), а остальные (38 %) точки-пробы оказались сконцентрированными около прямоугольного участка со стороны вершины параболы. Такое размещение точек проб на диаграмме говорит о том, что первоначально пески среднеазиатских пустынь были сформированы в речных фациях, об этом также свидетельствует расположение точек-проб песков континентальных дюн из дельты р. Волги, которые сосредоточились также в верхней половине прямоугольного участка.

ческого состава осадков, точки, пробы которых на диаграмме перемещаются вверх по параболе во II участок. Вследствие появления течений в осадках увеличивается общее число частиц песчаной размерности.

В долинах равнинных рек опробовались осадки русел с поверхности песчаных гряд, средних русловых форм (пляжей, кос), пойм, террас. Из перечисленных микрофаций в бассейнах Волги, Дона, Немана, Западной Двины, Днепра, Урала, Ангары и т. д. было собрано свыше 3000 проб грунта.

Кроме того, было изучено и нанесено на диаграмму около 150 точек осадков, сформированных в аналогичных косослойчатых сериях в древних отложениях — от девонских до среднеплиоценовых. В общей сложности было собрано около 500 проб осадков, образованных в условиях крупных гравитационных речных течений. ЭПР этих осадков отличаются тем, что

Длительная эоловая переработка речных песков приводит к удалению из них всех частиц алевритового распределения и превращает ЭПР в почти логнормальное распределение, несколько смещенное в сторону алевритовых фракций. В результате получается, что верхняя половина прямоугольника диаграммы отвечает эоловым осадкам, при этом часто наблюдается переход в эту зону точек-проб из III и IV участков параболы. Подобное смещение обусловлено тем, что речные осадки на огромных территориях очень часто уносятся ветром.

Более 750 точек-проб прибрежных песков Балтийского, Черного, Азовского, Каспийского, Охотского морей, Ирбетского и Татарского проливов, Нарвского, Рижского, Финского и Таганрогского заливов на диаграмме сгруппировались в виде довольно широкой полосы, образуя среднюю и нижнюю части правой ветви параболы (V и VI участки).

Общей особенностью этих осадков является то, что они были сформированы в условиях выхода волн на мелководье, постоянного наката волн и деятельности ветра в зоне, ограниченной нейтральной полосой и простираением береговых дюн. Рассматривая ЭПР этих осадков, видно, что по массе содержание «хвостовых» алевритовых фракций в них практически сводится к нулю, и наоборот, по косвенному счету содержание этих же фракций дает некоторый «всплеск», являющийся причиной больших положительных значений асимметрии. Резкая крутовершинность ЭПР этих осадков дает большие положительные значения эксцесса.

Эоловая обработка песков морских пляжей в основном сводится к дальнейшему извлечению из них частиц алевритовой размерности. Часто мощные накаты волн и деятельность ветра полностью очищают пески от примеси алевритовых частиц. Так, например, точки-пробы карбонатных песков кубинских пляжей, потерявших все алевритовые частицы, группируются вдоль VII участка. Для этих осадков характерны почти полное совпадение конфигураций ЭПР по массе и счету и очень близкие значения мер их расположения.

Участок VIII оказался местом сосредоточения точек-проб осадков морских побережий, где скорость привноса обломочного материала значительно уступает скорости механической дифференциации частиц песчаной и алевритовой размерности.

На диаграмме часто наблюдается смещение точек-проб из V и VI участков параболы в сторону оси ординат, осредненные направления этих смещений указаны на рисунке стрелками.

Во всех трех прибрежно-морских микрофациях могут формироваться осадки, ЭПР которых приобретают симметричность или логнормальность, но микрофации на диаграмме четко не обособлены внутри V и VI участков параболы. Аналогично, пески морских кос и побережий, образованные в условиях выхода волн на мелководье и сильных вдольбереговых течений, сгруппировались в виде вытянутой полосы, заняв IV и V участки.

Таким образом, произошло наложение точек проб осадков сильных речных и вдольбереговых течений. Следовательно, можно сделать вывод, что речные и вдольбереговые морские течения формируют довольно сходные в гранулометрическом отношении осадки. При этом различие проявляется в значениях

коэффициента вариации, которые для речных осадков имеют несколько повышенное значение.

В связи с отмеченным фактом существует предположение о влиянии фактора наследственности. Так, например, можно предполагать, что пески черноморского пляжа, оказавшиеся приуроченными к IV участку параболы, являются еще не полностью пересортированными речными осадками, принесенными к морю реками.

Таким образом, в природе могут одновременно действовать как фактор наследственности, так и фактор динамической тождественности вдольбереговых и речных течений.

Оказалось также, что приливо-отливные течения формируют осадки, сходные по гранулометрическому составу с речными, причем, чем сильнее приливо-отливные течения, тем осадки, ими сформированные, становятся более похожими на речные.

На разных стадиях формирования гранулометрического состава осадков фактор наследственности играет важную роль, но по мере транспортировки осадков к бассейну седиментации уже в условиях равнинных рек этот фактор теряет свое значение, так как начинается процесс гранулометрического «созревания» осадков. Этот постепенный процесс заключается в последовательном удалении из осадков всех частиц алевритового распределения. Зрелыми в гранулометрическом отношении следует считать те песчаные осадки, ЭПР которых по косвенному счету зерен становятся симметричными или близкими к логнормальному распределению, точки-пробы которых на диаграмме концентрируются на VI и VII участках.

Известно, что в областях сноса обломочных пород может происходить активное разрушение магматических пород. В связи с этим производился дробный рассев осадков, полученных за счет непосредственного природного разрушения интрузивных и эффузивных пород. После анализа выяснилось, что в результате образуются чрезвычайно плохо отсортированные осадки, состоящие из всех частных фракций дробного ситового анализа. По массе ЭПР этих осадков очень близки к логнормальному распределению. По косвенному счету частиц они, наоборот, гетерогенные. В этих осадках господствует тонкозернистая (алевритовая) подсовокупность. Ее содержание изменяется от 87,5 до 92,8 %. Крупнозернистая песчаная подсовокупность имеет резко подчиненное содержание 12,5–7,2 %.

Таким образом, для раскрытия происхождения (генезиса) того или иного осадка в природе по вычисленным значениям асимметрии и эксцесса ЭПР этого осадка неизвестного происхождения на диаграмму наносятся соответствующие им точки-пробы. В зависимости от того, в какой из генетических участков диаграммы попадут эти точки-пробы, соответствующим осадкам следует приписать то фаціальное происхождение, которое определяется данным участком эталонной диаграммы.

Следовательно, определение фаціальных и микрофаціальных обстановок седиментации происходит опосредованно через характер и энергию динамических сил среды седиментации. Наиболее четко на диаграмме распознаются следующие условия седиментации: застойные, речные течения, выходы воды

на мелководье, накат волн и деятельность ветра. При этом эти зоны между собой связаны тенденцией уменьшения содержания в осадках фракций алевритового распределения, определяющей гранулометрическую зрелость осадков. Гранулометрическая зрелость возникает в результате направленного процесса от снижения полимодальности через асимметрию к логнормальности и затем к крутовершинности ЭПР. Для того чтобы установить ряд гранулометрической зрелости осадков неизвестного происхождения, следует сначала разграничить ЭПР осадков по возрастающим значениям критерия «хи-квадрат». Затем в этом ряду до значения критерия, равного  $\chi^2=7,0$ , произвести перестановку членов ряда в порядке возрастания значений асимметрии и убывания значений эксцесса, так как отклонения от логнормального распределения могут произойти за счет увеличения положительных значений эксцесса при сохранении симметричности распределения, а этими признаками характеризуются наиболее зрелые в гранулометрическом отношении осадки.

Описанный метод статистического анализа гранулометрического состава наносов, включающий этапы отбора и рассева проб, автоматической обработки на ЭВМ и дальнейшей физической интерпретации результатов, открывает широкие возможности для детального изучения процессов переформирования наносов на деформируемых моделях речных русел.

## **5.2. Лабораторные исследования переформирования гранулометрического состава донных отложений на деформируемых моделях русел рек Иртыш и Волга**

Обычно считается, что движение донных наносов на уровне отдельных частиц и процесс их сортировки имеет хаотический, неупорядоченный характер.

Применение разработанной во Всесоюзном научно-исследовательском нефтяном институте методики статистического анализа гранулометрического состава наносов песчано-алевритовой размерности позволяет исследовать закономерности гидродинамической пересортировки наносов в речных руслах.

В качестве иллюстрации использования этого метода на размываемых моделях речных русел приведем результаты исследований на двух гидравлических моделях — модели излучины протоки Быстрая р. Иртыш и модели прямолинейного участка р. Волги — нижнего бьефа Куйбышевской ГЭС. Основная отличительная черта исследований на этих моделях состоит в том, что опыты на модели р. Иртыш проводились в условиях русла динамического равновесия с непрерывной подачей наносов в начале модели, тогда как на модели приплотинного участка нижнего бьефа р. Волги наносы не подавались.

### **5.2.1. Модель р. Иртыш**

Модель крутой излучины протоки Быстрой была выполнена в горизонтальном масштабе 1:200 и в вертикальном 1:50. Длина модели составляла 16 м,

ширина — 2,5–1,5 м. Исходное ровное дно имело продольный уклон 0,004. Опыт на модели проводился при расходе воды 26 л/с с подачей песка расходом 60 г/с. Движение песка на модели происходило в виде микроформ. Уже через 1,5–2 ч на модели сформировался рельеф дна, который в дальнейшем не менялся в течение 31 ч, до прекращения эксперимента. Рельеф дна, сформировавшийся в результате опытов, изображен на рис. 5.2.

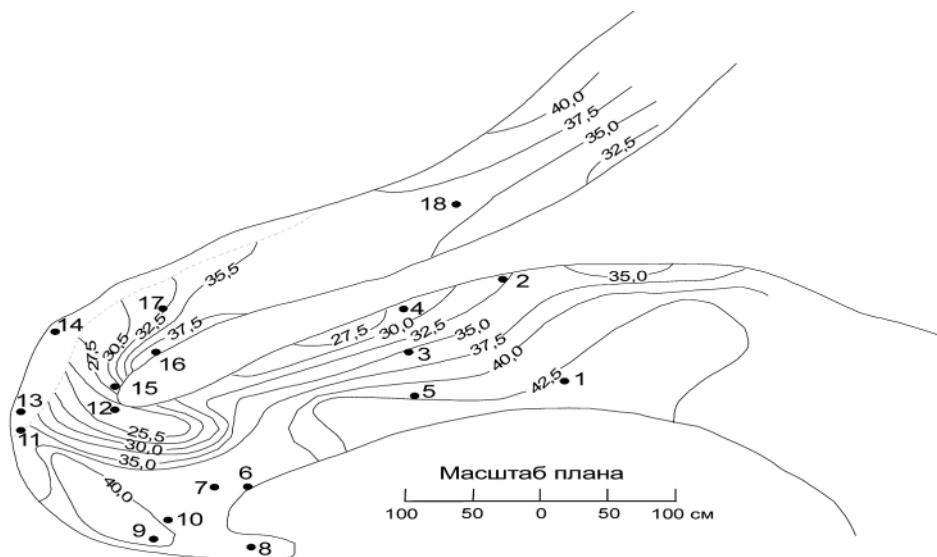


Рис. 5.2. Рельеф дна деформируемой модели р. Иртыш.  
Точки 1–18 – места взятия проб донных отложений

На рис. 5.3 представлено скоростное поле потока, соответствующее этому рельефу дна при заданном расходе воды. Как видно на рис. 5.2, вдоль левого берега входного участка модели образовался побочень с наибольшими значениями отметок дна 42,5 см (в условных отметках). Под действием сложной системы течений на излучине у внешнего, вогнутого, левого берега, в зоне водоворота (рис. 5.3), произошло отложение наносов, а у правого, выпуклого, берега в его вершине произошел размыв песка до бетонного основания модели с отметками 25,0 см.

В верхней части излучины с относительно малыми глубинами потока высота гряд составляла 0,5–1,0 см, длина — 15 см, скорость их перемещения — 0,66 см/с. На плесовых участках высота гряд — 3,0 см, длина — до 50 см, скорость их перемещения — 0,16 см/с. В среднем по всей излучине длина гряд составляла 15–20 см, скорость их перемещения — 0,3–0,4 см/с. Исходя из последних условий, песок, поданный в начале модели, проходит всю длину модели за 1,5 ч.

С целью изучения закономерностей гидродинамической пересортировки донных наносов производилось две серии отбора проб песка в различных точках модели до начала опыта при гладком дне и по прошествии 31 ч. Пробы во второй серии отбора в условиях сформировавшегося рельефа дна и микроформ

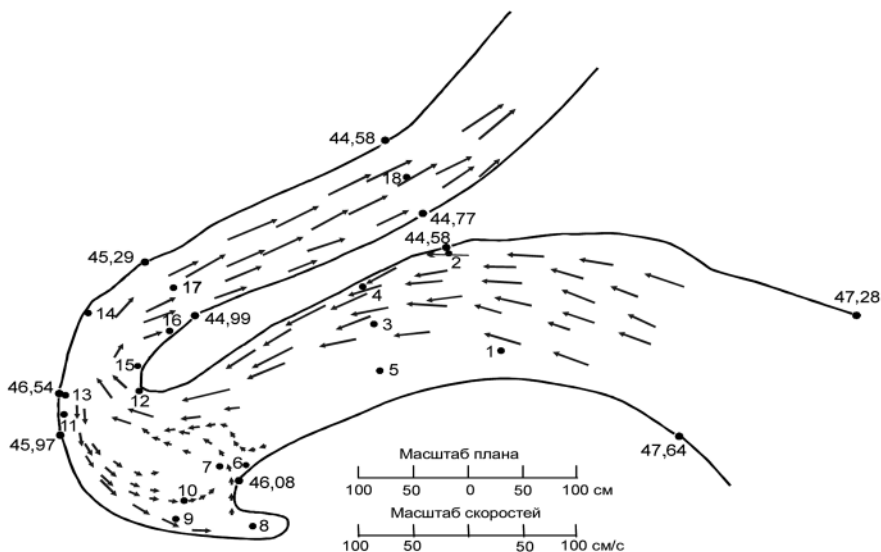


Рис. 5.3. Скоростное поле потока на модели р. Иртыш

речного русла брались в одноименных точках — на гребнях гряд, кроме точек 12, 13, 14, где песок размылся до бетонного основания (рис. 5.2).

Результаты статистического анализа гранулометрического анализа проб грунта представлены в табл. 5.1 по косвенному счету и в табл. 5.2 — по массе. Пробы для анализа, кроме отмеченных на рис. 5.2 точек, брались также в бункере для подачи наносов на модель и в песколовке после выхода наносов из модели. В указанных таблицах приведены значения критерия подвижности донных наносов по неразмывающей скорости  $v/v_0$  в каждой точке взятия проб грунта. При этом значения  $v/v_0$  установлены для крупности песка исходного состава при данной глубине в точке с помощью эмпирической зависимости  $v_0=f(H, d)$ , полученной в результате специальных исследований в лотке. Этот критерий в интегральной форме выражает меру взаимодействия потока с подстилающей сыпучей поверхностью дна при данном состоянии рельефа и динамических характеристиках активной среды. Поэтому критерий  $v/v_0$  может служить основой анализа происходящих переформирований гранулометрического состава наносов по всей площади модели. По значению критерия подвижности  $v/v_0$  модель фрагментируется на несколько зон с равными значениями  $v/v_0$  (рис. 5.4).

Статистические данные в табл. 5.1 и 5.2 приводятся по соответствующим группам с равными значениями  $v/v_0$ . Анализ данных этих таблиц показывает, что большинство статистических параметров распределения гранулометрического состава грунтов находится в хорошо выраженной зависимости от критерия подвижности песка  $v/v_0$ . Как видно из данных табл. 5.1, параметр  $N_T$  (количество зерен в 100 г, уменьшенное в  $10^3$  раз) исходного грунта в различных пробах колебался в пределах 6260—8450. В процессе опытов число зерен претерпело существенную трансформацию в различных точках модели в соответствии с установленными

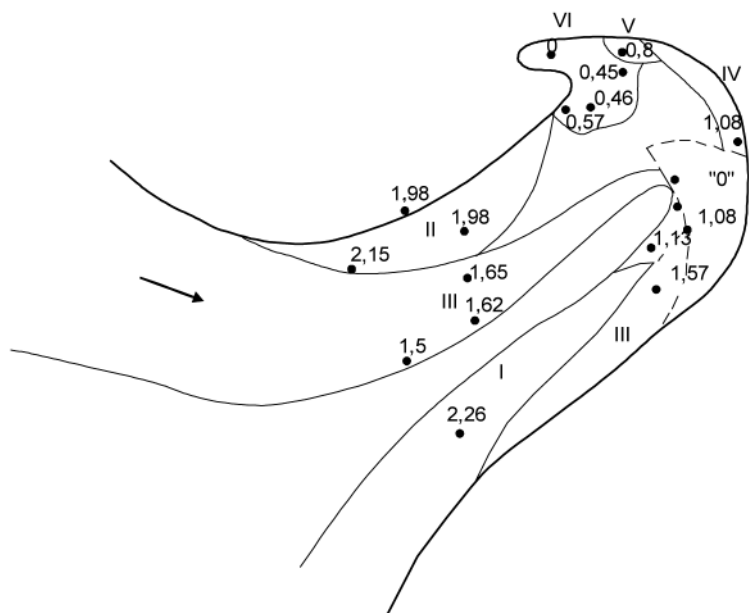


Рис. 5.4. Распределение критерия подвижности наносов на модели р. Иртыш

в этих точках значениями  $v/v_0$ . В застойной зоне со значениями  $0 < v/v_0 < 1,0$  параметр  $N_T$  увеличился в 2–3 раза, а в зонах  $v/v_0 > 1$  уменьшился с ростом  $v/v_0$ , составив наименьшее значение 3260 при максимальном значении  $v/v_0 = 2,3$ . В точке 8, где отсутствовали скорости потока и, соответственно, не могло происходить привноса частиц,  $N_T = 8820$ , т. е. близко к исходному грунту.

Разница в значениях  $N_T$  в подаваемом на модели грунте  $N_T = 6850$  и выходящем из модели  $N_T = 15450$  указывает, что в целом происходит укрупнение состава наносов на модели. Отсюда следует интересный вывод о том, что укрупнение наносов в русле реки может происходить не только в процессе самоотмостки, который в литературе традиционно относят к случаю отсутствия подачи наносов в начальном створе в связи с размывами в нижнем бьефе ГЭС или к меженным условиям в реках, но и при интенсивном транспорте донных наносов  $1 < v/v_0 \leq 2,3$  в условиях динамического равновесия потока и русла. Кроме того, возникает аналогия между описанным здесь случаем и повсеместно наблюдаемым на реках фактом уменьшения крупности донных наносов вниз по течению.

Из данных табл. 5.1 и 5.2 следует, что меры расположения эмпирических полигонов распределения (ЭПР) (мода, логарифмически средний размер) преобразованных на модели песков закономерно увеличиваются с повышением  $v/v_0$ . Этой же закономерности следуют максимальные  $C_{max}$  и минимальные  $C_{min}$  значения крупности в пробах песка, преобразованных на модели, и наиболее крупной фракции в пробе (табл. 5.2). Эти данные указывают, что по мере повышения уровня динамического взаимодействия, выражаемого мерой этого



**Таблица 5.1. Результаты статистической обработки по косвенному счету данных дробного рассева исходных и преобразованных проб на модели излучины Иртыша**

№ зоны с равными значениями, $v/v_0$	$v/v_0$	№ пробы	Количество частиц в 100 г пробы, умноженное на $10^3$	$M_0$ , мм	$C_{max}$ , мм	$\bar{x}$ , мм	$C_{min}$ , мм	Стандарт, $\sigma$	Коэффициент вариации, $C_V$	Коэффициент асимметрии $C_S$	Экцесс, $\epsilon$	$\chi^2$
VI	0,0	8	8820	0,14	0,43	0,12	0,03	0,57	1,11	-0,26	-0,12	3,00
	0,45	10	17480	0,11	0,34	0,11	0,03	0,47	1,02	-0,26	0,51	2,50
	0,46	7	10430	0,11	0,40	0,12	0,03	0,52	0,99	-0,21	0,24	2,40
	0,57	6	18150	0,06	0,35	0,08	0,02	0,65	1,82	-0,42	-0,46	7,50
	0,4	Сред.	13700	0,10	0,38	0,11	0,03	0,55	1,20	-0,30	0,22	3,70
V	0,8	9	24430	0,11	0,27	0,12	0,04	0,48	0,85	-0,10	0,58	2,43
IV	1,03	11	9200	0,14	0,41	0,13	0,04	0,49	0,85	-0,12	0,38	2,35
	1,08	15	4190	0,14	0,52	0,17	0,05	0,52	0,71	-0,05	0,05	0,63
	1,13	16	3940	0,16	0,53	0,17	0,04	0,60	0,82	0,31	0,04	5,70
	1,08	Сред.	5776	0,14	0,49	0,16	0,04	0,53	0,79	0,16	0,16	2,89
III	1,5	2	4910	0,14	0,49	0,17	0,05	0,47	0,64	-0,06	0,37	0,7
	1,57	17	2070	0,22	0,64	0,22	0,06	0,50	0,52	0,05	-0,13	0,9
	1,62	4	6070	0,14	0,49	0,16	0,04	0,49	0,73	0,05	0,75	3,77
	1,65	3	2060	0,14	0,47	0,17	0,05	0,47	0,64	-0,08	0,62	2,58
	1,6	Сред.	4500	0,16	0,52	0,18	0,05	0,48	0,63	-0,01	0,39	2,00
II	1,98	5	4600	0,18	0,50	0,18	0,05	0,49	0,66	0,03	0,52	2,27
	2,15	1	3920	0,18	0,56	0,18	0,06	0,46	0,58	-0,10	0,10	1,22
	2,1	Сред.	4300	0,18	0,53	0,18	0,06	0,47	0,62	-0,07	0,23	1,75
I	2,3	18	3260	0,23	0,55	0,20	0,06	0,45	0,50	-0,10	0,11	0,66
Исходные данные		1	7100	0,14	0,44	0,13	0,03	0,56	0,97	0,01	-0,05	2,47
		3	7760	0,14	0,43	0,14	0,03	0,53	0,90	-0,01	0,28	1,38
		2	6260	0,14	0,45	0,15	0,03	0,55	0,87	0,13	0,19	2,32
		10	7850	0,14	0,44	0,14	0,03	0,58	0,96	0,00	-0,07	2,76
		17	6940	0,14	0,44	0,15	0,05	0,49	0,77	-0,22	-0,13	2,22
		18	8340	0,14	0,43	0,13	0,04	0,54	0,96	-0,20	0,03	1,23
		13	7100	0,14	0,44	0,14	0,04	0,53	0,83	-0,16	-0,06	4,53
		12	8450	0,14	0,43	0,13	0,04	0,49	0,85	-0,33	0,13	3,20
		14	7800	0,14	0,43	0,14	0,04	0,51	0,87	-0,17	0,24	0,91
	Подача	6850	0,14	0,45	0,14	0,04	0,53	0,88	-0,16	-0,01	2,09	
	Выход из модели	15450	0,11	0,34	0,11	0,03	0,50	1,03	-0,02	0,14	0,90	

**Таблица 5.2. Результаты статистической обработки по массе данных дробного рассева исходных и преобразованных проб на модели излучины Иртыша**

№ зоны с равными значениями $v/v_0$	$v/v_0$	№ пробы	Наиболее крупная фракция, мм	$M_0$ , мм	$C_{max}$ , мм	$\bar{x}$ , мм	$C_{min}$ , мм	Стандарт, $\sigma$	Коэффициент вариации, $C_v$	Коэффициент асимметрии, $C_s$	Экссесс, $\epsilon$	$\chi^2$
VI	0,0	8	1,8	0,28	0,69	0,27	0,07	0,49	0,42	0,27	0,28	5,7
	0,45	10	1,8	0,14	0,56	0,20	0,06	0,53	0,59	-0,19	-0,48	11,3
	0,46	7	2,25	0,28	0,57	0,24	0,07	0,48	0,46	0,18	-0,28	4,0
	0,57	6	1,12	0,28	0,49	0,23	0,05	0,44	0,45	0,86	1,29	22,4
	0,4	Сред.	1,7	0,24	0,58	0,23	0,06	0,48	0,48	0,28	0,81	11,0
V	0,8	9	1,42	0,14	0,44	0,15	0,06	0,36	0,55	-1,05	3,92	26,7
IV	1,03	11	1,8	0,28	0,55	0,24	0,08	0,45	0,43	0,08	-0,33	4,03
	1,08	15	0,9	0,36	0,85	0,30	0,10	0,38	0,29	0,56	0,12	8,4
	1,05	Сред.	1,3	0,32	0,70	0,27	0,09	0,41	0,36	0,32	0,22	6,2
III	1,5	2	1,42	0,28	0,56	0,28	0,10	0,39	0,32	0,16	0,10	2,86
	1,57	17	1,42	0,45	0,66	0,36	0,12	0,39	0,23	0,55	0,82	7,19
	1,62	4	1,8	0,28	0,66	0,27	0,09	0,43	0,38	-0,06	0,04	4,16
	1,65	3	2,25	0,28	0,63	0,28	0,10	0,41	0,35	-0,05	0,36	3,64
	1,6	Сред.	1,70	0,32	0,63	0,29	0,10	0,39	0,32	0,15	0,30	4,3
II	1,98	5	2,25	0,36,	0,64	0,29	0,10	0,41	0,33	-0,01	0,49	3,75
	2,15	1	2,25	0,36	0,95	0,32	0,12	0,36	0,32	0,17	0,60	9,27
	2,1	Сред.	2,25	0,36	0,75	0,30	0,11	0,38	0,32	0,08	0,55	6,5
I	2,3	18	2,25	0,36	0,55	0,30	0,12	0,35	0,26	0,28	0,24	2,9
Исходные данные		1	2,25	0,28	0,77	0,27	0,10	0,45	0,39	0,02	0,67	5,46
		3	2,25	0,28	0,70	0,26	0,08	0,47	0,35	-0,14	0,71	6,17
		2	1,8	0,28	0,56	0,27	0,09	0,41	0,35	0,25	0,21	4,09
		10	2,25	0,28	0,63	0,25	0,07	0,49	0,46	0,13	0,02	5,57
		17	1,8	0,28	0,66	0,26	0,08	0,46	0,40	0,01	-0,13	4,31
		18	2,25	0,28	0,76	0,26	0,07	0,49	0,43	-0,14	1,03	5,48
		13	2,25	0,28	0,80	0,27	0,07	0,49	0,43	-0,39	1,47	25,4
		12	2,25	0,28	0,64	0,25	0,07	0,47	0,43	0,06	-0,19	3,67
		14	2,25	0,36	0,83	0,26	0,08	0,43	0,43	-0,29	1,07	4,78
	Подача	2,25	0,28	0,98	0,27	0,08	0,48	0,41	-0,23	0,98	14,4	
	Выход из модели	1,42	0,23	0,42	0,19	0,06	0,48	0,48	0,16	0,15	3,58	

взаимодействия  $v/v_0$ , происходит общее смещение ЭПР по шкале размерности в сторону больших значений.

По мере увеличения  $v/v_0$  меры рассеяния (стандарт и коэффициент вариации), в отличие от описанного случая, закономерно уменьшаются как по данным косвенного счета, так и по массе (табл. 5.1 и 5.2). Схемы распределения параметров мер рассеяния (стандарта и коэффициента вариации) дают четкую картину отсортированности песков модели, согласующуюся с распределением  $v/v_0$ , и доказывают их прямую зависимость от интенсивности динамического взаимодействия, измеряемой критерием  $v/v_0$ .

Коэффициент асимметрии по косвенному счету оказался очень чувствительным к изменениям гидродинамического режима на модели, но малоинформативным по массе. По мере увеличения  $v/v_0$  по косвенному счету происходит приближение коэффициента асимметрии ЭПР исходных песков к нулевым значениям. Из сравнения коэффициентов асимметрии проб подачи и выхода с модели по косвенному счету также вытекает, что в условиях обильного привноса обломочного материала и при достаточной активности гидродинамических сил  $1 < v/v_0 \leq 2,3$  происходит формирование песков с симметричным распределением гранулометрического состава.

Сравнение данных таблиц показывает, что значения эксцесса независимы от  $v/v_0$  как по косвенному счету, так и по массе. По косвенному счету ЭПР преобразованных песков является более крутовершинным, по сравнению с ЭПР исходных, что указывает на превалирующую роль динамической переработки песка над количеством частиц его привноса. По массе это положение не подтверждается.

Из табл. 5.1 видно, что по косвенному счету состав всех проб модели, как исходный, так и преобразованный, подчиняется логнормальному закону распределения, поскольку все значения  $\chi^2 < 7,5$ . Однако у преобразованных песков на модели эти значения меньше, чем у исходных. С ростом  $v/v_0$  в целом логнормальный закон выдерживается еще строже. Точно также выходящий из модели состав песка приобрел еще большую «логнормальность» по сравнению с исходным  $0,9 < 2,1$ . Все данные по косвенному счету указывают на то, что в условиях обильного привноса обломочного материала, при интенсивном транспорте наносов  $1 < v/v_0 < 2,3$  на модели происходит формирование гранулометрического состава, подчиняющегося логнормальному распределению.

По массе теоретическому, логнормальному распределению подчиняется 70 % исходных и 60 % преобразованных ЭПР. Таким образом, по массе процент «логнормальности» ЭПР к концу эксперимента снижается.

Все ЭПР исходных и преобразованных песков по косвенному счету подчиняются одномодальным и гомогенным распределениям, поэтому «зрелость» их гранулометрического состава можно определить по сочетанию трех параметров: коэффициенту асимметрии, эксцессу и значению  $\chi^2$ , выявляемому при сравнении ЭПР с соответствующей логнормальной кривой.

Выделяется несколько групп «зрелости».

К первой группе относятся предельно однородные пески, которые были сформированы в точках 3, 4, 5. Для них характерна: высокая симметричность

ЭПР ( $C_s=0,03\div 0,08$ ), несколько повышенное значение эксцесса ( $\epsilon=0,52\div 0,75$ ) и критерия ( $\chi^2=2,3\div 3,8$ ). Ко второй группе, меньшей гранулометрической зрелости, можно отнести пески, крупность которых имеет максимальное приближение к логнормальному закону распределения. Для них характерны наибольшие значения асимметрии ЭПР ( $C_s=0,12\div 0,05$ ), эксцесса ( $\epsilon=0,13\div 0,38$ ) и минимальные значения критерия ( $\chi^2=1,35\div 0,6$ ). Такие составы песка были сформированы в точках 1, 2, 15, 17, 18.

К третьей группе зрелости относятся пески, сформированные в точках 7, 8, 9, 10, 11, соответствующих аккумуляции наносов. Поэтому распределение их крупности обладает отрицательной асимметрией, т. е. характеризуется преобладанием мелких частиц в пробе, имеет повышенное значение эксцесса ( $\epsilon=0,12\div 0,58$ ) и критерия ( $\chi^2=2,5\div 3,0$ ).

К четвертой и пятой группам наименьшей гранулометрической зрелости относятся пески, сформированные в точках 6 и 16 в зонах отрыва потока от берега (точка 6) и удара струй о берег (точка 16) (рис. 5.3), т. е. в зонах вторичных течений.

Гранулометрическая «зрелость» проб песка, определенная по этой же схеме по массе, в целом согласуется с описанной картиной, полученной по косвенному счету. И в том и в другом случае в качестве достаточно ярко выраженной и важной закономерности выявляется зависимость гранулометрической «зрелости» песков от критерия подвижности донных наносов. Так, выделенные выше первая и вторая группы гранулометрической «зрелости» песков модели приурочены к зонам модели со средними значениями  $1,6 < v/v_0 \leq 2,3$ . Остальные группы тяготеют к зонам со значениями  $0 < v/v_0 \leq 1,1$ .

### 5.2.2. Модель р. Волги

Деформируемая модель участка русла нижнего бьефа р. Волги была выполнена в горизонтальном масштабе 1:400 и вертикальном 1:100. Длина модели составляла 32 м, ширина — 3,0–7,0 м. В качестве исходного подвижного материала на модели использовался саблинский песок, взятый из русла р. Госны.

В нижних бьефах ГЭС, как известно, имеют место необратимые, некомпенсированные размывы русла, являющиеся результатом прекращения поступления донных наносов с верхнего участка реки. С началом эксплуатации ГЭС в русле происходят коренные изменения. Участок нижнего бьефа, работавший ранее как транзитный участок реки с обратимыми деформациями, на котором происходило лишь переотложение донных наносов, превращается в участок необратимой эрозии, т. е. в область питания наносами нижележащего участка реки с сохраняющимися обратимыми деформациями. На модели было воссоздано русло с рельефом дна 1972 г., когда за 15-летний период эксплуатации ГЭС исследуемый участок достиг определенной степени стабилизации. В общем морфологическом облике участка выделяются три основных крупных фрагмента: 1) приплотинная яма размыва за зданием ГЭС и водосливной плотиной, соответственно в правом и левом рукавах русла, 2) крупная русловая форма — побочень вдоль левого берега, 3) правобережная плесовая ложина.

**Таблица 5.3. Гидравлические характеристики потока  
и критерий подвижности на модели Волги**

№ пробы	Глубина потока $H$ , см	Средняя скорость течения $v$ , см/с	Критическая скорость сдвига $v_0$ , см/с	Критерий подвижности, $v/v_0$
1	18,2	—	28,2	—
1'	20,1	31,7	28,5	1,1
1''	24,0	33,9	29,0	1,2
2	14,9	—	27,0	—
2'	17,2	30,1	28,2	1,1
2''	22,0	31,7	28,8	1,1
3	11,9	—	26,0	—
3'	13,0	28,9	26,5	1,1
3''	21,3	30,8	28,6	1,1
4	17,2	—	28,2	—
4'	17,2	38,0	28,2	1,3
4''	21,8	37,9	28,6	1,3
5	10,4	—	26,0	—
5'	6,3	34,9	22,5	1,5
5''	17,7	34,7	28,2	1,2
6	11,2	—	26,0	-
6'	10,4	27,5	26,0	1,0
6''	6,7	21,3	22,5	0,9
7	6,2	—	22,5	—
7'	11,4	40,8	26,6	1,6
7''	16,1	35,9	27,8	1,3
8	19,2	—	28,4	-
8'	15,6	38,7	27,5	1,4
8''	17,2	36,7	28,0	1,3
9	14,4	—	27,0	—
9'	16,0	42,9	27,8	1,5
9''	18,2	32,6	28,2	1,1
10	—	—	—	—
10'	—	44,6	—	—
10''	—	37,0	—	—
11	9,0	—	25,5	—
11'	12,2	35,1	26,3	1,3
11''	13,4	35,1	26,5	1,3

Отбор проб отложений производился одновременно в 11 точках модели так, чтобы были охвачены все указанные выше морфологические фрагменты русла (рис. 5.5). Первая серия отбора проб была выполнена до начала опытов, вторая и третья соответственно через 15 ч 30 мин. и 81 ч 30 мин. от начала эксперимента.

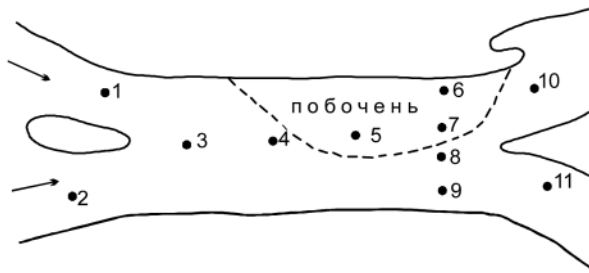


Рис. 5.5. Схема отбора проб грунта на модели р. Волги

Отсутствие в природе поступления в русло наносов с верхнего участка освобождает от необходимости подачи наносов на модель.

В опытах для фиксации рельефа дна использовался лабораторный ультразвуковой профилограф, позволяющий получать информацию о деформациях дна и геометрических и динамических параметрах микроформ.

Движение донных наносов на модели происходило в виде трехмерных микроформ — гряд длиной 8–27 см, высотой 1,1–3,9 см со средней скоростью перемещения 0,004 см/с. Исходя из этих средних характеристик движения гряд, частицы песка, перемещаемые в теле гряд, проходят участок, равный длине всей модели, за 250 ч. В процессе опытов дно модели существенно деформировалось, что приводило к изменению глубин в точках проб отложений. Вместе с глубиной изменялась скорость потока и подвижность песка  $v/v_0$ . Изменения этих величин в различных точках модели происходили по-разному, что видно из данных табл. 5.3. Штрих при соответствующем номере пробы в таблице означает первую серию повторного взятия проб через 15 ч 30 мин. от начала эксперимента, два штриха — соответственно через 81 ч 30 мин. от начала эксперимента.

Результаты статистической обработки данных исходных и преобразованных проб на модели р. Волги представлены в табл. 5.4 по счету и в табл. 5.5 по массе.

Основная особенность модели Волги (отсутствие привноса наносов в начальном створе) определяет направленность процесса гидродинамической пересортировки песка. Это находит отражение в табл. 5.4 и 5.5.

Из данных табл. 5.4 видно, что повсеместно на модели наблюдается постепенное убывание параметра  $N_T$  (количество зерен в 100 г песка, уменьшенное в 1000 раз). За счет выноса с модели мелких частиц к концу эксперимента все пробы становятся более крупнозернистыми. При этом в условиях относительно узкого диапазона вариации  $v/v_0$  изменение параметра  $N_T$  оказывается в большей зависимости от времени гидродинамической пересортировки песка, чем от  $v/v_0$ . С продолжительностью гидродинамической пересортировки согласуется и увеличение параметров  $C_{max}$  и  $C_{min}$ .

Таблица 5.4. Результаты статистической обработки по косвенному счету данных дробного рассева исходных и преобразованных проб на модели Волги

№ пробы	$v/v_0$	Количество частиц в 100 г пробы, умноженное на $10^{-3}$	$M_0$ , мм	$C_{max}$ , мм	$C_{min}$ , мм	$\bar{x}$ , мм	Стандарт, $\sigma$	Коэффициент вариации, $C_V$	Коэффициент асимметрии, $C_S$	Экцесс, $\epsilon$	$\chi^2$
1	—	9490	0,14	0,03	0,39	0,12	0,64	1,22	0,27	−0,37	8,46
1	1,1	5250	0,18	0,06	0,44	0,19	0,38	0,49	−0,05	0,73	2,82
1	1,2	5310	0,18	0,06	0,44	0,19	0,36	0,44	−0,04	1,03	4,50
2	—	8510	0,14	0,03	0,40	0,13	0,58	1,01	0,26	−0,32	4,74
2	1,1	6620	0,18	0,03	0,39	0,13	0,53	0,93	−0,09	−0,19	2,05
2	1,1	3050	0,23	0,04	0,45	0,22	0,47	0,49	−0,11	0,97	3,82
3	—	8110	0,14	0,03	0,41	0,13	0,59	1,00	0,34	−0,29	7,26
3	1,1	6380	0,18	0,07	0,42	0,18	0,36	0,46	−0,26	0,65	2,40
3	1,1	4850	0,18	0,05	0,45	0,19	0,43	0,54	−0,30	0,95	4,50
4	—	7880	0,14	0,03	0,41	0,14	0,57	0,95	0,37	−0,22	8,18
4	1,3	6200	0,18	0,05	0,43	0,17	0,42	0,56	0,21	0,77	3,49
4	1,3	5600	0,18	0,06	0,44	0,18	0,40	0,50	−0,05	0,45	2,26
5	—	7440	0,14	0,03	0,41	0,14	0,57	0,91	0,42	−0,09	8,66
5	1,5	5670	0,18	0,05	0,44	0,18	0,44	0,57	0,31	0,81	4,43
5	1,2	—	Проба не отбиралась								
6	—	8670	0,14	0,03	0,41	0,14	0,56	0,92	0,34	−0,15	6,20
6	1,0	—	Проба не отбиралась								
6	0,9	4890	0,18	0,05	0,46	0,18	0,46	0,58	0,34	0,74	5,70
7	—	7800	0,14	0,04	0,41	0,15	0,51	0,81	0,23	−0,05	2,58
7	1,6	6910	0,18	0,05	0,41	0,17	0,42	0,57	0,25	0,85	4,40
7	1,3	6630	0,18	0,06	0,42	0,17	0,40	0,53	−0,04	0,91	2,70
8	—	7820	0,14	0,03	0,41	0,14	0,57	0,93	0,36	−0,11	6,04
8	1,4	6780	0,18	0,04	0,43	0,15	0,55	0,85	0,34	−0,11	6,12
8	1,3	2630	0,23	0,08	0,56	0,24	0,38	0,36	−0,06	0,93	3,56
9	—	8350	0,14	0,03	0,40	0,14	0,57	0,97	0,34	−0,31	7,95
9	1,5	5290	0,18	0,05	0,44	0,18	0,41	0,52	0,34	1,22	7,96
9	1,1	4380	0,18	0,05	0,47	0,19	0,48	0,59	0,60	1,30	10,02
10	—	7590	0,18	0,03	0,41	0,14	0,59	0,97	0,49	−0,01	9,70
10	—	—	Проба не отбиралась								
10	—	4760	0,18	0,06	0,45	0,19	0,39	0,46	0,04	0,77	3,64
11	—	8450	0,14	0,03	0,41	0,14	0,58	0,97	0,31	−0,22	5,38
11	1,3	7860	0,18	0,05	0,39	0,15	0,42	0,63	−0,04	0,26	1,53
11	1,3	4230	0,18	0,07	0,47	0,21	0,36	0,40	−0,04	1,27	5,60

В конце опыта, по данным табл. 5.4, на модели происходит уменьшение величины стандарта в 1,25–1,5 раза, что указывает на повышение уровня отсортированности проб песка в ходе эксперимента.

Коэффициент вариации также уменьшается в процессе опытов, как по косвенному счету, так и по весу (табл. 5.4 и 5.5). Улучшение отсортированности песка на модели, выражаемое уменьшением меры рассеяния, объясняется удалением тонкозернистых фракций песка из модели. В этих условиях, судя по косвенному счету, происходит уменьшение положительной асимметрии (с аномалией в точке 9). По массе за первый период пересортировки песка в распределении его гранулометрического состава в большинстве проб появляется положительная асимметрия, а к концу эксперимента во всех пробах наблюдается отрицательная асимметрия.

Как следует из данных табл. 5.4, в процессе гидродинамической пересортировки исходного песка отрицательные значения эксцесса по счету повсеместно переходят в положительные и возрастают в течение всего эксперимента. Таким образом, в условиях дефицита привноса материала с удалением тонкозернистых фракций и повышением отсортированности на модели отмечается неуклонный рост положительного эксцесса по счету. Данные по массе (табл. 5.5) не подтверждают соответствия между значениями эксцесса и гидродинамической пересортировки песка в условиях отсутствия привноса дополнительного материала на модель.

Результаты аппроксимации ЭПР различных проб песка на модели логнормальным законом распределения показывают, что по косвенному счету 63 % проб являются логнормальными ( $\chi^2 < 5,81$ ) и 37 % довольно хорошо приближаются к теоретическому распределению ( $5,81 < \chi^2 < 10,1$ ). В середине опыта достигается максимальное приближение ЭПР к логнормальному распределению. К концу эксперимента во многих точках модели снова происходит отклонение ЭПР от логнормального распределения. Но если при этом в точках 1, 2, 7, 11 повторное отклонение от логнормального закона связано с ростом положительного эксцесса при полной сохранности симметричности ЭПР, то в точках 3, 9 отклонение от теоретического распределения, вызванное увеличением эксцесса, происходит при изменениях коэффициента асимметрии.

Таким образом, отложения, сформированные к концу эксперимента в точках 1, 2, 7, 11, являются более зрелыми в гранулометрическом отношении по сравнению с точками 3, 6, 9, в которых не имеется симметричности ЭПР.

По массе (табл. 5.5) гранулометрический состав исходных проб плохо подчиняется логнормальному закону. В середине эксперимента в большинстве точек модели сформировались отложения с логнормальным гранулометрическим составом, за исключением проб 2, 8, 9. К концу эксперимента отклонения гранулометрического состава от этого закона вызваны увеличением положительного значения эксцесса.

Сравнивая результаты исследований процесса гидродинамической пересортировки проб песка на моделях Иртыша и Волги, можно обнаружить их главное сходство, несмотря на принципиальное различие в функционировании этих моделей в условиях подачи наносов и отсутствия подачи. Оно заключается в одинаковой направленности процесса гидродинамической пересортировки,



**Таблица 5.5. Результаты статистической обработки по массе данных дробного отсева исходных и преобразованных проб на модели Волги**

№ пробы	$v/v_0$	Наиболее крупная фракция, мм	$M_0$ , мм	$C_{max}$ , мм	$C_{min}$ , мм	$\bar{x}$ , мм	Стандарт, $\sigma$	Коэффициент вариации, $C_v$	Коэффициент асимметрии, $C_s$	Экссес, $\varepsilon$	$\chi^2$
1	—	2,25	0,28	0,07	0,6	0,23	0,37	0,38	-0,25	5,27	14,1
1	1,1	1,12	0,23	0,11	0,37	0,24	0,27	0,26	0,02	0,77	3,88
1	1,2	1,42	0,23	0,11	0,41	0,24	0,26	0,26	-0,33	1,56	3,81
2	—	2,25	0,28	0,08	0,46	0,23	0,34	0,34	0,36	2,61	11,29
2	1,1	1,8	0,18	0,07	0,51	0,22	0,37	0,30	0,06	1,63	9,28
2	1,1	2,25	0,18	0,14	0,48	0,24	0,40	0,31	-0,20	1,55	10,50
3	—	2,25	0,23	0,08	0,54	0,23	0,35	0,34	0,03	3,48	15,00
3	1,1	1,42	0,23	0,10	0,36	0,22	0,27	0,27	-0,15	1,23	2,22
3	1,1	2,25	0,23	0,11	0,45	0,25	0,29	0,27	-0,10	1,58	5,97
4	—	2,25	0,23	0,08	0,54	0,23	0,34	0,34	-0,28	5,28	12,22
4	1,3	0,9	0,23	0,09	0,36	0,23	0,28	0,28	0,29	0,55	5,11
4	1,3	1,12	0,23	0,10	0,44	0,24	0,29	0,28	-0,09	0,90	4,82
5	—	2,25	0,23	0,08	0,66	0,23	0,35	0,34	-0,48	5,09	15,48
5	1,5	2,25	0,23	0,10	0,44	0,24	0,30	0,29	-0,28	3,06	4,51
5	1,2	—	Проба не отбиралась								
6	—	2,25	0,23	0,08	0,50	0,23	0,34	0,39	-0,11	4,52	12,11
6	1,0	—	Проба не отбиралась								
6	0,9	2,25	0,23	0,10	0,98	0,26	0,37	0,33	-0,23	4,86	15,87
7	—	1,8	0,23	0,08	0,42	0,23	0,32	0,32	0,35	2,09	12,39
7	1,6	0,9	0,23	0,09	0,35	0,22	0,27	0,28	0,10	1,25	4,76
7	1,3	0,9	0,23	0,09	0,36	0,22	0,18	0,29	0,06	0,81	4,70
8	—	1,8	0,28	0,08	0,44	0,23	0,33	0,33	0,35	2,67	9,69
8	1,4	1,8	0,23	0,08	0,50	0,24	0,33	0,32	0,13	2,43	12,82
8	1,3	1,42	0,28	0,14	0,53	0,30	0,27	0,21	-0,22	1,12	10,62
9	—	2,25	0,23	0,08	0,41	0,22	0,32	0,33	0,45	3,10	9,91
9	1,5	1,8	0,23	0,11	0,53	0,24	0,30	0,28	-0,56	2,44	6,43
9	1,1	1,8	0,28	0,11	0,55	0,26	0,30	0,26	-0,37	3,45	5,36
10	—	1,8	0,23	0,08	0,43	0,23	0,32	0,32	0,31	2,96	8,04
10	—	—	Проба не отбиралась								
10	—	2,25	0,23	0,11	0,49	0,25	0,29	0,27	-0,62	3,64	5,45
11	—	1,42	0,28	0,08	0,50	0,23	0,34	0,34	0,28	2,28	12,38
11	1,3	1,42	0,18	0,08	0,37	0,21	0,31	0,34	0,05	0,88	4,19
11	1,3	1,8	0,23	0,12	0,48	0,25	0,27	0,24	-0,54	2,30	8,09

закрывающейся в дальнейшем «созревании» гранулометрического состава исходных проб по косвенному счету частиц. Хотя все исходные пробы с моделей Иртыша и Волги на рис. 5.1 занимают на диаграмме VII зону зрелых в гранулометрическом отношении осадков, дальнейшее изменение гранулометрического состава, как видно на этом рисунке, происходит в направлении увеличения эксцесса в пределах «логнормальности» — сохранения симметрии ЭПР и роста критерия  $v/v_0$ , что отражает процесс дальнейшего гранулометрического созревания исходных проб в процессе опытов.

Основным выводом настоящего исследования следует считать принципиальную возможность количественного анализа закономерностей движения наносов на структурном уровне частиц, что чрезвычайно важно для усовершенствования методов расчета таких важных характеристик транспорта наносов, как начало и сплошность движения, скорость перемещения частиц и расход донных наносов.

Глава 6

**ЛАБОРАТОРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ  
СОПРОТИВЛЕНИЙ И ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ РУСЕЛ  
С РАЗЛИЧНЫМ ТИПОМ РУСЛОВОГО ПРОЦЕССА И ФОРМАМИ  
ТРАНСПОРТА ДОННЫХ НАНОСОВ**

Одна из самых давних, традиционных проблем речной гидравлики — исследование гидравлических сопротивлений естественных русел и каналов — остается по-прежнему актуальной в связи с необходимостью усовершенствования методов расчета пропускной способности русел, методики гидравлического моделирования, приемов экстраполяции кривых расходов воды, инженерного обоснования реконструкции речных русел, методов проектирования каналов и решения многих других практических задач на реках.

Анализ старых и современных методов оценки гидравлического сопротивления русел естественных рек обнаруживает наличие большого количества и разнообразия предложений, рекомендаций и расчетных зависимостей. В настоящее время достигнут определенный прогресс как в понимании природы гидравлических сопротивлений естественных русел, так и в установлении причинно-следственных связей этого явления, в разработке количественных методов и приемов их выражения. Однако дальнейший прогресс на пути создания надежных методов количественной оценки гидравлических сопротивлений, пригодных для использования в конкретных практических задачах, число которых неуклонно растет и решение которых предполагает все более высокую точность, требует расширения круга поиска, привлечения новых идейно-методических подходов и приемов, а также новой эмпирической базы. Поскольку, по общему признанию, теоретическое определение сопротивлений движению руслового потока в настоящее время не представляется возможным, эмпирико-аналитический путь исследований все еще остается доминирующим в этой области.

Предложено большое количество эмпирических зависимостей для определения коэффициента Шези  $C$ , коэффициента шероховатости  $n$  и коэффициента Дарси-Вейсбаха  $\lambda$ , являющихся показателем гидравлических сопротивлений естественных русел и каналов. Эти зависимости могут быть разбиты на группы, различающиеся между собой не только внешним видом, но, в первую очередь, их содержанием и физическим смыслом, вкладываемым авторами в само понятие гидравлических сопротивлений.

Традиционные формулы для оценки показателей гидравлических сопротивлений относятся к случаю обтекания потоком жестких, недеформируемых границ с неподвижной зернистой шероховатостью дна. Они содержат коэффициент шероховатости  $n$  как аргумент, имеющий постоянное значение и назначаемый на основе качественного, интегрального описания условий обтекания потоком поверхности русла [4, 11, 68, 72, 88].

Начиная с работы Эйнштейна и Барбароссы [143, 334], к оценке гидравлических сопротивлений стали подходить с учетом размеров и форм гряд, показателей подвижности наносов или с одновременным учетом того и другого.

Анализ состояния проблемы гидравлических сопротивлений естественных потоков приводит к выводу о необходимости разработки при ее решении вопросов учета типов руслового процесса, отдельного, группового и суммарного вклада в гидравлические сопротивления речных и русловых форм, интенсивности транспорта наносов, а также структуры и механизма турбулентности.

### **6.1. Пропускная способность и гидравлические сопротивления русел меандрирующих рек**

Вопросы, касающиеся роли излучин, перекаатов и плесов в формировании речных русел, их транспортирующей и пропускной способности, а также индивидуального, группового и суммарного вклада речных и русловых форм в гидравлические сопротивления, широко обсуждаются в литературе с конца прошлого столетия, не получая при этом достаточного фактического обоснования и развития.

Лабораторные исследования, выполненные в Русловой лаборатории ГЭБ ГГИ на трех схематических моделях меандрирующего участка русла Нижнего Иртыша, вносят в эти вопросы некоторую определенность [143].

На рис 6.1 представлен общий вид одной из моделей. Плановый масштаб ее 1:800. Участок длиной 112 км (в натуре) включал 14 излучин.



Рис. 6.1. Общий вид схематической модели меандрирующего русла р. Иртыш

На этой модели, при уклоне дна  $I=0,001$ , с целью определения влияния перекатов и плесов на пропускную способность русла и его гидравлические сопротивления, были выполнены следующие опыты. В русло, в которое был уложен песок средней крупности 0,33 мм, сначала последовательно подавался ряд расходов воды, не вызывающих подвижки наносов. При этом фиксировалось установившееся положение водной поверхности. Затем при руслоформирующем расходе воды  $Q=47$  л/с положение водной поверхности фиксировалось дважды: в начале опыта, когда только началось движение песка и образование микроформ, и после 36 часов работы модели, при полностью сформировавшихся перекатах и плесах. В последующих опытах малые (неруслоформирующие) расходы воды были повторно пропущены в русле с перекатами и плесами, сформированными при руслоформирующем расходе воды  $Q=47$  л/с.

На рис. 6.2 нанесены продольные профили дна и водной поверхности при руслоформирующем расходе воды  $Q=47$  л/с до и после формирования перекатов и плесов и продольные профили водной поверхности при малом, неруслоформирующем расходе воды  $Q=6,6$  л/с при наличии и отсутствии перекатов и плесов.

Анализируя результаты описанных экспериментов, можно сделать заключение, что, поскольку при руслоформирующем расходе воды кривые водной поверхности при отсутствии и наличии плесов и перекатов совпадают, плесы и перекаты не вносят какого-либо дополнительного вклада в гидравлические сопротивления и не влияют на пропускную способность русла. Они, по-видимому, создаются рекой исключительно в качестве механизма транспорта донных наносов.

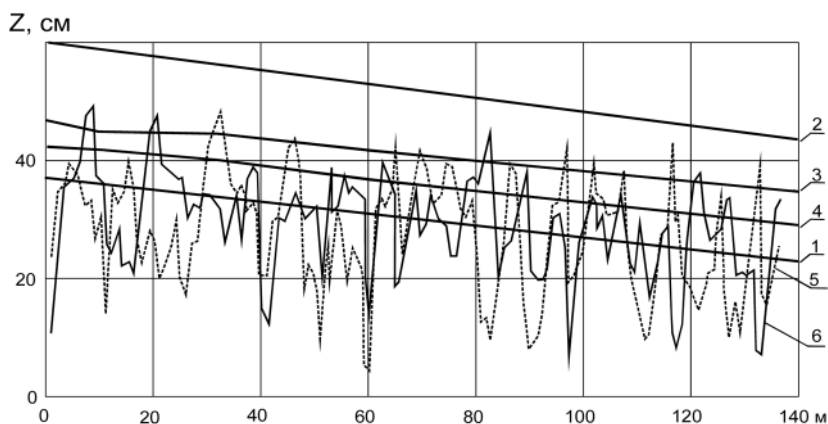


Рис. 6.2. Продольные профили дна и водной поверхности на схематической модели меандрирующего русла. Условные обозначения: 1 — исходный профиль плоского дна; 2 — профиль водной поверхности при наличии и отсутствии плесов и перекатов при руслоформирующем расходе воды; 3 — профиль водной поверхности при наличии плесов и перекатов ( $Q=6,6$  л/с); 4 — профиль водной поверхности при отсутствии плесов и перекатов ( $Q=6,6$  л/с); 5, 6 — продольный профиль дна при руслоформирующем расходе соответственно вдоль правого и левого берега при наличии перекатов и плесов

Результаты данного опыта можно трактовать как экспериментальное подтверждение Великановского принципа минимума диссипации энергии в русловом потоке [43].

Однако для расходов воды, меньших руслоформирующего, плесы и перебаты являются формами сопротивления и уменьшают пропускную способность русла, что следует из сравнения кривых свободной водной поверхности при отсутствии и наличии плесов и перекатов (кривые 3 и 4), являющихся для данного расхода воды  $Q=6,6$  л/с остаточными (реликтовыми) формами, созданными предшествующим руслоформирующим расходом воды.

Отмеченное свидетельствует о существовании двух различных законов гидравлического сопротивления в русловом потоке, соответствующих двум режимам взаимодействия русла и потока: режиму руслоформирования, когда паводочный поток формирует русло динамического равновесия (по Великанову — «поток управляет руслом») и режиму обтекания меженным потоком реликтового русла, сформированного предшествующим «руслоформирующим расходом воды» (по Великанову — «русло управляет потоком» [43, 152]).

Для оценки влияния плановых очертаний русла (макроформ — излучин) на его пропускную способность были выполнены эксперименты на другой модели меандрирующего участка Нижнего Иртыша, протяженностью 190 км, охватывающего 23 излучины, с фактическими плановыми очертаниями русла и на выпрямленной, «разогнутой» модели того же участка. Горизонтальный масштаб обеих моделей равен 1:2000.

Выпрямление русла — абстрактная, искусственная, возможная лишь в лабораторном эксперименте процедура. Оно не может быть реализовано в естественных условиях, и его не следует отождествлять со спрямлением речных излучин. На обеих моделях эксперименты проведены по аналогичным программам. Совокупность экспериментов включала 4 серии, соответствующие четырем вертикальным масштабам моделей: 1:250; 1:175; 1:125; 1:100. В каждой серии исследовался пропуск не менее четырех расходов воды. Анализ полученных результатов показывает, что при идентичных условиях излучины снижают пропускную способность русла (выраженную в расходах воды, соответствующих одной и той же глубине потока) на 10–15 %.

Была выполнена также специальная серия экспериментов с целью решения вопроса о влиянии последовательности излучин и переменной ширины русла на участке большого протяжения на пропускную способность русла. Для решения этого вопроса «в чистом виде» плоскому дну обеих моделей был придан нулевой уклон. Проведение экспериментов заключалось в пропуске ряда расходов в прямом и обратном направлениях на каждой модели, что потребовало соответствующего оборудования. Сравнение свободных водных поверхностей, отвечающих одному и тому же расходу воды, вполне позволяет решить поставленный вопрос. Как свидетельствуют результаты этой серии экспериментов, влияние последовательности плановых форм русла на его пропускную способность не обнаруживается ни на модели меандрирующего, ни на модели выпрямленного русла.

## 6.2. Влияние мезоформ и других структурных форм транспорта донных наносов на гидравлические сопротивления и пропускную способность русла

К средним русловым формам, или мезоформам (побочни, осередки и т. п.), относятся крупные грядообразные скопления наносов, длина которых соизмерима с шириной русла. Мезоформы определяют основное морфологическое строение русла и связаны с общим строением скоростного поля потока, с его вторичными течениями. Большие размеры мезоформ обуславливают их большую инерционность, сезонные колебания расхода воды вызывают лишь частичное их изменение. В сезонных деформациях и перемещениях средних форм выражается сложная организационная структура транспорта донных наносов.

С целью исследования влияния мезоформ и различных состояний подвижного дна на пропускную способность и гидравлические сопротивления русла при побочневом типе руслового процесса была выполнена серия экспериментов в гидравлическом бетонном лотке длиной 82 м. Побочни формировались в течение 300 часов из песка средней крупности  $d=0,48$  мм при расходе воды  $Q=42$  л/с, глубине потока  $H=10$  см, уклоне  $I=0,00075$ , числе Фруда  $Fr = \frac{v}{\sqrt{gH}} = 0,21$  и объемном расходе донных наносов  $Q_m=0,75$  л/ч. В состоянии

динамического равновесия средняя длина и высота побочней соответственно составляли 14,0 м и 0,085 м, высота гряд над поверхностью побочней — 0,01 м, скорость перемещения побочней — 0,37 м/сут. Опыты выполнялись при четырех расходах воды:  $Q=40$  л/с,  $Q=30$  л/с,  $Q=20$  л/с,  $Q=10$  л/с и различных состояниях дна: гладком безгрядовом, с микроформами, с побочнями и микроформами на их поверхности и с побочнями с искусственно стертými микроформами.

При каждом состоянии дна и каждом из 4-х расходов воды устанавливался равномерный (квазиравномерный) режим течения и выполнялись соответствующие измерения.

На рис. 6.3 представлены кривые  $Z_0=f(Q)$  в начальном створе лотка (4 м от начала) для различных состояний дна. Следует отметить, что по техническим причинам кривая 1 не соответствует состоянию абсолютно гладкого (лишенного гряд) русла. Также кривая 2 может не соответствовать до конца развитым микроформам. В первом случае технически трудно выполнить измерения в короткий момент времени, разделяющий гладкое русло от начала зарождения гряд, а во втором — уловить момент полностью развитых микроформ при еще

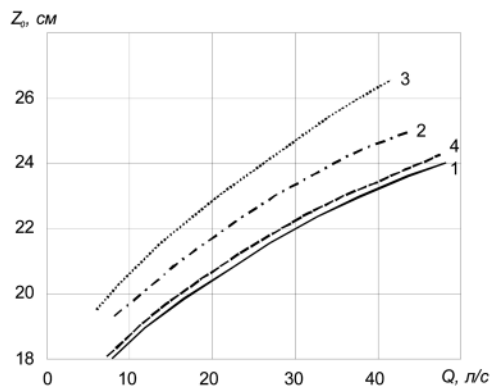


Рис. 6.3. Кривая  $Z_0=f(Q)$  по данным экспериментов на 82-метровом лотке при различных состояниях дна: 1 — гладкое (безгрядовое дно); 2 — микроформы; 3 — побочни с микроформами; 4 — побочни без микроформ

не зародившихся побочнях. Аналогично, при искусственно стертых микроформах на поверхности побочней (кривая 4 — рис. 6.3) могли остаться не улавливаемые на глаз незначительные неровности поверхности дна.

Результаты опытов и характеристик пропускной способности русла с побочнями по данным экспериментов при различном состоянии дна даны в табл. 6.1.

**Таблица 6.1. Характеристики пропускной способности русла при различных состояниях дна по данным экспериментов в 82-метровом гидравлическом лотке**

№ п/п	Состояние дна	$Z_0=19,25$ см		$Z_0=22,30$ см		$Q=10$ л/с				$Q=40$ л/с			
		$Q_i$ , л/с	$Q_i/Q_3$	$Q_i$ , л/с	$Q_i/Q_3$	$H_p$ , см	$H_i/H_3$	$\lambda_i$	$\lambda_i/\lambda_3$	$H_p$ , см	$H_i/H_3$	$\lambda_i$	$\lambda_i/\lambda_3$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1	Гладкое	20,50	2,69	45,0	1,76	2,85	0,58	0,010	0,13	13,05	0,86	0,011	0,34
2	С микроформами	14,50	1,91	36,0	1,41	3,75	0,76	0,028	0,37	13,90	0,89	0,014	0,44
3	С побочнями и микроформами	7,60	1,00	25,5	1,00	4,90	1,00	0,076	1,0	15,60	1,00	0,032	1,0
4	С побочнями без микроформ	19,25	2,53	42,0	1,65	3,0	0,63	0,011	0,14	13,30	0,85	0,010	0,31

В графе 3 даны значения расходов воды при одном и том же, но меньшем наполнении лотка  $Z_0=19,25$  соответственно при гладком дне, при микроформах, при побочнях с микроформами и при наличии побочней, но без микроформ, искусственно стертых на поверхности побочней. В графе 4 даны отношения расходов воды при уровне 19,25 при различных состояниях дна к случаю с микроформами на поверхности побочней. В графах 5 и 6 представлены такие же данные при более высоком наполнении лотка, при уровне воды  $H_i=22,30$ . Из сравнения граф 4 и 6 следует, что при больших наполнениях лотка относительные различия в пропускных способностях русла при различных его состояниях уменьшаются.

В графах 7–14 табл. 6.1 представлены сравнения значений глубин и коэффициента гидравлического сопротивления соответственно при малом ( $Q=10$  л/с) и руслоформирующем ( $Q=40$  л/с) расходах воды. Из этих граф табл. 6.1 также следует, что в зависимости от состояния дна, значения глубин и коэффициентов сопротивления, отнесенных к случаю побочней с микроформами, варьируют в широких пределах, но при руслоформирующем расходе воды  $Q=40$  л/с эти различия несколько меньше.

Из анализа строки 4 табл. 6.1, соответствующей состоянию дна с побочнями, на которых искусственно стертые микроформы, видно, сколь значительно увеличивается пропускная способность русла и уменьшаются гидравлические сопротивления, если предположить, что произошло стирание гряд в результате



взвешивания частиц в мелкопесчаном русле в натуральных условиях или в зависимости от того, образуются или нет гряды на поверхности побочной, сложенных из крупных наносов.

Отсюда следует, что, регулируя формы и виды транспорта наносов (взвешивание, сальтация, донное влечение), река может регулировать в широких пределах не только свою транспортирующую, но и пропускную способность.

Эксперименты в 100-метровом гидравлическом лотке с наносами крупностью 0,33 мм, выполненные М.М. Гендельманом, преследовали целью получить, в частности, мезоформы и дать оценку их вклада в суммарное гидравлическое сопротивление в условиях динамически устойчивого состояния русла. Каждый эксперимент требовал большой длительности. Побочни были получены при уклоне дна  $I$ , равном 0,00116, и расходе воды  $Q$ , равном 15 л/с, при  $I=0,00293$  и расходах воды, равных 5,10 и 15 л/с, и при  $I=0,0046$  и расходе воды, равном 5 л/с. Во всех этих экспериментах то состояние водной поверхности, которое сравнительно быстро устанавливалось и соответствовало грядово-зернистой шероховатости, в дальнейшем, по мере развития побочной, не претерпевало изменений. Это дает основание сделать вывод о том, что в условиях, идентичных осуществленным в эксперименте (рис. 6.3), мезоформы типа побочной не являются дополнительным источником гидравлических сопротивлений.

Можно усмотреть противоречие этого вывода приведенным выше результатам экспериментов в 82-метровом лотке. Однако, если принять во внимание оговорку, касающуюся кривой 2 на рис. 6.3, отвечающей, по-видимому, не вполне развитому состоянию микроформ, взаиморасположение остальных кривых 1, 3 и 4 также соответствует выводу о том, что побочни не вносят собственного вклада в суммарные гидравлические сопротивления. Как следует из рис. 6.3, кривая 1, соответствующая плоскому (безгрядовому) состоянию дна, в пределах точности эксперимента практически совпадает с кривой 4, отвечающей состоянию дна с побочнями, на поверхности которых искусственно стерты микроформы.

### **6.3. Микроформы и гидравлические сопротивления**

В гидроморфологической теории руслового процесса под микроформами понимаются мелкие песчаные гряды массового распространения, покрывающие дно естественных потоков и каналов и поэтому воспринимаемые как его шероховатость. Размеры микроформ соизмеримы с местной глубиной потока. Малые размеры микроформ определяют их малую инерционность, т. е. способность относительно быстро, по сравнению с более крупными русловыми формами, перестраиваться, приспособляясь к изменяющимся гидравлическим условиям потока до полного их взаимосоответствия. Значение изучения микроформ определяется тем, что непосредственно в них выражается расход донных наносов и они вносят существенный вклад в потери энергии потока.

Выводы о характере связи сопротивления грядовых форм массового распространения с руслоформирующими факторами можно получить из результатов

обобщения большого эмпирического материала измерений отечественных и зарубежных исследователей на реках, каналах и в лабораторных условиях (гидравлические лотки, размываемые модели речных русел), выполненного в отделе русловых процессов ГГИ с целью получения формул для расчета высоты гряд  $h_g$ , скорости перемещения гряд  $C_g$ , расхода донных наносов  $q_m$  и их концентрации  $\mu = q_T/q$  на единицу ширины потока в объемном выражении как в варианте, не учитывающем критерий подвижности наносов,  $v/v_0$ , так и в варианте, учитывающем этот критерий [143, 386]:

$$c_g = 0,019vFr^3; \quad (6.1)$$

$$q_T = 0,011vh_gFr^3; \quad (6.2)$$

$$\mu = 0,011\frac{h_g}{H}Fr^3; \quad (6.3)$$

$$h_g = 2,1\frac{d}{Fr^{4,1}}\left(\frac{v-v_0}{v_0}\right); \quad (6.4)$$

$$c_g = 0,009v\left(\frac{v}{v_0}\right)^2\left(\frac{h_g}{d}\right)^{-0,8}; \quad (6.5)$$

$$q_T = 0,0054h_gv\left(\frac{v}{v_0}\right)^2\left(\frac{h_g}{d}\right)^{-0,8}; \quad (6.6)$$

$$\mu = 0,0054\frac{h_g}{H}\left(\frac{v}{v_0}\right)^2\left(\frac{h_g}{d}\right)^{-0,8}; \quad (6.7)$$

$$h_g = 0,39d\left(\frac{v}{v_0}\right)^{2,5}Fr^{-3,75}. \quad (6.8)$$

Эти зависимости отвечают состоянию динамического равновесия, т.е. состоянию, когда расход донных наносов соответствует транспортирующей способности потока, а геометрические и динамические характеристики гряд имеют установившийся (квазиустановившийся) характер, выражающийся в том, что высота и длина гряд, а также скорость их перемещения за период наблюдений остаются неизменными. Из зависимостей (6.1–6.8) могут быть установлены выражения для коэффициента Шези и коэффициента гидравлического сопротивления  $\lambda$ .

Приравнявая (6.1) и (6.5) и раскрывая  $Fr = \frac{v}{\sqrt{gH}} = \frac{C\sqrt{I}}{\sqrt{g}}$ , для  $\frac{C}{\sqrt{g}}$  будем иметь:

$$\frac{C}{\sqrt{g}} = 0,78\frac{\left(\frac{v}{v_0}\right)^{0,7}\left(\frac{d}{H}\right)^{0,27}}{I^{1/2}}; \quad (6.9)$$

а учитывая, что  $C = \sqrt{\frac{2g}{\lambda}}$ , получим:

$$\lambda = 3,28 \frac{I}{\left(\frac{v}{v_0}\right)^{1,4} \left(\frac{d}{h_T}\right)^{0,54}}. \quad (6.10)$$

Из (6.3), при аналогичном представлении числа Фруда и при  $\frac{h_T}{H} = 0,15$ , имеем:

$$\frac{C}{\sqrt{g}} = 8,47 \frac{\mu^{1/3}}{I^{1/2}} \quad (6.11)$$

и

$$\lambda = 0,028 \frac{I}{\mu^{2/3}} = 0,028 \frac{Iq^{2/3}}{q_T^{2/3}}. \quad (6.12)$$

Полученные уравнения раскрывают характер взаимосвязи входящих в них величин. С нашей точки зрения, особого внимания заслуживает зависимость (6.12), в правой части которой представлены только основные факторы руслоформирования: характеристика стока воды  $q$  и характеристика стока донных наносов  $q_T$ , а также характеристика ограничивающего фактора — уклон  $I$  при равномерном (квазиравномерном) режиме, который может пониматься как в значении местного, осредненного по длине микроформы уклона, так и уклона на участке большого протяжения.

Из условий, при которых выполнялись измерения (равномерный режим, измерения на отдельных вертикалях в состоянии динамического равновесия), вытекает, что зависимости (6.9–6.12) могут быть использованы для потоков, у которых значения  $C$  и  $\lambda$  на отдельных вертикалях равны значениям  $C$  и  $\lambda$  для всего потока, т. е. для широких русел  $\frac{B}{H} > 15$  при грядовом режиме транспорта наносов в состоянии динамического равновесия, например для земляных («режимных») каналов.

#### **6.4. Связь гидравлических сопротивлений с турбулентной структурой руслового потока**

Границы потока наряду с физическими свойствами жидкости определяют величину его гидравлического сопротивления. Физической сущностью гидравлического сопротивления является механизм турбулентности, генерация и трансформация турбулентной структуры потока. Принципиальное и количественное подтверждение этого положения можно извлечь из результатов серии экспериментов, выполненных в Русловой лаборатории ГГИ в стеклянном гидравлическом лотке прямоугольного сечения, имеющем длину 8 м и ширину 0,208 м [114]. Эксперименты выполнены с целью исследования характеристик турбулентности в простейших случаях взаимодействия потока с плоскими недеформируемыми границами при разной неподвижной зернистой шероховатости дна. Кинематическая структура потока исследовалась в вертикальной

плоскости, проходящей по продольной оси лотка. Плоскость высвечивалась установленным над лотком шелевым фонарем. Поток визуализировался шариками полистирола диаметром 0,25–0,50 мм, имеющими удельный вес, близкий к единице. Регистрация скоростей потока (движущихся в потоке индикаторов) осуществлялась кинокамерой, способной перемещаться вдоль лотка с необходимой постоянной скоростью. Опыты выполнены при расходе воды  $Q=5,85$  л/с. Наклоном лотка в каждом опыте достигалась одна и та же глубина равномерного потока  $H$ . Следовательно, и осредненная по сечению скорость потока во всех опытах получалась одинаковой. Таким образом, для совокупности проведенных экспериментов переменной величиной в выражении для коэффициента гидравлического сопротивления  $\lambda = \frac{2gHI}{v^2}$  оказывался только уклон водной поверхности (уклон дна)  $I$ . Значит, различным шероховатостям поверхности дна отвечали различные коэффициенты гидравлического сопротивления.

**Таблица 6.2. Основные гидравлические характеристики опытов, выполненных в малом гидравлическом лотке**

№ п/п	№ опытов	Состояние дна, крупность частиц $d$ , мм	Уклон дна и водной поверхности, $I$	Относительная гладкость потока, $H/d$	Динамическая скорость $U_* = \sqrt{gHI}$ , см/с	Коэффициент гидравлического сопротивления, $\lambda$	Относительная длина крупномасштабных вихревых структур, $K=L/H$	Число Струхала, $Sh$
1	1	Гладкое	0,0034	—	4,12	0,011	6,7	0,15
2	2	Гравий 1–5	0,0067	16,15	5,83	0,023	6,2	0,16
3	3	Гравий 3–5	0,0079	12,62	6,25	0,025	5,9	0,17
4	5	Гравий 9–11	0,0095	5,20	6,96	0,033	5,0	0,20
5	6	Щебень 9–11	0,0080	5,15	6,35	0,027	4,5	0,22
6	7	Гравий 5–15	0,0075	5,15	6,15	0,025	4,5	0,22
7	8	Гравий 13–15	0,010	3,61	7,04	0,032	4,3	0,23
8	9	Гравий (5–7) 33 % (13–15) 67 %	0,013	—	8,07	0,043	—	—
9	10	Гравий (5–7) 67 % (13–15) 33 %	0,0097	—	6,91	0,031	—	—

Что касается структуры потока, то она может быть охарактеризована на основе материалов и стационарной и скользящей кино съемки.

Материалы стационарной кино съемки позволили получить в различных точках вертикальной продольной плоскости потока ряды актуальных значений продольной  $u_i$  и вертикальной  $v_i$  составляющих скорости течения. В результате статистической обработки этих рядов определены максимальные  $u_{max}$ , средние  $\bar{u}$

и минимальные  $u_{min}$  значения продольной составляющей, средние  $\pm \bar{v}$  и максимальные  $\pm v_{max}$  положительные (направленные вверх) и отрицательные (направленные вниз) значения вертикальной составляющей скорости, отклонения актуальных значений продольной  $u'$  и вертикальной  $v'$  составляющих скорости от осредненных величин (компоненты пульсационной скорости), а также средние квадратичные значения  $\sqrt{(u')^2}$  и  $\sqrt{(v')^2}$  и моменты связи  $|u'v'|$  этих компонент.

На рис. 6.4 в качестве примера представлены эпюры распределения по глубине некоторых характеристик турбулентности (отнесенных к средней продольной скорости потока) в опытах I, 2, 5, 8 (табл. 6.2), иллюстрирующие, сколь значительно отличаются эти характеристики в идентичных точках равномерных потоков, имеющих одинаковые средние скорости и поперечные сечения, но отличающихся уклонами и шероховатостью дна. Уместно заметить, что в масштабе динамической скорости  $u_*$  результаты всех опытов группируются в единые эпюры распределения соответствующих турбулентных характеристик потока. Внутреннее различие исследованных потоков еще более осязаемо проявляется в размерах и формах вихревых структур с горизонтальной осью вращения, обнаруженных скользящей кино съемкой. В табл. 6.2 приведены средние из ряда значений относительных длин  $L/H$  крупномасштабных вихрей с поперечным вертикальным размером, близким к глубине потока  $H$ , а в следующей графе — осредненные числа Струхала  $Sh=b/L$  для рассмотренных структурных элементов, движущихся со средней скоростью потока. Из совместного рассмотрения граф 5, 8, 9 табл. 6.2 и рис. 6.4 следует, что с увеличением шероховатости уменьшается продольный размер крупномасштабных вихревых структур с одновременным увеличением числа Струхала (частоты прохождения этих вихрей)

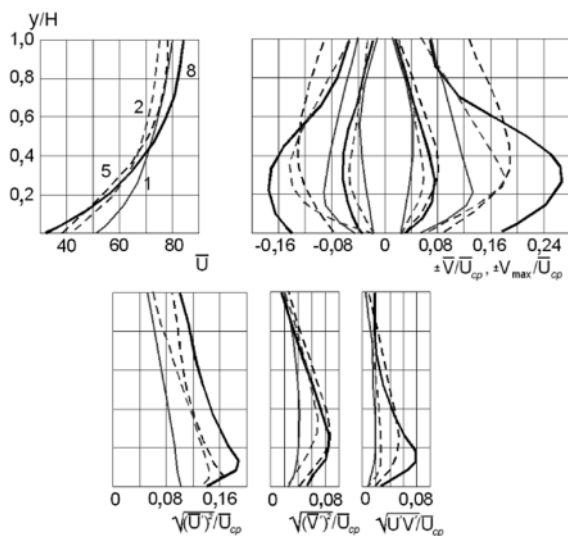


Рис. 6.4. Сопоставление эпюр распределения по глубине характеристик турбулентности (1, 2, 5, 8 – номера опытов по табл. 6.2)

и значений вертикальной составляющей скорости течения. Следовательно, поскольку количество крупномасштабных структур на единицу длины потока и их орбитальные скорости увеличивается с шероховатостью, эти обстоятельства характеризуют соответственно и большие затраты энергии, что, в свою очередь, отражается в численных значениях  $I$  и  $\lambda$  (табл. 6.2).

Таким образом, анализ результатов лабораторного исследования позволил проследить (в рамках этих опытов) не только за качественными превращениями турбулентной структуры, но и выявить количественные связи турбулентных характеристик потока с осредненными характеристиками движения ( $I$ ,  $\lambda$ ) при различных состояниях (шероховатости) ограничивающей поток поверхности. Иначе говоря, полученные результаты выявили количественную взаимосвязь гидравлических сопротивлений как меры потерь энергии с турбулентными характеристиками потока.

## **МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ РЕЧНЫХ ПОТОКОВ И РУСЛОВОГО ПРОЦЕССА НА ГИДРАВЛИЧЕСКИХ МОДЕЛЯХ (КРАТКИЙ ОБЗОР МИРОВОГО И ОТЕЧЕСТВЕННОГО ОПЫТА)**

Лабораторно-экспериментальный метод исследования речных русел стал обсуждаться широким кругом исследователей и инженеров начиная с III Международного судоходного конгресса 1898 г.

Наиболее подробно проблема гидравлического моделирования рассматривалась на XV Международном судоходном конгрессе в 1931 г. [262]. К этому времени уже был накоплен определенный опыт использования речных моделей и практика лабораторного дела и моделирования сложилась в виде, близком к современному. В докладах различных исследователей на этом конгрессе обосновывались правила гидравлического моделирования по Фруду, необходимость соблюдения трех видов подобия: геометрического, кинематического и динамического. Обсуждались вопросы правомерности отступления от этих правил в зависимости от характера решаемых задач и объектов исследований. Было отмечено, что для случая движения жидкости в руслах из размываемого материала, в силу невозможности уменьшения движущихся на модели частиц в масштабе глубины потока, результаты опытов могут носить только качественный характер.

Ш. Рорингер предлагал [431]:

- придавать модели возможно большие размеры;
- обеспечивать на модели турбулентный характер движения;
- для глубин принимать больший, по сравнению с горизонтальным, масштаб;
- обеспечивать подобие модели в плане и т. д.

Все исследователи сходились на том, что на моделях можно получать качественные результаты, помогающие решать практические задачи.

С момента основания Международной ассоциации гидравлических исследований (МАГИ) в 1937 г. проблемы теории и практики гидравлического моделирования, в том числе русловых деформаций и транспорта наносов, обсуждались на большинстве из состоявшихся уже конгрессов этой ассоциации, а с 1980 г. на многих из международных симпозиумов по речной седиментации, регулярно организуемых Международным исследовательским и учебным центром ЮНЕСКО по эрозии и седиментации, IRTCES (Пекин, Китай).

Ознакомление с многолетним опытом и многочисленными отечественными и зарубежными методами гидравлического моделирования на жестких и деформируемых моделях речных русел обнаруживает большое разнообразие взглядов как в принципиальном подходе к этой проблеме и к формулированию условий подобия моделирования, так и по большинству частных вопросов, таких как: допустимость искажения критерия динамического подобия — числа Фруда;

проблема воспроизведения на модели гидравлического сопротивления потока; допустимость искажения геометрических масштабов модели; выбор крупности и плотности опытного материала на размываемых моделях; расчет и интерпретация гидравлического и морфологического масштабов времени; масштабные эффекты; формы транспорта наносов; проблема турбулентности при моделировании и др.

Ниже представлен краткий обзор мирового и отечественного опыта и методов моделирования речных потоков и руслового процесса на жестких и деформируемых моделях речных русел.

### 7.1. Гидравлическое моделирование на жестких моделях

Гидравлические модели речных русел с жесткими неразмываемыми границами (бетонная, наклеенная или неподвижная зернистая шероховатость, а также другие ее разновидности) широко используются для изучения гидравлических характеристик потока (уровни, уклоны и профиль водной поверхности, поле скоростей потока и структура течений) при обосновании рационального проектирования и эксплуатации разнообразных и многочисленных инженерных сооружений и мероприятий, связанных с руслами и поймами рек.

Освещая пространственные гидравлические характеристики потока для фиксированного на данный момент времени морфологического строения исследуемого участка русла и поймы при различных расходах воды, результаты исследования на жесткой модели в комплексе с натурными исследованиями, морфологическими и гидравлическими расчетами позволяют также решать и задачи, связанные с прогнозом руслового процесса и русловых деформаций для различных вариантов проектных решений.

Течение жидкости со свободной водной поверхностью обусловлено силой тяжести. Поэтому для обеспечения динамического подобия природы и жесткой модели необходимо сохранение в натуре и на модели одинаковыми отношения силы инерции к силе тяжести, т. е. числа  $Fr = \frac{v}{\sqrt{gH}} = idem$ .

Для обеспечения подобия течения в натуре и на модели необходимо также добиться подобия гидравлических сопротивлений движению потока. Для моделирования гидравлических сопротивлений в квадратичной зоне необходимо, чтобы течение на модели было также турбулентным и находилось в области шероховатых русел. Для этого достаточно выполнения условий:  $Re = \frac{vH}{\nu} > 400$  и  $Re_{*k} = \frac{v_*k}{\nu} > 70 - 100$ . Здесь  $v_*$  — динамическая скорость потока  $v_* = \sqrt{gHI}$ , а  $k$  — эквивалентная шероховатость русла. Однако часто выполнение этих условий сопряжено с ограничениями назначения величины вертикального геометрического масштаба модели, не обеспечивающего турбулентный режим течения на модели или создающего технические трудности при измерении малых значений глубин и скоростей потока. Поскольку отношение глубины потока к длине участка реки, подлежащего моделированию, составляет обычно величины порядка 0,001 и меньше, для воспроизведения необходимой длины исследуемого участка



реки приходится прибегать к искажению геометрических масштабов модели, назначая вертикальный масштаб крупнее горизонтального. В связи с отмеченным, проблема воспроизведения на модели подобия гидравлических сопротивлений при искаженных геометрических масштабах становится основной методической проблемой при моделировании на жестких моделях речных русел.

Проблема гидравлического моделирования на жестких моделях речных русел к началу 40-х годов XX столетия в мировой практике представлена в следующем виде:

А.П. Зегжда [96] приводит метод Р. Винкеля, основанный на законе  $C=f(Re)$ , и утверждает, что зависимость  $\lambda$  от  $Re$  должна иметь вид  $\lambda=const$ , для постоянных значений относительной зернистой шероховатости дна.

М.Э. Абрамов и П. Фогель [2, 468] в основу моделирования на жестких моделях также полагали уравнение равномерного движения Шези, откуда вытекает равенство  $C$  для модели и природы, но Фогель, в отличие от Абрамова, раскрывал это выражение с помощью формулы Маннинга и считал, что для большинства моделей соблюдается  $\alpha_n=1$ .

А.А. Сабанев [164] и А.И. Лосиевский [168] также полагали  $C_m=C_n$ . Условие  $C_m=C_n$  отвечает, как известно, моделированию по Фрудру и может быть обеспечено при обязательном соблюдении геометрического подобия.

Многие авторы, приняв выражение  $C$  для природы и модели по Маннингу  $C = \frac{1}{n} H^{1/6}$ , выбор вертикального масштаба для моделирования подчиняют условию  $\alpha_H = \alpha_n^6$ .

Б.Ф. Снищенко позднее выполнил расчет жесткой модели по Фрудру для разных значений ее планового масштаба  $\alpha_L$  (1:100, 1:150, 1:200) при одном фиксированном вертикальном масштабе  $\alpha_H=1:50$  [246]. Результаты расчета показали, что при постоянных значениях шероховатости материала модели  $n_m=0,010-0,013$  и природы  $n_n=0,021$  вычисленный коэффициент шероховатости в зависимости от масштаба плановых размеров составляет: 0,016 — при  $\alpha_L=1:100$ ; 0,019 — при  $\alpha_L=1:150$  и 0,022 при  $\alpha_L=1:200$ .

В связи со сложностью установления величины шероховатости в натуре (изменением гидравлического сопротивления на разных участках русла и трудностью переноса подобия шероховатости на модель) в практике гидравлического моделирования на жестких моделях речных русел утвердился эмпирический подход.

После сооружения модели ее тарируют (калибруют) при расходе воды, воспроизводящем по числу Фруда расход воды в натуре, при котором измерен уклон водной поверхности. Если на модели или ее части уклон водной поверхности оказывается меньше натурального, шероховатость русла на модели увеличивается для увеличения уклона и правильного воспроизведения профиля водной поверхности. При этом обычно используют мелкий гравий, щебенку, вертикальные штыри, размещая их на дно модели с различной плотностью на разных участках русла и поймы.

В практике моделирования на жестких моделях распространен также случай, когда масштабы скоростей и расходов воды не задаются заранее, а определяются

на основании опытов при пропуске на модели подобного по наполнению расхода воды. Этот метод имеет следующий основной недостаток: соотношение расходов природы и модели с увеличением уровня меняется, т. е. получается переменный масштаб расходов. Тем не менее этот метод использовался, например, Г.И. Трофимовым и В.Ф. Тейтельманом [266].

Далее развитие мысли при разработке метода расчета гидравлических моделей получило направление, где основной принцип сводится к использованию экспериментальной зависимости Зегжды  $\lambda = f\left(\text{Re}, \frac{R}{k}\right)$ . В этом методе при  $Fr = idem$  число  $Re$  назначается с таким расчетом, чтобы соблюдалось условие  $\lambda_m = \lambda_n$ . Этому же методу придерживался И.И. Леви [164].

Теоретической основой отмеченного подхода служат эмпирические зависимости И.И. Никурадзе и А.П. Зегжды, полученные: первая — для случая напорного движения в трубах, вторая — для открытых потоков [97].

Следует отметить, что условия опытов Никурадзе и Зегжды в автомодельной зоне предполагают постоянство относительной зернистой шероховатости русла с ростом числа Рейнольдса. В естественных потоках (реках), как известно, это условие не выполняется. С ростом числа Рейнольдса, т. е. размеров потока (масштаба явления), во-первых, не происходит пропорционального роста крупности донных отложений, определяющих зернистую шероховатость границ, а во-вторых, зернистая шероховатость не является определяющим фактором в гидравлических сопротивлениях.

Многочисленные эмпирические данные для естественных открытых потоков: лотков, рек и каналов, обнаруживают связь  $\lambda = f(\text{Re})$ . Приведем в качестве примера связь коэффициента сопротивлений  $\lambda$  рек и земляных каналов с числом Рейнольдса, полученную И.Ф. Карасевым [110, 117], и зависимость  $\lambda = f(\text{Re})$  для каналов Индии и Пакистана, полученную Т. Бленчем [238]. Такой же характер зависимости получен Н.С. Знаменской [101] при грядовом строении дна.

Поэтому наряду с традиционно утвердившимся стремлением к сохранению на модели коэффициента гидравлического трения или коэффициента Шези и условий автомодельности в литературе имеются попытки использовать эмпирически установленные зависимости для гидравлического сопротивления русла.

Впервые, в 20-х годах прошлого столетия, такой путь был использован немецким исследователем Р. Винкелем [485] в Берлинской лаборатории. На основе обработки гидрометрических наблюдений по ряду рек он получил эмпирическую зависимость в  $\text{м}^{0,5}/\text{с}$ :

$$C = 7,42 R 5^{1/8}. \quad (7.1)$$

Аналогичная зависимость по данным натуральных и лабораторных исследований для меандрирующих участков рек при наполнении водой русла до уровня бровок берегов была получена в ГГИ М.М. Гендельманом [58]; в безразмерном виде она выражена связью:

$$\frac{C}{\sqrt{g}} = 1,6 R 5^{1/8}. \quad (7.2)$$

Следует отметить, что тому же степенному закону  $1/8$  отвечают при соответствующем толковании экспериментальные зависимости Блазиуса, Никурадзе (для гладких труб), Зегжды, В.С. Кнороза и других исследователей. Эти зависимости отличаются лишь коэффициентом, который, очевидно, отражает морфологические особенности границ потока. На основе степенной зависимости  $C=f(\text{Re})$  и предпосылки о том, что потоки в натуре и на модели должны подчиняться гидравлической зависимости равномерного движения, выражаемой формулой Шези, для масштабов скоростей и расходов воды с учетом (7.2) соответственно имеем:

$$\alpha_V = \alpha_H^{5/7} \cdot \alpha_I^{4/7}, \quad (7.3)$$

$$\alpha_Q = \alpha_L \cdot \alpha_H^{12/7} \cdot \alpha_I^{4/7}. \quad (7.4)$$

Эти зависимости могут применяться, когда модели придан дополнительный уклон.

С учетом  $\alpha_I = \frac{\alpha_H}{\alpha_L}$  получим:

$$\alpha_V = \alpha_L^{4/7} \cdot \alpha_H^{9/7}, \quad (7.5)$$

$$\alpha_Q = \alpha_L^{3/7} \cdot \alpha_H^{16/7}. \quad (7.6)$$

Для случая неискаженной модели  $\alpha_L = \alpha_H$  вместо последнего равенства получим:

$$\alpha_Q = \alpha_L^{2,71}. \quad (7.7)$$

Как известно, при моделировании по Фрудру на неискаженной модели имеем:

$$\alpha_Q = \alpha_L^{2,50}. \quad (7.7)$$

## 7.2. Существующие методы и приемы гидравлического моделирования на деформируемых моделях

При переходе от жестких к деформируемым гидравлическим моделям задача значительно усложняется необходимостью дополнительного введения условий подобия для геометрических и динамических характеристик подвижных наносов и деформируемых границ потока. Сложность формулировки этих дополнительных условий подобия и неоднозначность исходных представлений различных авторов об исследуемом процессе явились причиной появления большого количества методов, приемов и предложений в области теории и практики моделирования на деформируемых моделях. Не вдаваясь в детали каждого метода, попытаемся дать общую оценку современного состояния этой проблемы.

Исходя из вышеотмеченного, ясно, что различные авторы при разработке метода гидравлического моделирования для деформируемых русел берут за

основу одну из существующих методик моделирования на жестких моделях и дополняют двумя условиями: характеристиками границ потока и подвижности донного материала (крупность частиц, критерий подвижности, расход наносов, форма транспорта наносов).

Полагая  $Fr=idem$  и подразумевая условие автомодельности, С.Т. Алтуний [6] задается морфометрической связью  $\frac{B^m}{H} = K$  и считает ее основой для обеспечения подобия границ русла. По его мнению, концентрация наносов на модели и в натуре должна быть одинаковой, взвешенные наносы исключаются из дальнейшего рассмотрения, как не имеющие отношения к деформациям русла, для расхода наносов в  $кг/м^3$  он использует формулу И.Я. Орлова [5, 206]:

$$q_T = 0,006\gamma \left[ \frac{HI}{d \left( \frac{\gamma_T}{\gamma} - 1 \right)} - 0,04 \right]. \quad (7.9)$$

Из отмеченных предположений получаются все масштабные соотношения. Масштаб времени русловых деформаций, соответственно по  $Fr$ , принимается равным гидравлическому.

В качестве наносов при моделировании мелких частиц рекомендуется использовать паровозную изгарь  $\gamma_T=1,7-1,8$  крупностью  $d=0,25-3,0$  мм или порошки из пластмассы с  $\gamma_T=1,2-1,3$ ,  $d=0,5-2,0$  мм.

Опираясь на постулат В.М. Лохтина и принцип размерности, а также полагая, что форма русла формируется в зависимости от крупности частиц, слагающих ложе реки, М.А. Великанов [43] получил морфометрические зависимости для ширины и глубины потока, охватывающие натурные и лабораторные условия в виде:

$$\frac{b}{d} = \alpha_1 \left( \frac{Q}{d\sqrt{gd}} \right)^{x_1}, \quad (7.10)$$

$$\frac{h}{d} = \alpha_2 \left( \frac{Q}{d^2\sqrt{gd}} \right)^{x_2}, \quad (7.11)$$

где  $x_1=0,40$ ,  $x_2=0,35$ . Далее задается критерий устойчивости русла в форме выражения обратного критерию подвижности:

$$\frac{\alpha d}{HI} = \Psi = idem. \quad (7.12)$$

Великанов рекомендует в случае мелких наносов использовать заменители. В этом методе также применяется закон Фруда и понятие автомодельности. Своими корнями методика Великанова восходит к «режимной» концепции. Имеющиеся многочисленные модификации этого метода, например А.Г. Назаряна, А.К. Ананяна [12, 13, 196] и др., к идейной части ничего нового не добавляют. Иначе задаются подобные зависимости В.С. Лапшенковым и В.А. Скрыльниковым [162, 244, 245].

За рубежом этот же принцип, но с использованием формулы Г. Ласея, использовался Р. Буше и Ле-Меотэ [320].

Режимная концепция получила наиболее широкое развитие в практике гидравлического моделирования руслового процесса в Веллингфордской гидравлической лаборатории в Великобритании. Этот метод основан на допущении, что аллювиальные русла рек приспособливают свою ширину, глубину и уклоны к некоторому устойчивому состоянию реки, когда русло при заданном расходе воды транспортирует максимальный расход донных наносов. В этом методе для транспорта донных наносов используется формула П. Аккерса и Р. Уайта [305]. Гидравлические сопротивления определяются в соответствии с работой [480]. Расчеты модели производятся по методу 1981 г. Р. Уайта, Е. Париса и Р. Беттеса [481].

По некоторым другим методикам моделирования, также не вдаваясь в детали, представляется необходимым высказать некоторые частные замечания. Так, например, при постановке задачи моделирования В.С. Алтуниным [8], на наш взгляд, по сравнению с другими факторами, определяющими русловую процесс, переоценивается роль введенных им параметров  $k$  и  $\alpha$ , характеризующих лишь профиль распределения скоростей потока на вертикали, а исходное положение С.Х. Абальянца [1] о механизме движения взвешенных наносов как процессе, определяющем русловые деформации, даже в мелкопесчаном русле представляется не соответствующим физике явления.

Следующий этап в развитии теории руслового процесса особое внимание обратил на дискретные, структурные образования в русле реки и их решающую роль в русловом процессе [127, 129, 215, 238]. В связи с этим и в методиках моделирования появились новые идеи, указывающие на необходимость соблюдения при моделировании на деформируемых моделях подобия подвижных форм руслового рельефа. Первой такой работой в советской литературе была работа О.В. Андреева и И.А. Ярославцева [14, 15].

Позже работы в указанной постановке выполнялись Н.С. Знаменской [101, 102]. Ею же предпринята попытка обоснования критериальных условий искаженного моделирования. Мысль о необходимости учета подобия геометрических и динамических характеристик русловых форм при моделировании на размываемых моделях почти одновременно со Знаменской была высказана рядом зарубежных исследователей: Д. Цвамборном [503, 504], Г. Глазиком [351–354], Ф. Сентюрком [442] и др. Для обеспечения подобия транспорта наносов в русле в их структурной форме Н.С. Знаменской рекомендуется использование эмпирического графика классификации гряд, который назван ею критериальной зависимостью, а задание общей геометрии русла и вывод критериальных условий подобия плановых деформаций предлагается на основе эмпирического графика, построенного в координатах  $\left(\frac{B}{H}\lambda, \frac{H}{d}\right)$ . Случайный набор исходного материала, приводящий к случайному распределению точек по зонам на этих графиках, а также допущенная при систематизации и группировке точек неточность не дают достаточных оснований для принятия указанных графиков в виде, полученном автором. Неверная исходная позиция о равенстве скоростей гряд

равной крутизны в натуре и на модели, принятая Знаменской при построении классификационного графика микроформ и их моделировании, приводит к равенству масштаба времени русловых деформаций и гидравлического масштаба времени. Это положение, справедливое для динамически и геометрически неискаженных моделей, необоснованно экстраполируется и на случаи искаженных моделей при использовании на модели наносов естественного удельного веса.

В подходе Знаменской к проблеме моделирования на деформируемых моделях вызывает возражение большое искажение геометрических масштабов, рекомендуемое ею с целью экономии времени, размеров и мощности экспериментальных установок [101, 102, 131].

Существующие методы моделирования руслового процесса на деформируемых моделях могут быть разделены на две группы: методы, не учитывающие структурных форм транспорта наносов (М. Де Врис, П. Аккерс, Д. Гесслер, С. Гупта, К. Суга, Г. Шорляйн, Н.Б. Кереселидзе, П.А. Шатберашвили, С. Круикшанк и Д. Маза-Альварес, М. Занд и Г. Милли и др.). [469–473, 304, 306, 350, 360, 256, 451, 452, 436, 110, 290, 329, 500], и методы, учитывающие транспорт наносов в форме гряд (Н. Богарди, Д. Цвамборн, Г. Глазик, Ф. Сентюрк, Д. Хербертсон, И. Харрисон, У. Цанке, С. Ялин и Б. Бишоп, М. Раметте) [317–319, 503, 504, 351–354, 442, 362, 363, 501, 502, 487–491, 419, 420].

Кроме упомянутого графика Знаменской, в литературе существует ряд классификационных графиков гряд-микроформ и других исследователей, которые рекомендуются для использования при моделировании. Это графики Д. Саймонса и Е. Ричардсона, И. Богарди, Альбертсона — Р. Гарде, Д. Кеннеди, Итена, К. Ранга-Раджу и Сони, Хилла и Робинсона, У. Цанке, С. Ялина, М. Раметте [102, 447, 319, 347, 388, 501, 502, 488, 346, 419, 420, 323, 410].

Как справедливо отмечено Знаменской [101], с помощью этих классификационных графиков можно обеспечить лишь качественное подобие гряд, так как на них отсутствуют какие-либо количественные характеристики самих гряд. К этому замечанию надо добавить, что все перечисленные графики, кроме того, не дают надежных связей между лабораторными и натурными грядами, а также грядами из заменителей-наносов. Поэтому в настоящее время на практике часто оказывается предпочтительным для обеспечения подобия форм транспорта наносов на модели пользоваться результатами имеющихся многочисленных лабораторных исследований.

Наиболее интересными из перечисленных методов моделирования представляются методы С. Ялина [489, 490] и М. Раметте [419, 420]. В работе Ялина предпринята попытка учесть неравномерный режим движения донных наносов в форме гряд. Однако указанные авторы, не располагая обобщенной зависимостью для скорости движения натуральных и лабораторных гряд, расход наносов выражают формулой Г. Эйнштейна (Ялин) или Мейер-Петера, не учитывающими грязевую форму транспорта наносов (Раметте), что вносит некоторую неопределенность в эти методики.

Рядом отечественных и зарубежных исследователей в разное время предпринимались попытки систематизации и взаимосравнения различных методов

гидравлического моделирования на физических жестких и деформируемых моделях речных русел [65, 101, 102, 196, 302, 333, 473].

В работе А.Г. Назаряна, опубликованной в 1962 г. [196], представлены результаты анализа и взаимосравнения семи методов гидравлического моделирования руслового процесса на деформируемых физических моделях речных русел. Рассматриваются методы Г. Эйнштейна и Чэнь-Нина [333], метод тех же авторов, модифицированный — И. Богарди [317]; а также методы М.А. Великанова [43], И.В. Егиазарова [84], А.К. Ананяна [13] и А.Г. Назаряна [196].

В каждом из перечисленных методов составлялась система уравнений, включающая дифференциальные, эмпирические и полуэмпирические уравнения и формулы, описывающие русловой процесс с точки зрения авторов этих методов. Чаще всего в эту систему входят уравнения движения потока, неразрывности жидкости и твердого расхода, деформации русла, транспорта наносов, морфометрические зависимости, а также некоторые дополнительные соотношения (выражения для уклона дна и водной поверхности, начальные условия подвижки донных частиц и критерий их подвижности, продолжительности гидравлических и морфологических процессов и др.).

Из условий тождественности для натуры и модели систем уравнений устанавливаются масштабные коэффициенты моделирования, число которых как правило превышает число уравнений в системе. Поэтому остальные масштабные коэффициенты задаются авторами. Обычно это линейный масштаб, который принимается, исходя из размеров моделируемого участка реки и площади экспериментального зала или открытой русловой площадки, а также масштабные коэффициенты крупности и плотности экспериментального материала.

В табл. 7.1 представлены результаты сравнения численных значений масштабных коэффициентов моделирования по методам перечисленных выше авторов. Расчеты были выполнены для размываемой модели р. Аргичи, притока оз. Севана, для которой имелись следующие данные:  $Q=22,0$  м<sup>3</sup>/с;  $H=0,65$  м;  $I=0,0025$ ;  $d=8,5$  мм;  $\gamma_n=2,65$  т/м<sup>3</sup>. Крупность и плотность модельного грунта соответственно составляли  $d=3,4$  мм и  $\gamma_n=2,2$  т/м<sup>3</sup>. Исходя из размеров русловой площадки (длина 90 м, ширина 10 м), горизонтальный масштаб модели был назначен  $\alpha_L=84,0$ . Заданные на модели величины ( $\alpha_L$ ) или величины, производные от заданных на модели ( $\alpha_L$ ;  $\alpha_n$ ), в табл. 7.1 помещены в скобках.

Цель модельных исследований состояла в прогнозе развития (понижения) продольного профиля дна реки на ее приустьевом участке длиной 3 км в связи с искусственным понижением уровня воды высокогорного оз. Севан (базис эрозии) для использования воды в гидроэнергетике.

Как следует из табл. 7.1, численные значения масштабных коэффициентов моделирования, полученные по методам различных авторов, существенно отличаются друг от друга, и это неудивительно. В зависимости от различных исходных теоретических представлений этих авторов о русловом процессе в перечисленных методах в качестве основных определяющих фигурирует различное число факторов и их разновидностей, используются различные эмпирические и полуэмпирические уравнения для транспорта наносов, морфометрических зависимостей, гидравлических сопротивлений и др. Авторы

придерживаются различных взглядов также на геометрическое искажение деформируемых моделей, на возможности и необходимости воспроизведения на размываемых моделях плановых деформаций русла и др. Гидравлическое моделирование на модели р. Аргичи, выполненное сотрудниками Института водных проблем АН Армянской ССР по методике А.К. Ананяна и А.Г. Назаряна, основывалось на принципе самоформирования модельного русла из первоначального пионерного канала и достижения к концу эксперимента «вполне развитого русла», без установления каких-либо количественных критериев подобия плановых форм русла и его деформаций. Отмеченные исследования носили поисковый характер, направленный на разработку методики гидравлического моделирования на деформируемых моделях речных русел. Тем не менее табл. 7.1 представляется весьма показательной и демонстрирует сложности, возникающие при попытке систематизации и взаимосравнения существующих методов моделирования на деформируемых моделях речных русел и выбора из них наиболее подходящих методов.

**Таблица 7.1. Результаты расчетов масштабных коэффициентов моделирования по методам различных авторов для деформируемой модели р. Аргичи**

Масштабные коэффициенты	Автор метода						
	Г. Эйштейн Чэнь-Нин	И. Богарди	М.А. Великанов	И.В. Егизаров	И.И. Леви	А.К. Ананян, А.Г. Назарян, И.А. Аствартрян	А.Г. Назарян
Число уравнений в системе	9	8	6	5	6	6	7
Число масштабных коэффициентов	12	11	8	10	9	9	10
$\alpha_L$	(84)	(84)	—	(84)	(84)	(84)	(84)
$\alpha_d$	0,25	(2,50)	(2,50)	(2,50)	(2,50)	(2,50)	(2,50)
$\alpha_a$	67,0	47,8	—	(1,37)	(1,37)	(1,37)	(1,37)
$\alpha_C$	—	—	—	(2)	—	(2)	(2,16)
$\alpha_H$	37,3	66,0	54,3	17,0	17,0	21,0	17,0
$\alpha_i$	0,44	0,78	0,64	0,20	0,20	0,25	0,20
$\alpha_v$	6,12	8,16	11,30	3,70	4,13	4,57	4,00
$\alpha_Q$	19200	49000	67000	5480	5900	2920	2570
$\alpha_G$	67,0	1230	3620000	2480	—	6640	1135
$\alpha_t$	13,7	17800	0,19	—	13,70	81,0	45,0

В монографиях Н.С. Знаменской [101, 102] также предпринята попытка анализа и систематизации методов гидравлического моделирования на деформируемых моделях речных русел. Подробно проанализировав большое число



существующих методов моделирования и рассмотрев сходства и различия между ними, Знаменская представила в табличной форме аналитические выражения для масштабных коэффициентов, предлагаемых для расчета деформируемых моделей в 18 методах: 11 советских и 7 зарубежных исследователей [101].

Для сравниваемых методов приведены выражения масштабных коэффициентов для критериев динамического подобия, гидравлических сопротивлений, морфометрических соотношений, транспорта наносов, скорости потока, крупности и плотности опытного материала, подвижности донных частиц, морфологического и гидравлического масштабов времени. Сопоставление и взаимосравнение указанных методов в табличной форме носит формальный характер, ибо, как отмечалось, масштабные коэффициенты отражают различные взгляды авторов на русловой процесс и определяющие его факторы, а также предпочтения этих авторов в выборе тех или иных аналитических полуэмпирических и эмпирических зависимостей для морфометрических соотношений, гидравлических сопротивлений, транспорта наносов и др.

Из числа методов, представленных в таблице Знаменской, методы И.А. Ярославцева [301], Н.А. Ржаницина [227], П.А. Шатберашвили [290], П. Аккерса [304, 306], Р. Гарде [346] основаны на идеях «режимной теории» (устойчивого русла) и необходимости соблюдения подобия геометрических соотношений и плановых деформаций русла, выраженных морфометрическими зависимостями. В большинстве же методов акцент делается на соблюдение подобия транспорта наносов и гидравлических сопротивлений русла, выраженных различными формулами. При этом в методах Г. Эйнштейна и Чэнь-Нина [333], И.В. Егiazарова [84], И.И. Леви [164] и А.В. Караушева [107], Де Вриса [469–473] транспорт наносов рассматривается на структурном уровне отдельных частиц без их скопления в грядовые образования, а в методах Н.С. Знаменской [101, 102], В.С. Алтунина [8], Д. Цвамборна [503, 504] и И. Хербертсона [363] — на структурном уровне движения гряд-микроформ.

В монографии Н.П. Гилярова [65] дан довольно обстоятельный обзор общих принципов, методов, способов и практических приемов моделирования речных потоков и руслового процесса на жестких и деформируемых моделях речных русел. Рассмотрены особенности моделирования на деформируемых моделях речных русел. В этой работе освещен богатый опыт исключительно гидравлических лабораторий СССР.

Диссертационная работа С. Абдалла, выполненная в 1990 г. под руководством М. Де Вриса [302, 473], посвящена взаимосравнению четырех методов моделирования руслового процесса на деформируемых моделях речных русел. Сравнивались метод моделирования Г. Эйнштейна и Чэнь-Нина [333] и методы, разработанные и применяемые в гидравлических лабораториях Дельфта (Нидерланды) [448–450, 469–473], Шату (Франция) [410, 419, 420] и Веллингфорда (Великобритания) [306, 307, 480–484].

Перечисленные методы имеют как принципиальные различия, так и некоторые схожие черты.

Метод лаборатории Веллингфорда основан на «режимной» концепции «устойчивых» русел, тогда как остальные три метода для вывода масштабных

коэффициентов используют базовые уравнения, описывающие движение воды и наносов.

Во всех рассмотренных методах допускается отклонение от закона Фруда.

В трех методах моделирования (кроме метода лаборатории Веллингфорда) в качестве параметра потока для транспорта (подвижности) донных наносов используется критерий А. Шильдса.

Метод лаборатории Шату отличается от всех остальных разграничением и учетом при моделировании форм транспорта донных наносов естественной плотности и их легких заменителей: гладкой фазы движения донных частиц и движения в форме гряд типа рифелей или дюн в соответствии с классификацией М. Раметте [419, 420].

В методах Г. Эйнштейна, Чэнь-Нина и лаборатории Шату гидравлические сопротивления определяются на основе формулы Маннинга–Штриклера, а в методе лаборатории Дельфта они оцениваются по коэффициенту Шези С, который для натуральных условий определяется непосредственными измерениями, а для модели — с помощью специальных экспериментов в лотках, или на основе литературных источников.

Методы Эйнштейна и лаборатории Дельфта приводят к наклоненным (сверх искажения) моделям, поскольку продольный и вертикальный геометрические масштабы назначаются независимо друг от друга. В методе же лаборатории Шату масштаб уклонов равен масштабу отношений продольного и вертикального масштабов.

В методах лаборатории Шату и Веллингфорда дополнительное наклонение моделей не рекомендуется, но практикуются большие искажения геометрических масштабов.

С. Абдалла выполнил сравнение перечисленных выше методов моделирования на примере р. Воол (Нидерланды), для которой имелись детальные данные натуральных измерений гидравлических характеристик потока и топография речного русла. Для всех четырех методов их сравнение с натурными данными (продольным профилем дна русла на участке длиной 10 км при расходе воды 1500 м<sup>3</sup>/с) производилось для двух типов модельного материала — песка, и его легкого заменителя — бакелита. Наилучшее соответствие с натурой было получено по методам Эйнштейна и Чэнь-Нина и Дельфтской лаборатории как для песка, так и для бакелита. Метод Шату дал хорошие результаты для бакелита, но существенные расхождения для песчаного материала. Моделирование по методу лаборатории Веллингфорда как для песка, так и для бакелита привело к неудовлетворительным результатам [302, 473].

Одной из причин несоответствия отметок дна при моделировании по методу лаборатории Веллингфорда М. Де Врис считает тот факт, что р. Воол имеет зарегулированные, фиксированные берега, тогда как режимная концепция имеет дело с размываемыми берегами [473].

При интерпретации результатов описанного выше взаимосравнения методов гидравлического моделирования на деформируемых моделях речных русел, практикуемых в трех крупнейших гидравлических лабораториях Европы, и метода, разработанного Эйнштейном и Чэнь-Нином, следует также иметь в виду

следующие обстоятельства. Непосредственное взаимосравнение методов моделирования, приведенных выше, возможно лишь на качественном уровне путем формального взаимосравнения аналитических выражений и численных значений одноименных масштабных коэффициентов моделирования в каждом частном методе, как это делалось в описанных выше случаях А.Г. Назаряном и Н.С. Знаменской. Количественное же взаимосравнение перечисленных выше методов, выполненное С. Абдаллой [302], основано на сравнении каждого из этих методов с упрощенной математической моделью для расчета двухмерной топографии дна прототипа (р. Воол), а не моделей непосредственно между собой.

Полноценное количественное взаимосравнение моделей и результатов моделирования по выбранным для сравнения методам моделирования представляется невозможным в принципе, без фактического строительства каждой из этих физических моделей и выполнения на них исследований для одного и того же объекта по каждому методу, что, как справедливо отмечает Де Врис, является весьма трудоемким и дорогостоящим мероприятием [473].

В обзорной работе А.Б. Клавена и З.Д. Копалиани, посвященной методам гидравлического моделирования речных потоков и руслового процесса [117], предпринята попытка систематизации опубликованной к тому времени в отечественной и зарубежной литературе обширной информации по проблеме гидравлического моделирования речных потоков, транспорта наносов и русловых деформаций на жестких и деформируемых, искаженных и неискаженных физических, гидравлических моделях речных русел.

Взаимосравнение различных подходов и методов гидравлического моделирования процессов, происходящих в речных руслах, в этой работе производится на основе анализа общих принципов гидравлического моделирования на моделях речных русел, поскольку невероятно большое разнообразие взглядов, нюансов и противоречий по большинству частных вопросов лабораторного дела в области речных моделей, как отмечалось, не дает возможности непосредственного корректного взаимосравнения конкретных методов моделирования на жестких, и особенно деформируемых, моделях речных русел. В этой работе особое место уделяется разночтениям в вопросе необходимости учета структурных форм транспорта донных наносов, искажения геометрических масштабов речных моделей и масштаба времени морфологических процессов.

Обзор завершается перечислением наиболее актуальных научных и методических проблем руслового процесса, теории и практики гидравлического моделирования на размываемых моделях речных русел, развитие которых необходимо для достижения реального прогресса в области теории руслового процесса и методики его моделирования. Результаты исследований некоторых из перечисленных в обзоре вопросов, выполненных авторами после опубликования работы [117], в частности таких как: практика «строгого» моделирования руслового процесса рек, сложенных из крупного аллювия; гидравлические сопротивления русел различных морфологических типов и структурных форм транспорта донных наносов; гидравлическое моделирование на размываемых моделях с использованием легких заменителей донных наносов; влияние масштаба модели и степени его искажения на структуру поля скоростей потока и вторичные

течения; особенности механизма взаимодействия потока с фильтрующей толщей подстилающих грунтов, и ряд других, а также различные примеры решения разнообразных практических задач на гидравлических моделях речных русел — представлены в главах 4, 6, 8–12 настоящей монографии.

### 7.3. Искажение геометрических масштабов моделей речных русел

Вопрос об искажении геометрических масштабов жестких и деформируемых моделей является одним из центральных в теории моделирования. Одни теоретики и практики искажение линейных масштабов считают нежелательным, другие — обязательным.

В обзорной работе А. Петерсена [210] содержатся интересные сведения о деформируемых моделях, на которых в течение 35 лет (1930–1965 гг.) в Висксбургской лаборатории США решались вопросы, связанные с глубинными и плановыми деформациями различных участков рек Миссисипи, Огайо, Рио-Гранде, Арканзас (всего 21 модель). В опытах использовались естественные пески и заменители (в основном уголь).

Искажение линейных масштабов в преобладающем большинстве случаев, в 13 из 21 (т. е. 62 %) составляло 1–4, а в 4 случаях — 5–6, в 3 случаях — 8, и в 1 случае — 10 (р. Огайо). Несколько моделей было выполнено без искажения масштабов, в том числе модель меандрирующего участка р. Миссисипи в масштабе 1:60. Абсолютные размеры моделей в большинстве случаев составляли 30–50 м (т. е. примерно как в Руслевой лаборатории ГГИ), меняясь от 20 до 150 м. Указанная выше модель р. Миссисипи имела размеры: длину 183 м, ширину 38 м и глубину в среднем 1 м. Размываемое дно и берега были сложены из песка  $d=0,2$  мм.

В заключение обзора этих работ Петерсен приходит к следующим выводам.

— На моделях с деформируемым руслом получают данные, качественно согласующиеся с действительностью.

— Сооружение размываемых моделей стоит дорого, работа на них требует много времени, но именно модели больших абсолютных размеров помогают понять сложные явления, происходящие в аллювиальных руслах, и выполнять расчеты и прогнозы для нужд гидротехнического проектирования и стабилизации речных русел.

Здесь следует отметить, что Ф. Эйснер считал возможным только 2–3-кратное искажение масштабов моделей [289]; И.И. Леви, В.Н. Гончаров, А.А. Сабанеев, Марино-Легард допустимое искажение масштабов на моделях ограничивают величиной 5–6; В.М. Лятхер и А.М. Прудовский — 2–3; К.И. Россинский, Н.А. Ржаницын — 2–4; А.И. Лосиевский — 3; П.А. Шатберашвили — 3–7, Б.П. Куколевский — 4 [67, 68, 164, 168, 227, 228, 159, 290]. Г. Фогель допускал 25-кратное искажение геометрического масштаба [467].

А.П. Зегжда в основу искажения полагал принцип, согласно которому искажение регламентируется тем пределом, при котором широкие русла при искажении не перестают быть «широкими руслами» [96].

Г. Энгельс [337, 338], М.А. Великанов [43], С.Т. Алтунин [5, 6], Н.А. Ржаницын [227, 228], Н.С. Знаменская [101, 102], Д. Шарп [280] и некоторые другие исследователи натурные реки малых размеров рассматривают как модели крупных рек. Великанов отмечает, что «...геометрическое подобие форм русла в природе вообще отсутствует, например, отношение ширины русла к его глубине различно у рек разных размеров и зависит как от водоносности и уклона, так и от размера наносов» [43, с. 101]. Поэтому нелогично требовать, чтобы лабораторная микрорека была геометрически подобна своей натуре.

Знаменская считает, что в этой цитате Великанова «...по существу сформулирован закон искажения масштабов натуральных потоков и высказана мысль о необходимости использования этого закона при моделировании» [101, с. 141].

Действительно, в морфометрических зависимостях Алтунина и Великанова эта мысль подтверждается количественно по данным фактических измерений на реках. Ржаницын также подтвердил эту мысль, получив нелинейные связи изменения  $V/H$  от порядка (размера) рек.

Не опровергая исходную идею указанных авторов и достоверность связей, полученных ими на основе фактических данных, необходимо отметить, что эти зависимости следует искать не вообще для всех рек, а для рек одного и того же типа, меандрирующих, разветвленных и т. д., по классификации ГГИ. Отмеченное внесло бы определенность в подобного рода зависимости. При одном и том же расходе воды (порядке потока) ширина паводочного русла рек с разным типом руслового процесса может меняться в широких пределах [134, 217]. У меандрирующих рек ширина меньше, чем у рек с осередковым и побочным типом руслового процесса, а у этих рек, в свою очередь, меньше, чем при пойменной многоруканности.

Считая возможным исказить геометрические масштабы на жестких моделях для получения идентичного типа русла и осредненных характеристик потока, необходимо также отметить, что внутренняя структура потока при искажении может значительно перестроиться. Так, Н.Е. Кондратьев [131, 117] выдвигал идею о том, что классическая схема единого циркуляционного вихря на повороте речного русла получена в опытах на моделях или при наблюдениях в натуре, когда отношение  $V/H$  было менее 10, но трудно представить себе наличие столь простой схемы в реальных потоках на больших меандрирующих реках с  $V/H$  порядка 50–80. В этих условиях кинематическая структура потока на повороте усложняется: наблюдаются явления удара струи о берег и отражения от него, деление потока на струи и т. д. Соответственно при искажении такого натурального потока на модели получим качественно иную картину течений, и в задачах, где эта структура является определяющей (например, движение наносов и формирование рельефа русла), подобие будет нарушено.

Нужно сделать еще одно существенное, на наш взгляд, замечание относительно искажения геометрических масштабов при моделировании на деформируемых моделях.

Известно, что средние русловые формы соизмеримы с шириной русла, а микроформы — с глубиной потока. Поэтому отношение  $V/H$  одновременно есть отношение размеров средних форм к размерам микроформ. Чем больше это отношение, тем больше порядков структурных форм разных размеров наблюдается

в русле реки. Поэтому при искажении  $B/H$  на модели может произойти смещение русловых форм разных порядков и размеров, а заодно и сути руслового процесса, выражающегося в смещении и взаимодействии этих форм. Отсюда вытекает необходимость считаться с этим обстоятельством. Таким образом, на сильно искаженных деформируемых моделях можно сохранить тип русла, но не идентичную структуру потока, процесса деформации и движения наносов.

К аналогичным выводам пришли Е. Шлейермахер, А.В. Караушев, К. Суга [435, 107, 256, 451, 452] и ряд других авторов. По данным Суга, в практике известной в Японии Касимской лаборатории большинство деформируемых моделей выполнялось без искажения геометрических масштабов, а допустимое в редких случаях искажение ограничивалось величиной 1,5–2,0 [452].

В лаборатории Шату (Франция) допустимое искажение масштабов на деформируемых моделях, по свидетельству М. Рамэтте, также ограничивалось величиной 2,0 [419].

#### **7.4. Масштаб времени установившихся, обратимых русловых деформаций**

Одной из основных трудностей при расчете деформируемых моделей речных русел является интерпретация и выбор масштабного множителя времени русловых деформаций  $\alpha_t$ , который различными исследователями определяется по-разному. Из известных приемов в настоящее время наиболее распространены способы получения  $\alpha_t$  из уравнения баланса наносов [107, 290, 333, 334, 469, 503, 504] и из выражения числа  $Ft$  (чаще масштаб времени русловых процессов в этом случае принимают равным гидравлическому масштабу времени [101]). Иногда  $\alpha_t$  определяют из выражения для времени размыва [236] или из условий тождественности для природы и модели систем уравнений, описывающих русловую процесс: уравнений деформации дна, твердого расхода, морфометрических зависимостей и уравнения неразрывности [12, 13].

Расчеты по различным способам для одних и тех же моделей приводят к значительно различающимся результатам. Причина расхождения позиций различных исследователей в определении величины  $\alpha_t$  в основном заключается в бесструктурном подходе к русловому процессу, неучете дискретного характера транспорта наносов, проявляющегося в образовании русловых форм разного порядка, а отсюда — в неоднозначности определяемых морфологических характеристик русла и выражения для расхода донных наносов, входящих в  $\alpha_t$ .

В ГГИ был предложен иной подход к определению масштаба времени русловых деформаций, принципиально отличающийся от существующих предложений [249, 117].

Исходя из дискретных представлений о русловом рельефе, его деформациях и факторах, их определяющих, для случая, когда русловой процесс в природе и на модели выражается движением микроформ установившегося профиля, мас-

штабный множитель  $\alpha_\tau$  в этих работах определяется из уравнения баланса донных наносов для единицы ширины потока:

$$\frac{\partial q_\tau}{\partial L} + \frac{\partial z}{\partial t} = 0, \quad (7.13)$$

где  $q_m$  — расход донных наносов на единицу ширины русла,  $Z$  — отметка дна,  $t$  — время,  $L$  — расстояние. Из (7.13) имеем:

$$\alpha_\tau = \frac{\alpha_L \alpha_H}{\alpha_{q_\tau}}. \quad (7.14)$$

Масштаб расхода донных наносов можно заменить выражением:

$$\alpha_{q_\tau} = \alpha_{h_\tau} \alpha_{C_\tau}, \quad (7.15)$$

согласно известной зависимости:

$$q_\tau = Kh_\tau C_\tau, \quad (7.16)$$

если значение коэффициента полноты профиля гряды  $k$  для природы и модели принять постоянной величиной.

В зависимостях (7.15) и (7.16)  $h_\tau$  выражает высоту гряды, а  $C_\tau$  — скорость ее смещения. Производя подстановку (7.15) в (7.14), имеем:

$$\alpha_\tau = \frac{\alpha_L \alpha_H}{\alpha_{h_\tau} \alpha_{C_\tau}} = \frac{\alpha_\tau}{\alpha_{h_\tau}}, \quad (7.17)$$

где  $\alpha_\tau = \frac{\alpha_L}{\alpha_{C_\tau}}$  выражает масштаб периода прохождения соответственных гряд на модели и в натуре.

Зависимостью (7.17) для определения масштаба времени русловых деформаций можно пользоваться в том случае, если есть возможность установить  $\alpha_\tau$ , для чего необходимо определить значение скорости гряд в натуре и на модели.

Для случая, когда  $\alpha_\tau$  неизвестно, можно воспользоваться формулами для скорости движения гряд:

$$c_\tau = 0,032(v - v_0) \cdot \left(\frac{v}{v_0}\right) \cdot \left(\frac{d}{h_\tau}\right)^{0,7} \quad (7.18)$$

или

$$c_\tau = 0,019 v Fr^3, \quad (7.19)$$

установленными в работах [248, 249].

Подставляя в (7.17)  $\alpha_{C_\tau}$ , определив его из (7.18), имеем:

$$\alpha_\tau = \frac{\alpha_L \alpha_H}{\alpha_{(v-v_0)} \alpha_{\left(\frac{v}{v_0}\right)} \alpha_{\left(\frac{d}{h_\tau}\right)^{0,7}}}. \quad (7.20)$$

Подставляя в (7.17)  $\alpha_{C_2}$ , определив его из (7.19), получим:

$$\alpha_\tau = \alpha_H \frac{\alpha_t}{h_\tau \alpha_{Fr^3}}. \quad (7.21)$$

Выражения (7.20) и (7.21) не противоречат уравнению баланса наносов и учитывают структурный характер перемещения донных наносов в форме гряд.

Приведенная здесь методика определения масштабного множителя временнорусловых деформаций, как отмечалось, справедлива для случая, когда русловой процесс в природе и на модели выражается в виде перемещения микроформ речного русла установившегося профиля.

Для случая мезоформ речного русла аналогично можно исходить из зависимости [138] для скорости установившегося режима их движения:

$$C_\Delta = \frac{h_\Gamma}{\Delta} v Fr^3, \quad (7.22)$$

где  $\Delta$  — высота мезоформы.

Для масштаба скорости перемещения мезоформы имеем:

$$\alpha_{C_\Delta} = \alpha_{\frac{h_\Gamma}{\Delta}} \alpha_v \alpha_{Fr^3}. \quad (7.23)$$

Если в выражении масштаба времени русловых деформаций, полученном из уравнения баланса наносов (7.14), подставить (7.23) получим:

$$\alpha_\tau = \frac{\alpha_L \alpha_H}{\alpha_{q_\Gamma}} = \frac{\alpha_L \alpha_H}{\alpha_\Delta \alpha_{C_\Delta}} = \frac{\alpha_L \alpha_H}{\alpha_\Delta \alpha_{\frac{h_\Gamma}{\Delta}} \alpha_v \alpha_{Fr^3}} = \alpha_H \frac{\alpha_t}{h_\tau \alpha_{Fr^3}} \quad (7.24)$$

Сравнивая (7.21) и (7.24), видим, что масштаб времени русловых деформаций, как для мезоформ, так и микроформ при установившемся режиме их перемещения оказывается единым.

Описанную здесь методику для определения масштаба времени обратимых русловых деформаций можно использовать и в случае необратимых деформаций на каком-то протяжении участка русла для тех промежутков времени, когда транспорт наносов осуществляется микроформами установившегося профиля. Такие случаи, по данным натурных исследований ГГИ, нередки в нижних бьефах ГЭС.

Используя выражение для времени размыва на единицу ширины русла [236, 249]:

$$\tau = \frac{\gamma_\Gamma W}{q_\Gamma}, \quad (7.25)$$

где  $W$  — объем смываемого грунта. При  $\gamma_n = \gamma_m$  будем иметь в масштабном выражении:

$$\alpha_\tau = \frac{\alpha_\gamma \alpha_W}{\alpha_{q_\Gamma}} = \frac{\alpha_L \alpha_H}{\alpha_{h_\Gamma} \alpha_v \alpha_{Fr^3}} = \alpha_H \frac{\alpha_t}{h_\tau \alpha_{Fr^3}}, \quad (7.26)$$



то же выражение, что и в случае установившегося движения микро- и мезоформ речного русла.

Из зависимостей (7.24) и (7.26) следует, что условие равенства масштаба времени морфологических (русловых) и гидравлических процессов  $\alpha_t = \alpha_f$  может быть достигнуто лишь при  $\alpha_{Fr} = 1$  и  $\alpha_{H/h_z} = 1$ , т. е. для динамически и геометрически неискаженных моделей.

## 7.5. Моделирование на напорных моделях

Трудности, возникающие при работе на моделях с открытой водной поверхностью, принуждали экспериментаторов искать иные приемы воспроизведения и изучения открытых потоков в лабораторных условиях. Один из таких приемов, получивший достаточно широкое распространение, состоит в замене обычной модели с открытой поверхностью напорной моделью и в использовании на такой модели в качестве жидкости либо воды, либо воздуха.

Пионером этого нового приема гидравлического моделирования считается А.Г. Аверкиев, опубликовавший в 1952 г. первую работу, содержащую обоснование метода и основные приемы работы с напорными воздушными моделями [3].

Главное преимущество воздушно-напорных моделей А.Г. Аверкиев видел в оперативности выполнения исследований на них, в возможности создания очень малых моделей и, следовательно, более эффективного использования в целом экспериментальной площадки.

Вместе с тем Аверкиев сразу ограничивает круг задач, решаемых на таких моделях, случаями потоков, свободная поверхность которых близка к плоскости, считая, что исследования по новому методу могут быть достаточными для проектных обоснований.

Весьма скромно характеризует возможности воздушно-напорных моделей и В.М. Маккавеев, отмечая, что для участков рек с резким изменением формы свободной поверхности или при достаточно большом искажении геометрии русла результаты лабораторного изучения потоков могут иметь только качественный, ориентировочный характер [175].

Румынские исследователи М. Каган и С. Хынку, хотя и характеризуют воздушно-напорные модели как наиболее подходящие для изучения движения наносов, предлагая в этих случаях использовать в качестве критерия подобия отношение критических сил трения в натуре и на модели, вместе с тем замечают, что в случае, когда обеспечено моделирование на основании вышеизложенного критерия, морфологические процессы протекают на воздушно-напорной модели особенно интенсивно и могут количественно и даже качественно отличаться от природы [104]. С целью устранения этого нежелательного эффекта рекомендуется лишь немного превышать размывающую скорость воздушного потока. Представляется, что подобного рода рекомендации утрачивают черты расчетного обоснования модели и более пригодны для обычного лабораторного исследования, не связанного с необходимостью пересчета результатов на конкретный натурный объект.

Наиболее полное обоснование метода моделирования на напорных моделях содержится в монографиях В.М. Лятхера и А.М. Прудовского [171] и Н.П. Гилярова [65]. Лятхер и Прудовский, наряду с обстоятельным теоретическим обоснованием принятого метода моделирования на напорных водных моделях, приводят обширный экспериментальный материал, полученный на моделях различных водных объектов, но преимущественно характеризующий общие деформации русла без выделения конкретных форм руслового рельефа. Большое внимание уделено рассмотрению вопросов подобия движения твердых частиц в жидкости, что представляет безусловный интерес не только в случаях напорного движения, но и при движении открытых потоков.

Гиляров [65], рассматривая общие вопросы гидравлического моделирования, основной акцент делает на воздушно-напорные модели. Исследования на них считаются наиболее эффективными, когда приходится моделировать участки больших рек, особенно дельты и эстуарии, где картина движения потока характеризуется спокойным режимом течения и медленной его изменчивостью.

Основными вопросами исследований на таких моделях считаются плановая структура течения и распределение расхода воды по рукавам в бытовых условиях и при осуществлении регулирующих мероприятий. Оценки движения наносов рекомендуется давать по данным о кинематике потока.

Учитывая специфику напорного моделирования, представляется, что этот метод может применяться для решения отдельных вопросов гидравлики сооружений в русловых потоках.

Вместе с тем задачи, связанные с исследованием руслового процесса, понимаемого в многообразии морфологических образований руслового рельефа, в непосредственной связи этих образований с конкретными элементами кинематической структуры руслового потока, по-видимому, не могут успешно решаться на напорных моделях, поскольку в этом случае к определенному числу спорных вопросов, возникающих при работе на деформируемых открытых водных моделях, добавляется еще по крайней мере два (например, влияние крышки на кинематическую структуру потока, форсировка скоростей потока воздуха для приведения в движение наносов). Существенным при моделировании руслового процесса представляется не просто добиться движения наносов или даже качественного соответствия намывов и размывов, а получить русловые формы, подобные натурным по относительным размерам и их динамическим характеристикам.

В начале 70-х годов прошлого столетия в Русловой лаборатории ГГИ была создана аэродинамическая лаборатория, в которой в течение 10–15 лет на воздушных моделях выполнялись экспериментальные исследования методического и производственного назначения.

Ввиду ограниченного использования отмеченного метода в практике Русловой лаборатории ГГИ по сравнению с другими методами моделирования и недостатка места для подробного изложения этого опыта, сведения об этих работах в настоящей монографии не приводятся.

## ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ПРАКТИЧЕСКИХ ЗАДАЧ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЖЕСТКИХ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ РЕЧНЫХ РУСЕЛ

### 8.1. Гидравлическое моделирование проектных решений трассирования железнодорожной насыпи на участке русла р. Хани по трассе БАМ

На гидравлической модели исследовалась эффективность вариантов проектных решений трассирования железной дороги вдоль правого берега русла р. Хани на участке 1298-й — 1300-й километр трассы БАМа для оценки характера и степени гидравлического воздействия потока на естественный ход руслового процесса и железнодорожную насыпь в русле реки [141].

Исследуемый участок характеризуется осередковым типом руслового процесса. Плановых деформаций внешних границ русла (берегов) на этом участке р. Хани не наблюдается, а внутрирусловые деформации проявляются прежде всего в виде размыва или намыва контуров мезоформ (островов, осередков, пляжей). Темпы этого вида деформаций в среднем за многолетний период составляют 1,7–2,2 м/год.

Модель участка русла Хани выполнялась в жестком варианте без искажения линейных масштабов (рис. 8.1). Для условий геометрически неискаженной модели при  $Fr=idem$  из теории подобия имеем:

— для масштаба расходов воды:

$$\alpha_Q = \alpha_L^{2,5}, \quad (8.1)$$

— для масштаба скоростей потока:

$$\alpha_V = \sqrt{\alpha_H}. \quad (8.2)$$

Модель исследуемого участка р. Хани была выполнена в геометрическом масштабе  $\alpha_L = \alpha_H = 150$ , поэтому:

$$\alpha_Q = \alpha_B^{2,5} = 150^{2,5} = 274500,$$

$$\alpha_V = \sqrt{\alpha_H} = \sqrt{150} = 12,25.$$

Длина модели 15 м, ширина в среднем — 3,0 м.

Для тарировки использовались данные о гидравлических характеристиках потока, представленные Ленгипротрансом, по морфоствору, соответствующему на модели поперечному сечению русла в створе измерительных игл-тастеров № 8, 9 (рис. 8.2 (а)).

При тарировке использовалась смесь крупного песка с мелким гравием в небольшом количестве для увеличения шероховатости дна модели в нескольких местах в начале и в средней части модели.



Рис. 8.1. Гидравлическая модель р. Хани

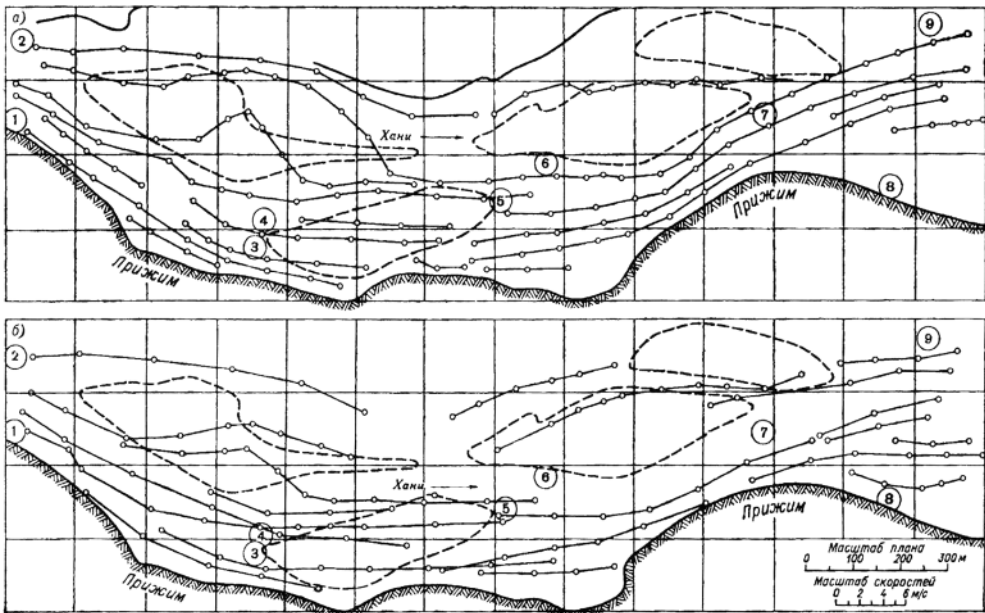


Рис. 8.2. Поле поверхностных скоростей потока в бытовом состоянии русла при расходах воды:  
а – 1,0 % обеспеченности; б – 0,3 % обеспеченности

В табл. 8.1 даны гидравлические характеристики натурального и модельного потоков в гидростворе тастеров № 8, 9 при расходе воды  $Q_{1\%} = 3110 \text{ м}^3/\text{с}$ , уровне  $H_B = 577,57 \text{ м}$  в условных отметках и уклоне водной поверхности 0,004. Этому расходу воды на модели соответствует расход воды 11,3 л/с. На модели р. Хани

было выполнено 13 опытов, разделенных на четыре серии. Первая серия воспроизводила русло в бытовом состоянии. Во второй серии опыты проводились при наличии железнодорожной насыпи в русле. В третьей серии опытов в русле было установлено пять бун в соответствии с одним из вариантов проектных решений Ленгипротранса, а в четвертой серии была воспроизведена срезка грунта на русловой форме перед бунами № 3, 4 и 5 (рис. 8.3).

**Таблица 8.1. Гидравлические характеристики натурального и модельного потоков в гидростворе 8–9 при  $Q=3110 \text{ м}^3/\text{с}$**

Характеристика потока	Натура	Модель	Масштабный множитель	
			Символ	Числовое значение
Ширина русла, м	390	2,60	$\alpha_B$	150
Средняя глубина, м	4,21	0,028	$\alpha_H$	150
Средняя скорость потока, м/с	3,59	0,29	$\alpha_V$	12,25
Уклон водной поверхности	0,004	0,0039	$\alpha_I$	1,00
Число Фруда $Fr = \frac{v}{\sqrt{gH}}$	0,56	0,56	$\alpha_{Fr}$	1,00
Коэффициент Шези, $\text{м}^{0.5}/\text{с}$	27,62	27,62	$\alpha_C$	1,00
Коэффициент сопротивления русла $\lambda$	0,0257	0,0257	$\alpha_\lambda$	1,00
Относительная ширина $B/H$	93	93	$\alpha_{B/H}$	1,00
$\frac{\lambda B}{H}$	2,39	2,39	$\alpha_{\lambda, B/H}$	1,00

В каждой серии проводились три опыта при расходе воды  $Q_{1,0\%}=3110 \text{ м}^3/\text{с}$ , при расходе воды  $Q_{0,3\%}=4215 \text{ м}^3/\text{с}$ , соответствующем на модели  $Q=15,4 \text{ л/с}$ , и при  $Q=2140 \text{ м}^3/\text{с}$ , соответствующем на модели  $Q=7,8 \text{ л/с}$ . Кроме того в первой серии опытов был проведен один опыт с расходом воды на модели  $Q=5,3 \text{ л/с}$ , соответствующим в натуре  $Q_{10\%}=1455 \text{ м}^3/\text{с}$ .

Анализ полученного экспериментального материала производился путем сопоставления результатов опытов всех четырех серий при одних и тех же расходах воды. В табл. 8.2 и 8.3 приведены соответственно уклоны и отметки водной поверхности в бытовых и проектных условиях по данным экспериментов на модели.

В табл. 8.2 приведены отдельно значения уклонов между тастерами № 1, 2–5, 5–8, 9 и для всего участка между тастерами №1, 2–8, 9. Местоположение тастеров указано в кружках на рис. 8.2, 8.3.

По результатам лабораторных исследований для всех опытов были получены траектории и значения скоростей движения поверхностных поплавков в бытовых и проектных условиях при расходах воды 1,0 и 0,3 % обеспеченности.

Из опытов 1, 5, 8 и 11, проведенных в разных сериях при расходе воды 1 %-ной обеспеченности, следует, что в бытовом состоянии русла (рис. 8.2 (а)) максимальная поверхностная скорость потока наблюдается в районе тастера № 7 и составляет 5,79 м/с. Скорости вдоль правого скального берега (прижима)

**Таблица 8.2. Уклоны водной поверхности в бытовых и проектных условиях по данным экспериментов на модели р. Хани**

№ опыта	$Q$ , л/с	$I_1$ тастеры № 1, 2–5	$I_2$ тастеры № 5–8, 9	$I_{\text{общ}}$ тастеры № 1, 2–8, 9
Русло в бытовом состоянии				
1'	7,8	0,00371	0,00338	0,00357
1	11,3	0,00390	0,00378	0,00384
2	15,4	0,00382	0,00407	0,00393
3	5,3	0,00368	0,00309	0,00342
Русло с ж/д насыпью				
4	7,8	0,00301	0,00415	0,00351
5	11,3	0,00324	0,00458	0,00382
6	15,4	0,00323	0,00462	0,00384
Русло с ж/д насыпью и бунами				
7	7,8	0,00240	0,00505	0,00356
8	11,3	0,00223	0,00560	0,00371
9	15,4	0,00240	0,00565	0,00382
Русло с ж/д насыпью, бунами и срезкой				
10	7,8	0,00263	0,00472	0,00354
11	11,3	0,00259	0,00525	0,00376
12	15,4	0,00252	0,00533	0,00375

ниже тастера № 1 при выходе потока из сужения в расширение составляют 4,61–5,04 м/с. Далее скорость потока вдоль правого берега не превышает 4,0 м/с и увеличивается до 4,79 м/с в сужении в районе тастера № 7.

При наличии в русле железнодорожной насыпи (расположение насыпи в плане видно на рис. 8.3) не наблюдается перераспределения скоростного поля и ощутимого увеличения значений скоростей как в целом в русле, так и вдоль железнодорожной насыпи, расположенной у правого берега. При этом уклон водной поверхности в целом остается неизменным, но в верхней половине участка при наличии насыпи его значение несколько меньше, а в нижней половине участка больше, чем в бытовом состоянии (табл. 8.2). Значения отметок водной поверхности в целом на участке, по данным опытов, не меняются при наличии насыпи (табл. 8.3) — наблюдаются лишь местные эффекты повышения водной поверхности в районе тастера № 5 и понижения в районе тастера № 7.

Отсутствие существенных изменений скоростного поля потока и значений скоростей вдоль насыпи в русле, очевидно, можно объяснить характером морфологического строения самого русла, имеющего широкий распластаный поперечный профиль с отношением  $B/H=93$ . Габариты железнодорожной насыпи и отчуждаемая от русла часть ширины незначительно влияют на скоростное поле потока лишь на небольшом участке в районе тастера № 7, где скальный правый берег своим изгибом вызывает частичное стеснение поперечного сечения русла. Кроме того при сравнении скоростных полей на поверхности воды, отражающих

Таблица 8.3. Отметки водной поверхности (условные) в бытовых и проектных условиях по данным экспериментов на модели р. Хани

№ тастера	№ опыта												
	1'	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	584,32	585,02	585,58	583,74	584,19	584,97	585,42	584,25	585,62	585,62	584,28	484,91	485,45
2	584,80	585,59	586,19	584,05	584,62	585,45	586,12	584,72	585,98	585,98	584,72	485,48	486,05
3	582,78	583,35	583,77	582,21	583,05	583,64	583,98	582,87	583,78	583,78	582,82	483,48	483,80
4	583,19	583,49	583,74	582,09	582,93	583,45	584,28	582,83	583,87	583,87	582,85	483,33	483,69
5	580,53	581,07	581,73	579,91	581,13	581,73	582,27	581,88	583,20	583,20	481,65	482,39	483,02
6	580,83	581,32	581,74	580,42	581,44	581,67	582,22	582,15	583,14	583,14	481,76	482,42	482,97
7	579,20	578,92	579,44	577,68	578,58	578,13	578,92	578,38	578,48	578,48	477,61	478,55	478,83
8	—	577,77	578,22	—	—	577,77	578,28	—	578,43	578,43	—	477,92	478,55
9	577,66	577,95	578,32	577,28	577,60	577,92	578,40	577,59	578,37	578,37	477,64	477,94	478,43

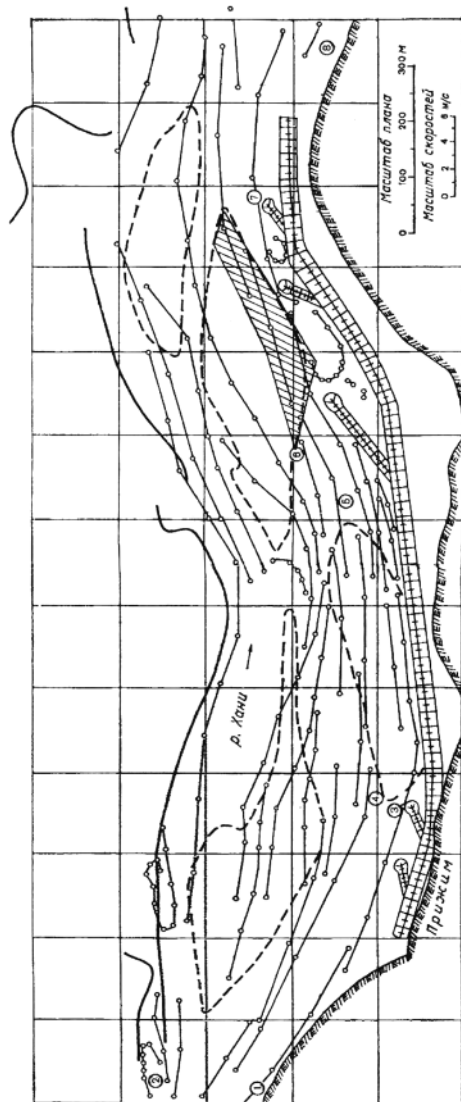


Рис. 8.3. Поле поверхностных скоростей потока при наличии в русле пяти бун и проектной срезки грунта

мгновенные значения скоростей потока, следует иметь в виду, что при пространственном характере течения воды, во-первых, наблюдается перемежаемость течений, т. е. изменение во времени направлений вектора скоростей, и, во-вторых, колебания значений скоростей. Пульсация актуальных значений скорости (местных, мгновенных) в поверхностном слое может составлять 20–25 % среднего значения, т. е. 10–12 % в обе стороны от среднего значения скорости.

В опыте 8 при наличии пяти бун в русле (положение бун в плане такое же, как на рис. 8.3) наблюдается некоторая перестройка поля поверхностных скоростей как в русле в целом, так и в правой его части. Максимальная скорость в русле, выше тастера № 4, вне зоны взаимодействия с сооружением, достигает 7,15 м/с. Буны резко уменьшают значения скоростей вдоль железнодорожной насыпи. Вдоль всей насыпи скорости потока не превышают 2,7 м/с, только на коротком участке в середине между бунами 2 и 3 в 15–20 м от насыпи наблюдается скорость 4,52 м/с. Максимальная скорость в межбунном пространстве (между бунами 4 и 5) достигает 1,62 м/с. Скорости потока у оголовков бун составляют 3,58–4,79 м/с. В опыте 8, по сравнению с опытом без бун, наблюдается повышение отметок водной поверхности в верхней по течению половине русла, а на участке ниже тастеров № 5 и 6 — понижение отметок водной поверхности (табл. 8.3).

Соответственно, при незначительном изменении общего уклона на участке в опыте 8 наблюдается уменьшение уклонов на верхней половине исследуемого участка и увеличение на нижней половине (табл. 8.2).

Сравнение опыта 8 с опытом 11, проведенным при тех же условиях, но со срезкой грунта на русловой форме перед бунами 3–5, показывает, что скоростное поле потока не претерпевает существенных изменений, за исключением площади срезки. Туда устремляется струя, имеющая максимальные скорости 5,62 м/с. При этом и общий уклон, и абсолютные отметки водной поверхности несколько выравниваются и приближаются к условиям опыта 5 с отсыпкой без бун.

На рис. 8.2 (б) показано поле поверхностных скоростей потока в опыте 2, соответствующее бытовому состоянию русла при расходе 0,3 %-ной обеспеченности. Как видно из этого рисунка, максимальные скорости в русле достигают 6,96 м/с при расширении русла ниже тастера № 1. Вдоль правого берега, выше тастера № 3, скорости потока составляют 6,04 м/с и далее колеблются в пределах 3,37–5,54 м/с.

В опыте 6 при наличии железнодорожной насыпи в русле, так же как при расходе 1 %-ной обеспеченности, не произошло ни заметного перераспределения скоростного поля, ни ощутимого изменения значений скоростей. Здесь также следует иметь в виду мгновенный характер фиксируемого в опыте скоростного поля, перемежаемость течений и пульсационный характер актуальных скоростей. Максимальные скорости вдоль насыпи в русле наблюдаются выше тастера № 3 и составляют 6,15 м/с, а в районе тастера № 7 достигают 6,56 м/с. На остальном протяжении вдоль дамбы скорости не превышают 5,00 м/с.

Как и в предыдущем случае с меньшим расходом воды, наличие насыпи в русле при расходе 0,3 %-ной обеспеченности вызывает незначительное изменение уклонов водной поверхности: в верхней части русла уклоны уменьшаются, а ниже тастера № 5 увеличиваются (табл. 8.2).



Как следует из табл. 8.3, при наличии насыпи в опыте 6 существенного изменения отметок водной поверхности по сравнению с бытовыми (опыт 2) не происходит.

Сравнение рисунка 8.2 (б) и 8.3 выявляет ту же качественную картину перестройки скоростного поля потока при наличии пяти бун в русле, а также при срезке грунта на русловой форме, что и в опытах с расходом воды 1 %-ной обеспеченности. При этом, естественно, абсолютные значения скоростей больше, чем в опытах с  $Q_{1\%}$ .

В опыте 9 скорости потока у оголовков дамб составляют 3,26–5,74 м/с, а вдоль насыпи между бунами 2 и 3 достигают 4,18 м/с. Срезка грунта в опыте 12 на русловой форме перед бунами 3–5 (рис. 8.3) вызывает незначительные изменения скоростного поля лишь на площади срезки, где скорости потока увеличиваются до 5,94 м/с (в среднем на 25 %).

В опытах 9 и 12 при сохранении на модели среднего уклона близким к условиям наличия в русле лишь ж/д насыпи наблюдается уменьшение уклона на участке русла выше тастера № 5 и увеличение уклона ниже тастера № 5.

Из табл. 8.3 следует, что в опытах 9 и 12 также не наблюдается существенных колебаний отметок водной поверхности по сравнению с бытовыми значениями.

Таким образом, анализ экспериментальных данных приводит к следующим выводам.

- Наличие железнодорожной насыпи в русле вдоль правого берега исследуемого участка р. Хани не приводит к заметной перестройке скоростного поля потока и увеличению скоростей по сравнению с бытовым состоянием. Однако абсолютные значения скоростей вдоль ж/д насыпи при расходах воды 0,3 %-ной обеспеченности будут достигать у верхней по течению части насыпи 6,15 м/с, а на участке изгиба в сужении русла, у нижней части отсыпки — 6,56 м/с. На остальном протяжении вдоль насыпи скорости потока не превышают 5,00 м/с.
- Устройство бун в русле, не вызывая ощутимого изменения скоростного поля потока в целом, значительно снижает значения скоростей вдоль ж/д насыпи.
- Срезка грунта в районе бун 3–5 вызывает лишь локальное перераспределение скоростного поля на площади срезки, а на скоростное поле потока вдоль насыпи и в районе оголовков дамб влияния не оказывает. Поэтому срезка грунта, предусмотренная в одном из вариантов проектных решений, нецелесообразна.
- Исходя из полученных скоростных полей потока, освещающих бытовые и проектные условия движения потока при расходах воды редкой повторяемости на исследуемом участке р. Хани, можно утверждать, что русловые деформации в проектных условиях будут и качественно, и количественно протекать так же, как и в бытовом состоянии русла, с незначительными местными эффектами размыва русла у оголовков бун.

Лабораторные исследования, освещая скоростное поле потока в русле р. Хани в бытовых и проектных условиях при расходах воды различной обеспеченности, позволили оценить эффективность различных вариантов проектных

решений и более уверенно выбрать окончательный вариант, удовлетворяющий условиям надежности и экономичности (конструктивные особенности железнодорожной насыпи, защитных бун, крупность камня на откосе насыпи и у оголовков бун и др.).

Результаты исследований на жесткой, неискаженной гидравлической модели дали ответы на основные вопросы проектировщиков. Поэтому выполнения запланированных в начале исследований опытов на деформируемой модели исследуемого участка р. Хани не понадобилось.

## **8.2. Исследования деформаций русла и кинематической структуры потока р. Селенги у с. Брянска с целью обеспечения нормальной работы выпуска сточных вод Селенгинского ЦКК**

Исследования по названной проблеме выполнялись в 1971–1973 гг. по договору с проектной организацией «Сибгипробум» в г. Иркутске [116].

По проекту Сибгипробума в п. Селенгинске был сооружен целлюлозно-картонный комбинат (СЦКК). В производственном цикле предполагалось использовать около 1 м<sup>3</sup>/с воды, забираемой из р. Селенги, и после отработки и очистки сбрасывать обратно в реку ниже по течению от водозабора.

Водозабор инфильтрационного типа частично был уже сооружен на одном из островов реки, а возврат отработанной и очищенной воды обратно в реку должен был осуществляться в виде рассеивающего выпуска, способного обеспечить 40-кратное разбавление сточных вод практически на участке своего размещения. Такое жесткое требование было вызвано тем, что Селенга является главной омулевой рекой Байкала и рыба, идущая на нерест или скатывающаяся мальком обратно в озеро, не должна подвергаться вредному воздействию веществ, содержащихся и в очищенных сточных водах комбината.

Коллектор сточных вод комбината уже сооружался и приближался к выбранному для их выпуска участку реки, когда строители и проектировщики обратили внимание на то, что берег поймы на этом участке интенсивно размывается и отступает по 10–12 м за сезон открытого русла.

Это обстоятельство и привело проектировщиков в ГГИ с просьбой оценить гидрологические условия на намеченном участке размещения рассеивающего выпуска и с учетом этих условий разработать рекомендации, направленные на обеспечение нормальной, бесперебойной работы сооружения в многолетнем разрезе.

### **8.2.1. Особенности взаимодействия рассеивающего выпуска сточных вод с водным объектом**

Главная функция рассеивающего выпуска как сооружения, состоит в том, чтобы быстрее и как можно сильнее разбавить речной водой сбрасываемые в водоток сточные воды. Возможности самой реки в этом отношении заключены

в ее турбулентности, но могут быть существенно увеличены, если сбрасываемые сточные воды рассредоточить в пределах некоторой ширины речного потока. Именно эту функцию и выполняет рассеивающий выпуск, представляющий собою уложенную в поперечную траншею на дне реки трубу довольно большого диаметра, на которой с некоторым шагом установлены вертикально и с некоторым разворотом по течению в верхней части рассеивающие оголовки меньшего диаметра, выводящие сточные воды в речной поток.

Таким образом, назначение рассеивающего выпуска и его конструкция определяют необходимость выполнения следующих двух условий: с одной стороны, сооружение должно быть размещено на достаточно хорошо обводненном участке реки во все фазы гидрологического режима водотока, а, с другой стороны, на участке размещения рассеивающего выпуска не должно быть значительных деформаций дна и берегов, способных вывести его из строя. Размыв дна и берега может привести к обнажению коллектора, вибрации и разрыву его потоком, а повышение поверхности дна может вызвать погребение рассеивающих оголовков под слоем речных наносов и их закупорку.

Очевидно, что выполнение этих двух условий сопряжено с определенными трудностями, поскольку сами условия оказываются по существу взаимоисключающими.

### **8.2.2. Характеристики режима стока воды и морфологии русла рассматриваемого участка р. Селенги**

По характеру водного режима Селенга относится к дальневосточному типу, для которого основной составляющей в формировании максимальных расходов воды, высших годовых уровней и основной части объема годового стока являются муссонные дожди летне-осеннего периода годового цикла.

Весеннее половодье и по высоте уровня, и, особенно, по объему стока за редкими исключениями ниже летне-осеннего паводка.

Подъем уровня воды при паводке 1,0 % обеспеченности над уровнем зимней межени 95%-ной обеспеченности составляет около 6,0 м. Среднегодовое расходу воды составляют: в феврале 78,2 м<sup>3</sup>/с, в мае 1597 м<sup>3</sup>/с, в августе 2080 м<sup>3</sup>/с. Расход воды 1,0 %-ной обеспеченности превышает 8500 м<sup>3</sup>/с.

К особенностям режима стока воды относятся: отсутствие четко выраженной летней межени, прерываемой волнами дождевых паводков разной высоты, и осенние подъемы уровня воды в конце октября — начале ноября, вызываемые зажорно-заторными явлениями и достигающие 2 м.

Среднегодовая мутность воды составляет 100 г/м<sup>3</sup>, максимальная — 1300 г/м<sup>3</sup>, минимальная (в зимнюю межень) — 10 г/м<sup>3</sup>. Река транспортирует много и речных наносов, о чем можно судить по интенсивным переформированиям русла.

Уклоны потока в целом значительны и варьируют (согласно суточным наблюдениям на водомерных постах) от 0,00027 до 0,00044.

Скорости течения определяются уклоном и глубиной (т. е. уровнем воды) потока: зимой они минимальны (до 0,3 м/с), в периоды паводков достигают 2,0–3,0 м/с.



Рис. 8.4. Схема исследуемого участка р. Селенги:

- 1 – номер излучины; 2 – номер пляжа; 3 – участки размыва берега, обнаруженные в июле 1972 г.;  
 4 – выход коренных пород; 5 – галечно-песчаные отмели; 6 – положение фарватера до паводка 1971 г.;  
 7 – положение фарватера после паводка 1971 г.; 8 – участки неизменного положения фарватера

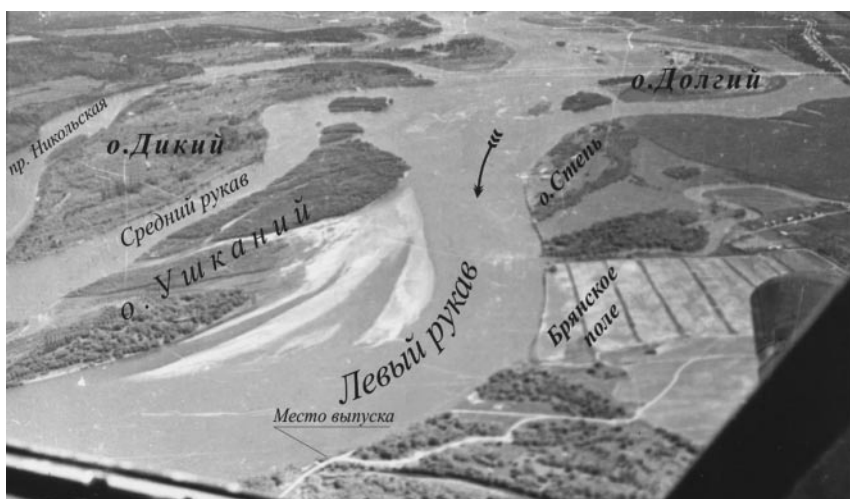


Рис. 8.5. Вид исследуемого участка р. Селенги из кабины самолета АН-2

На рассматриваемом участке река протекает в широкой долине (до 7,0 км), преимущественно с левобережной поймой. Русло представляет собой ряд смежных расширений (шириной до 4,3 км и длиной до 7,0 км) и сужений (шириной 0,7–1,5 км — длиной 0,5–1,0 км).

Расширения русла заполнены многочисленными островами и осередками, разделенными между собой рукавами и протоками (рис. 8.4). Общий вид исследуемого участка реки, зафиксированный летом 1971 г. из кабины самолета АН-2, приведен на рис. 8.5. В левом рукаве реки, вблизи водомерного поста Сибгипробума, предполагается устройство рассеивающего выпуска сточных вод СЦКК.

### 8.2.3. Методика исследований

Особенности гидрологического режима и морфомологии русла с учетом специфики рассеивающего выпуска сточных вод предопределили в совокупности методику решения поставленной Заказчиком задачи: всесторонний анализ имеющейся фондовой и опубликованной информации по рассматриваемому участку реки должен сочетаться с натурными наблюдениями и измерениями и с гидравлическим моделированием участка реки, в ходе которого могут быть восполнены с любой полнотой и детальностью недостающие натурные сведения.

Те же обстоятельства предопределили и границы участка реки, подлежащего натурному обследованию и последующему воспроизведению на гидравлической модели в Русловой лаборатории ГГИ. Этот участок включает полностью верхнее (по течению) расширение русла от села Никольского до приверха о. Залуцкого и составляет по протяженности около 10 км (рис. 8.4).

В пределах этого участка реки были выполнены наблюдения и измерения характеристик потока и русла в течение летне-осеннего сезона 1971 г. и летнего сезона 1972 г. Натурные исследования включали следующие виды работ:

- планово-высотную русловую съемку участка реки протяженностью около 8 км;
- наблюдения над уровнем воды;
- измерение расхода воды в рукавах и протоках (на 22 гидростворах);
- измерение расхода взвешенных наносов в рукавах и протоках;
- измерение уклонов поверхности потока на 8-километровом участке реки;
- эхолотирование дна по продольным створам;
- измерение скорости течения на вертикалях, приуроченных к гребням, подвальям и напорным склонам наиболее четко выраженных песчано-гравелистых гряд;
- измерение поверхностных скоростей течения поплавками;
- отбор проб донных отложений на скоростных вертикалях с последующим гранулометрическим анализом;
- картирование донных отложений в пределах всего участка и более детальное — в левом рукаве реки, между о. Ушканий и левым пойменным берегом;
- детальное морфологическое обследование участка;
- наблюдения за размывом берегов на участках интенсивных плановых переформирований русла;
- аэрофотосъемку участка;
- аэрогидрометрию в основных рукавах и крупных протоках.

В течение 1971–1972 гг. были выполнены 3 русловые съемки всего участка, измерено 40 расходов воды, 13 расходов взвешенных наносов, проведено 4 серии измерений уклонов потока, 5 серий эхолотирования дна по продольным створам, 1 серия картирования донных отложений с отбором проб в 180 точках русла, 4 аэрофотосъемки всего участка, 7 серий аэрогидрометрических измерений поверхностных скоростей, 1 серия наземных поплавочных измерений скоростей

течения, 1 серия измерения скоростей течения над песчано-гравелистыми грядами, 2 морфологических обследования всего участка реки. Велись наблюдения за размывом пойменных берегов на 5 участках и в течение всего периода 1971–1972 гг. с небольшим перерывом в зимнее время выполнялись наблюдения за уровнем воды по водомерному посту Сибгипробума (рис. 8.4).

#### **8.2.4. Особенности гидравлики речного потока и руслового процесса**

Анализ полученных в ходе натурных работ 1971–1972 гг. материалов в совокупности с режимными и фондовыми материалами по гидрологии, геологии и картографии описываемого региона (и, в частности, с использованием исследований инженера А.К. Старицкого, выполненных в середине 1910-х гг. [224]) позволил существенно дополнить приведенные в п. 8.2.2 особенности гидрологического режима, морфологии русла и русловых деформаций.

Река Селенга имеет довольно сложный режим стока, характеризующийся относительно устойчивой по срокам, но существенно изменчивой по величине уровня зимней меженью и сильно меняющимися и по срокам и по величине уровня весенним половодьем, летней меженью и летне-осенними дождевыми паводками.

Вместе с тем, при такой явной неупорядоченности режима стока некоторая определенность проявляется в приуроченности наибольших расходов воды и наивысших годовых уровней к летне-осенним паводкам. Уровни воды обеспеченностью менее 5 % за период с 1934 г. по 1972 г. наблюдались дважды: в 1936 г. и в 1971 г., т. е. с интервалом в 35 лет. Высшим уровням воды 1 % и 2 %-ной обеспеченности соответствуют абсолютные отметки 471,48 м и 471,10 м, а низшему зимнему уровню воды 95 %-ной обеспеченности — 465,37 м (по водомерному посту Сибгипробума). Расходы воды 1 % и 2 %-ной обеспеченности соответственно составляют 8530 м<sup>3</sup>/с и 7500 м<sup>3</sup>/с, а зимний среднесуточный расход воды 95 %-ной обеспеченности равен 63 м<sup>3</sup>/с.

Русловые деформации на исследуемом участке р. Селенги развиваются по сложной схеме пойменной и русловой многоруканности и незавершенного меандрирования (рис. 8.4). Русло характеризуется сложной морфологией и интенсивными плано-высотными переформированиями. Темпы плановых деформаций в ходе развития излучин в рукавах и протоках реки составляют в среднем 10–12 м/год и достигают 21 м/год. Излучины спрямляются обычно на ранних стадиях их развития путем отторжения пляжа при выпуклом берегу. Спряменение излучин происходит в период прохождения наиболее высоких паводков. Изменчивость русла в плане за многолетний период значительна; ширина пояса меандрирования достигает 3,5 км (по сопоставлению лоцманской карты 1907 г. с картами 1950-х гг., а также с аэрофотосъемками).

Интенсивность и величина высотных деформаций определяется движущимися в русле крупными грядами (мезоформами руслового рельефа), которые, обсыхая в меженный период, формируют типичный осередковый рельеф русла. Скорость сползания крупных гряд и осередков варьирует в больших пределах: от 27 м/год до 470 м/год. Высота мезоформ составляет в среднем 2–3 м и достигает 5 м (за период паводка 1971 г. в результате перемещения мезоформы

в левом рукаве реки отметки дна вблизи устья протоки Чернушки изменились с 463,00 м абс. до 467,85 м абс.).

Несмотря на значительные высотные деформации, их развитие в глубину ограничено близко расположенным базальным слоем (толщей гравийно-галечных аллювиальных отложений с включениями валунов). По данным лотции 1907 г., минимальная отметка русла у о. Залуцкий составляла 458,76 м абс., в 1971 г., на подъеме паводка в плесовой ложине правого рукава у о. Залуцкий зафиксирована минимальная отметка 459,60 м абс.

Расход воды больших рукавов реки формируется обычно несколькими потоками (один-два основных и несколько второстепенных проток). Поэтому, несмотря на интенсивные высотные переформирования русла, вызывающие значительное обмеление отдельных участков (в основном входе в левый рукав, например, отметки дна после паводка 1971 г. повысились на 1,5–3,0 м), суммарный расход воды рукава вследствие разработки других питающих его проток и образования новых претерпел незначительные изменения. Существенные изменения в распределении расхода воды по рукавам наблюдаются лишь в период межени, когда влияние местных переформирований русла на входных участках становится значительным.

Для данного типа руслового процесса характерна цикличность в развитии основных рукавов реки, проявляющаяся в периодическом переходе основного потока из одного рукава в другой (левый и правый рукава у о. Залуцкий, левый рукав у о. Долгий и Никольская протока, левый рукав ниже о. Долгий и средний рукав) (рис. 8.6). Переход основного потока из одного рукава в другой не скоротечен, а совершается в течение ряда лет, но начинается процесс перехода с образования

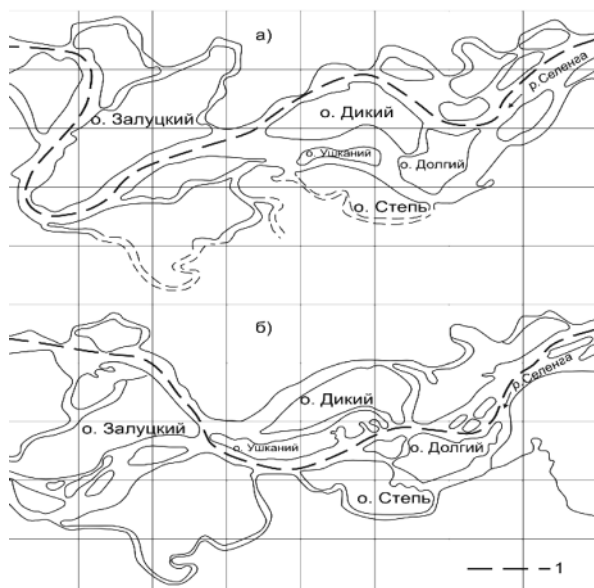


Рис. 8.6. Сопоставление плана участка Селенги за: а – 1907 г.; б – 1957 г.; 1 – положение фарватера

спрямляющего излучину тракта, когда вход высококинетичного потока в сильно искривленную верхнюю ветвь излучины становится затруднительным. Неудобные для речного потока плановые очертания входного участка усугубляются еще и интенсивным его обмелением, вызванным образованием зон с малыми скоростями потока у выпуклого берега, способствующих аккумуляции наносов.

При довольно широком общем поясе меандрирования отдельные участки представлены сравнительно узким и даже однорукавным руслом и сохраняются в таком состоянии длительное время (участок русла вблизи с. Никольского — мыс «Мандруй», участок русла между ухвостьем о. Ушканий и приверхом о. Залуцкий). Это так называемые фиксированные точки местности, вокруг которых совершается разворот излучин, они часто приурочены к выходам на поверхность коренных пород.

В ходе полевых работ 1971—1972 гг. был отслежен ряд явлений, представляющих безусловный интерес в приложении их к русловому процессу. Например,



Рис. 8.7. Размыв пойменного берега:  
а — начальная стадия размыва пойменного берега (вид по течению);  
б — вторая стадия размыва пойменного берега (вид по течению)



размыв потоком вогнутого пойменного берега совершается путем утраты связи достаточно большого объема грунта поймы с основным массивом (начальная стадия, рис. 8.7 (а)) и последующего обрушения его в русло (вторая стадия, рис. 8.7 (б)), где он уже и размывается потоком.

Или, например, интенсивный размыв потоком некоторых участков берега в начальной фазе подъема паводка сильно ослабевает или даже прекращается с ростом расхода и повышением уровня воды, что происходит вследствие перестройки макроструктуры речного потока. С возрастанием кинетичности потока его стрежень стремится к спрямлению, в результате чего у вогнутых берегов излучин образуются зоны с малыми скоростями течений и водоворотные области, способствующие аккумуляции наносов, а у выпуклых берегов, над пляжами, формируются течения с большими скоростями, способствующие размыву прикорневых участков пляжей и последующему их отторжению.

Средний уклон потока по наблюдениям за уровнями воды на водпостах Никольское и Сибгипробума составил 0,00038, наибольший — 0,00044 (26.04.1972 г.), наименьший — 0,00027 (07.08.1971 г.). Величина уклона между водпостами в среднем уменьшается с ростом уровня и становится более устойчивой, нежели при низких уровнях воды. Величины местных уклонов значительно отличаются (в 1,5–2,0 раза в сторону увеличения и в 2,0–7,0 раз в сторону уменьшения) от средних значений и зависят от уровня воды и морфологической ситуации на конкретных участках реки.

Скорости течения характеризуются значительной изменчивостью, как по величине, так и по направлению, в зависимости от уровня воды и морфологии конкретного участка реки. В левом рукаве реки, куда выведен коллектор сточных вод, скорость течения вблизи левого берега при меженном уровне составляла 0,8 м/с, а при повышении уровня на 3,0 м достигала 2,2 м/с. В этих же условиях у приверха о. Залуцкий скорость течения составляла 1,0 м/с и 3,0 м/с соответственно.

На участках образовавшихся спрямлений излучин скорости течения всегда значительны. Так, в протоке Верхней в устье о. Долгий скорости течения даже в летнюю межень составляют 2,3 м/с.

В основных рукавах реки скорости течения при высоких уровнях воды превышают 2,5 м/с.

Структура скоростного поля в левом рукаве реки такова, что большая часть его расхода попадает в правый рукав у о. Залуцкий, тем самым повышая его водность. Вместе с тем входной участок в левый рукав в период зимней межени даже промерзает полностью, и ничтожный расход в нем формируется путем фильтрации через толщу аллювиальных отложений.

Измеренные расходы воды в основных рукавах распределяются следующим образом: Никольская протока — около 10 %, средний и левый рукава реки — примерно по 45 %, т. е. два основных рукава равноценны по водности, но эта ситуация может существенно измениться в любую сторону.

Совокупное проявление всех этих процессов привело к формированию сложного в целом типа руслового процесса, основным морфологическим фоном которого является пойменная многорукавность в сочетании с развитием

меандрирования и образованием осередков в отдельных рукавах и со сменой лидирующих по водности рукавов реки в многолетнем разрезе [116].

Уже из анализа опубликованных гидрологических, геологических и картографических материалов и материалов полевых работ 1971–1972 гг. следует вывод о невозможности нормального функционирования на длительное время глубинного рассеивающего выпуска. Устройство глубинного рассеивающего выпуска с учетом перемещающихся в левом рукаве реки мезоформ-осередков вынуждало закладывать в конструкцию рассеивающие оголовки (гусаки) высотой более 5 м. Но даже эта исключительная мера не обеспечивала нормальной работы сооружения, поскольку столь высокие оголовки оказывались выше зимних уровней воды, и поэтому могли быть разрушены при подвижках ледяного покрова в зимнее время или в процессе весеннего ледохода.

Поиски других вариантов местоположения рассеивающего выпуска, его конструкции, а также детальное изучение распределения расхода воды по рукавам, кинематической структуры потока с оценкой эффективности некоторых мероприятий, направленных на обеспечение требуемой минимальной водности и на стабилизацию русла в плановом отношении, осуществлялись экспериментальным путем в лабораторных гидравлических лотках, на пространственной гидравлической модели и на малой реке Юля-Йоки, протекающей вблизи Русловой лаборатории ГГИ.

## **8.2.5. Экспериментальные исследования по обоснованию оптимального варианта проекта рассеивающего выпуска сточных вод СЦКК**

### **8.2.5.1. Исследования на гидравлической пространственной модели участка р. Селенги**

На гидравлической модели был воспроизведен участок реки протяженностью около 6 км от с. Никольского до приверха о. Залуцкий (рис. 8.4). Масштабы жесткой, бетонной модели составляли: горизонтальный 1:250 и вертикальный 1:50. Рельеф модели воспроизводился по плану русловой съемки июля 1971 г., т. е. по предпаводочному состоянию русла. Общий вид модели представлен на рис. 8.8.

Растительность островов и берегов в пределах модели схематизировалась металлической (латунной и дюралюминиевой) стружкой, капроновой путаной нитью и гравийно-щебеночной смесью. Для достижения соответствия осредненных уклонов и глубин на модели и в натуре при заданных расходах воды дополнительная шероховатость русла создавалась мелким и средним гравием.

На модели обозначены уклонные точки и гидростворы, в которых выполнялись измерения уровней воды и скоростей течения в натуральных условиях.

Суммарный расход воды на входном участке модели задавался двумя водомерными баками, в основном рукаве и в левой протоке. Настройка режима течения достигалась концевыми водосливными щитами, установленными в левом и правом рукавах реки у о. Залуцкий. Скорости течения измерялись в основных гидростворах микровертушками конструкции И.И. Херхеулидзе и П.Н. Бурцева и поверхностными поплавками на всей остальной площади модели. Таким образом был получен большой экспериментальный материал, детально освещающий как



Рис. 8.8. Общий вид гидравлической модели р. Селенги (вид против течения)

осредненные гидравлические характеристики, так и их локальные значения при разных расходах воды и, соответственно, разных наполнениях русла.

Тарировка модели производилась по пяти сериям измеренных в натуре расходов воды, трем сериям уклонов потока и одной серии измерения поверхностных скоростей течения аэрометодом.

Ошибка измерения перепадов уровня воды в соответственных уклонных пунктах составила в среднем из трех серий экспериментов около 7 % (% от натурального перепада).

Сопоставление модельных и натуральных поверхностных скоростей течения на трех участках левого рукава ниже начала протоки Морашовки, измеренных в натуре аэрометодом, выявило несоответствие значений, не превышающее 10 % от натуральных скоростей в 12-и из 14-и случаев.

Модель проверялась на соответствие натуре еще и по трактам перемещения русловых наносов и по образованию аккумулятивных форм на спаде паводка. Для этого на начальном участке модели подавался песок крупностью 0,5 мм при расходе воды, соответствующем пику паводка. В этом случае весь подаваемый песок перемещался вниз по течению в бесструктурной форме или в виде небольших гряд, не образуя аккумулятивных форм. Затем расход воды уменьшался до значений, соответствующих концу спада паводка. В этом случае на отдельных участках, соответствующих натурным зонам аккумуляции наносов, возникали аккумулятивные образования.

Таким образом, модель выявила хорошее соответствие натурному объекту как по гидравлическим характеристикам, так и по морфодинамическим признакам в их качественном проявлении.

На гидравлической модели были выполнены 3 серии экспериментов, предусматривавших:

- определение расхода воды в левом рукаве в разных вариантах перекрытия водоподводящих трактов;

- определение величин скоростей течения и особенностей структуры течений при разных расходах воды;
- определение расходов воды и кинематической структуры потока при устройстве инженерных сооружений в левом рукаве реки.

В табл. 8.4 приведены данные о распределении расхода воды по рукавам при разных вариантах перекрытия входных участков в левый рукав и разных значениях расхода воды в реке.

**Таблица 8.4. Распределение расхода воды по рукавам русла при разных значениях расхода воды в реке**

Варианты перекрытия входов в левый рукав	Суммарный расход воды в реке, м <sup>3</sup> /с	Расход воды в левом рукаве		
		м <sup>3</sup> /с	в % от суммарного расхода воды	в % от расхода левого рукава в предпаводочной ситуации
Естественный режим, предпаводочная ситуация 1971 г.	2060	1000	48,4	100
	2690	1250	46,5	100
	6400	2840	44,3	100
Разработаны протоки в устье о. Долгий (послепаводочная ситуация 1971 г.)	2060	1070	51,8	107
	2690	1360	50,5	109
	6400	2900	45,3	102
Перекрыт основной вход в левый рукав	2060	876	42,6	87,6
	2690	1190	44,2	95,2
	6400	2770	44,0	97,4
Перекрыт вход в протоку Саидиху	2060	1070	51,8	107
	2690	1260	46,8	101
	6400	2990	47,3	105
Перекрыт основной вход в левый рукав и вход в протоку Саидиху	2060	840	40,8	84,0
	2690	1050	39,1	84,0
	6400	2710	42,3	95,3

Из табл. 8.4 видно, что условия на входных участках оказывают большее влияние на расход воды в левом рукаве при меньших значениях общего расхода воды и, соответственно, меньшее влияние — при больших значениях общего расхода воды. Это обстоятельство объясняется тем, что при больших расходах воды все устье о. Долгий затапливается на значительную величину и влияние локального перекрытия становится менее существенным, чем при меньших значениях общего расхода воды в реке.

Обнаруженное увеличение расхода воды левого рукава при перекрытии протоки Саидихи объясняется перестройкой скоростного поля потока в основном русле, приводящей к увеличению расходов воды в протоках устья о. Долгий и основного входа в левый рукав.

Наибольшее уменьшение расходов воды левого рукава происходит при одновременном перекрытии его основного входа и протоки Саидиха (до 16 %), но

даже в этом случае при большом общем расходе воды в реке это уменьшение составляет всего 4,7 %.

Таким образом, эксперименты на гидравлической модели приводят к выводу о достаточной водности левого рукава реки при разных вариантах возможного ухудшения морфологической ситуации на входных участках в него. Сложная ситуация остается только на период зимней межени, когда среднемесячный расход воды 95 %-ной обеспеченности составляет всего 69 м<sup>3</sup>/с. На этот случай можно предусмотреть разработку подпитывающей прорези по руслу Нижней протоки в устье о. Долгий (рис. 8.9).

Размеры прорези подобраны экспериментально такими, при которых из общего расхода воды в реке, равного 69 м<sup>3</sup>/с, в левый рукав реки поступает около 64 м<sup>3</sup>/с, т. е. вполне достаточный для 40-кратного разбавления сбрасываемых в левый рукав промстоков.

Заметим, что выбор левого рукава реки для размещения в нем рассеивающего выпуска промстоков СЦКК сделан не случайно, а после обстоятельного рассмотрения других вариантов: в устье о. Долгий, в среднем или правом рукавах реки, в левом или правом рукавах реки на о. Залуцкий. Все эти варианты оказались неподходящими либо по морфологическим, либо по гидравлическим и гидрологическим условиям, либо из-за неудобства эксплуатации и обслуживания (например, при размещении сооружения на островах приходится преодолевать водные тракты).

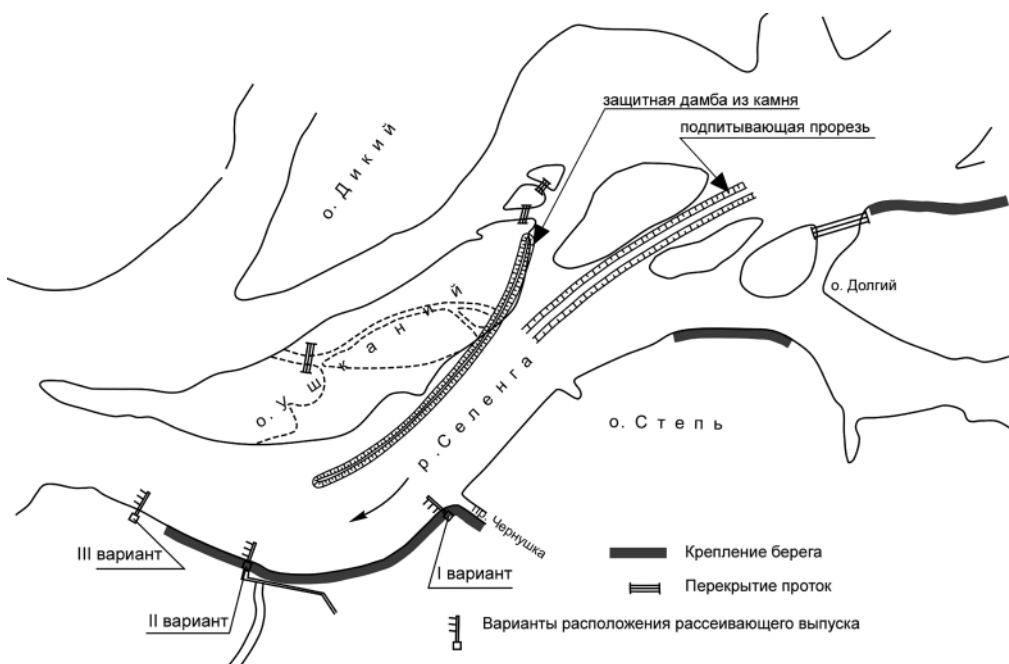


Рис. 8.9. Схема мероприятий (подпитывающая прорезь, берегозащитные сооружения, перекрытие проток) для обеспечения требуемой водности при разных вариантах размещения рассеивающего выпуска в левом рукаве реки

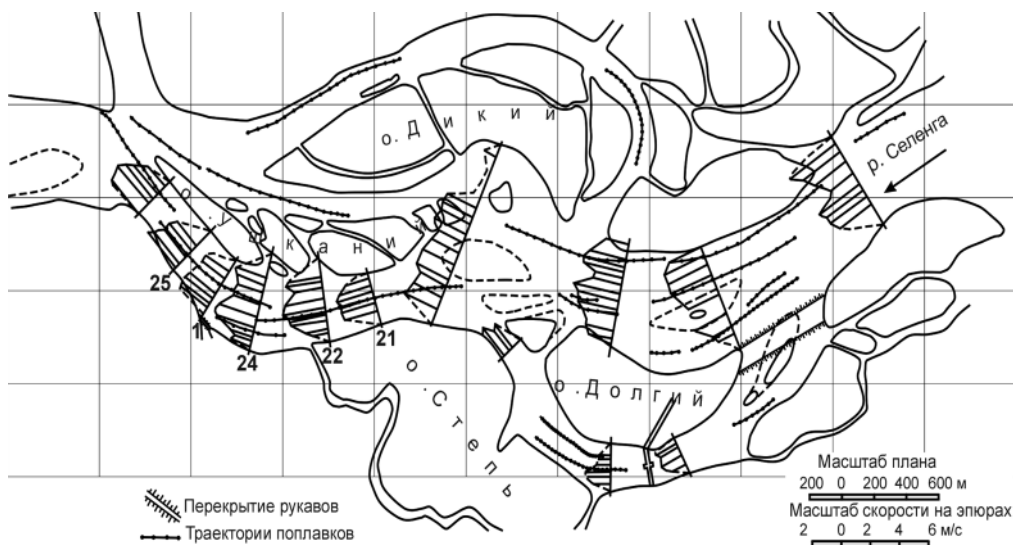


Рис. 8.10. Поле поверхностных скоростей при регулировании русла Селенги перекрытием протоки Саидиха

Вторая группа экспериментов предусматривала исследование кинематической структуры речного потока при разных расходах воды и разных морфологических ситуациях на входных участках в левый рукав. Результаты представлены траекториями поверхностных поплавков и эпюрами распределения поверхностных скоростей по ширине реки в 25 створах. В качестве примера на рис. 8.10 приведена картина поверхностных скоростей при расходе воды  $6400 \text{ м}^3/\text{с}$  и перекрытом входе в протоку Саидиха. На этом рисунке легко обнаруживается влияние макроморфологии русла на распределение скоростей течения.

Зависимость структуры поля поверхностных скоростей от величины общего расхода воды в реке представлена в табл. 8.5 применительно к левому рукаву реки (номера створов в табл. 8.5 показаны на рис. 8.10).

В табл. 8.5 видно, как изменяется местоположение зоны потока с максимальными поверхностными скоростями при возрастании расхода воды. С ростом кинетичности поток хуже вписывается в изгибы русла и его стрежень спрямляется, приближаясь к выпуклым берегам (пляжам).

Анализ результатов модельных экспериментов по распределению расходов воды по рукавам и по определению кинематической структуры речного потока на разных участках и при разных наполнениях русла послужил основой для разработки комплекса мер, направленных на стабилизацию русла левого рукава и подходов к нему на многолетнюю перспективу и обеспечение достаточной водности в нем. Эти мероприятия включают следующее (рис. 8.9):

- защиту каменной наброской нижней части правого берега о. Долгий, на участке от нижнего резервуара инфильтрационного водозабора до истока протоки Верхней, протяженность около 400 м;

**Таблица 8.5. Структура поля поверхностных скоростей потока на участке проектируемого рассеивающего выпуска в зависимости от величины расхода воды в реке**

Расход воды, м <sup>3</sup> /с	СТВОРЫ									
	21		22		24		1		25	
	Скорость, м/с	Расстояние от левого берега, м	Скорость, м/с	Расстояние от левого берега, м	Скорость, м/с	Расстояние от левого берега, м	Скорость, м/с	Расстояние от левого берега, м	Скорость, м/с	Расстояние от левого берега, м
2060	2,7	210	3,1	130	2,8	50	2,6	15	3,0	15
2690	2,2	120	2,7	130	2,5	50	2,2	30	2,4	20
6400	2,6	50	2,7	100	3,0	200	2,7	75	2,0	50
7300	2,8	50	2,9	185	2,9	250	2,7	90	2,9	150

- перекрытие фильтрующей дамбой протоки Верхней в устье о. Долгий или защиту правого берега о. Степь каменной отсыпкой в поперечных сечениях устьев проток Верхней и Средней. Протяженность отсыпки 400 м;
- перекрытие фильтрующими дамбами поперечных проток в приверхе и в средней части о. Ушканий;
- защиту верхней половины левого берега о. Ушканий фильтрующей дамбой длиной 1050 м;
- защиту левого берега левого рукава каменной наброской от протоки Чернушки на 1050 м вниз по течению;
- устройство подпитывающей прорези в протоке Нижней устья о. Долгий для обеспечения требуемой водности в левом рукаве в зимний период (длина — около 1,0 км, ширина — 46,0 м, отметки дна начала и конца прорези — 466,0 и 465,5 м абс. соответственно).

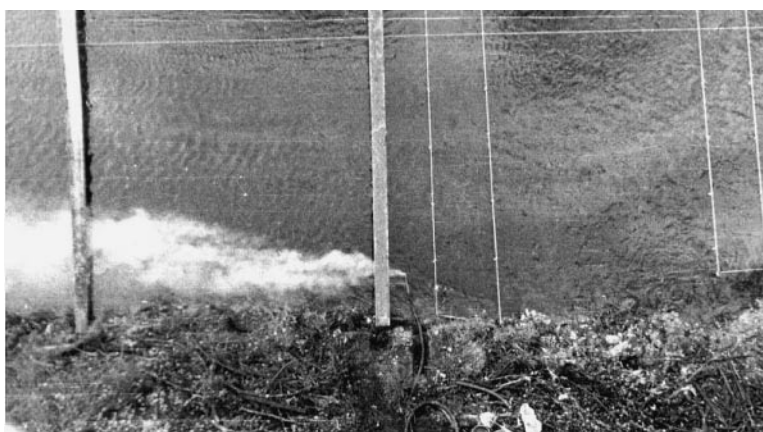
### 8.2.5.2. Исследование разбавления сточных вод на участке р. Юля-Йоки

Эксперименты с разбавлением сточных вод выполнялись на одном из участков реки Юля-Йоки, в отношении гидравлично-морфологических характеристик представляющем собой модель левого рукава Селенги в масштабе 1:20.

Расход воды в Юля-Йоки на момент экспериментов составил 0,3 м<sup>3</sup>/с, т. е. соответствовал 540 м<sup>3</sup>/с левого рукава Селенги.

В эксперименте оценивалось разбавление имитатора промстоков — раствора метиленового синего красителя, концентрация проб которого, отобранных в разных точках потока, измерялась концентрационным калориметром КОЛ-1М.

В эксперименте испытывались два варианта глубинного выпуска: одноточечный выпуск и шеститочечный выпуск, рассредотачивающий общий расход «промстоков» на половине ширины межженного русла. На рис. 8.11 показаны



а)



б)

Рис. 8.11. Шлейфы распространения мелового раствора:  
а – одноточечного выпуска индикатора; б – 6-точечного выпуска индикатора

шлейфы распространения мелового раствора (для получения приемлемого контраста) вниз по течению реки.

Пробы метиленового красителя, отобранные в 40 м ниже по течению от створа выпуска (800 м в натуре), показали превышение концентрации в одноточечном шлейфе над шеститочечным всего в 1,5 раза. Вместе с тем на меньших расстояниях от створа выпуска разница в концентрациях достигает 5–6-кратных значений. С учетом требований, предъявляемых водоохранными органами, предпочтение отдается многоточечному выпуску.

### 8.2.5.3. Экспериментальное исследование различных вариантов конструкции рассеивающего выпуска

Увеличить эффективность разбавления промстоков на малых расстояниях от створа выпуска можно не только числом рассеивающих оголовков, но и за счет их конструкции и способа введения в речной поток.



Исследовались три варианта конструкции оголовка и два варианта введения сточной струи в поток: поверхностный оголовок с вертикально падающей струей и с поддоном, установленным на глубине 1,4 м от поверхности воды; поверхностный оголовок с вертикально падающей струей; глубинный оголовок конструкции Сибгипробума со струей, вытекающей по течению речного потока.

Эксперименты выполнялись в 30-метровом лотке шириной 2,0 м. Гидравлические условия эксперимента соответствовали условиям меженной ситуации в реке (глубина воды 3 м, скорость течения 0,25 м/с). Скорость истечения струи из оголовков составляла в пересчете на натуру 6–7 м/с. В качестве имитатора промстоков использовалась вода, окрашенная нигрозином в черный цвет. Шлейфы «промстоков» фотографировались в вертикальной и в горизонтальной плоскостях.

Результаты экспериментов приведены на рис. 8.12, на котором видно, что наиболее эффективное разбавление (расширение струи на первых 5–10 м) достигается поверхностным выпуском с поддоном. Несколько меньший эффект достигается поверхностным выпуском без поддона и существенно меньший — глубинным выпуском конструкции Сибгипробума.

Построенный в левом рукаве Селенги летом 1973 г. глубинный рассеивающий выпуск просуществовал недолго; осенним паводком 2 %-ной обеспеченности он был разрушен (рис. 8.13).

По предложению ГГИ был принят к реализации простой вариант поверхностного выпуска, и в 1974 г. такой выпуск промстоков Селенгинского ЦКК был сооружен в левом рукаве реки. Вид действующего сооружения приведен на рис. 8.14. Коллектор промстоков покоится на ферме, закрепленной одним концом на береговом пилоне и удерживаемой вантами. На коллекторе размещено 15 рассеивающих оголовков, распределяющих общий расход сточных вод в 50-метровой полосе от левого берега.

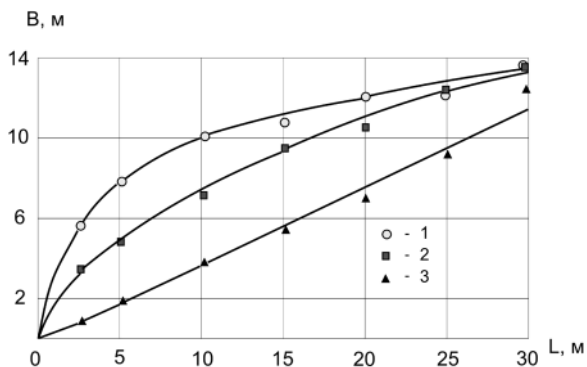


Рис. 8.12. Изменение ширины струи по длине потока при разных вариантах конструкции рассеивающего оголовка: 1 — надводный выпуск с вертикально падающей струей и поддоном на глубине 1,4 м; 2 — надводный выпуск с вертикально падающей струей; 3 — глубинный рассеивающий выпуск с ориентацией струи по течению



Рис. 8.13. Глубинный рассеивающий выпуск, разрушенный паводком 1973 г. (вид по течению)



Рис. 8.14. Поверхностный рассеивающий выпуск промстоков Селенгинского ЦКК в левом рукаве Селенги (течение слева направо)

Поверхностный способ выведения сточных вод в водоток был защищен авторским свидетельством № 649797, 1974 г.; он выгодно отличается от традиционного глубинного рассеивающего выпуска тем, что:

- не подвержен негативному воздействию речного потока, речных наносов, деформаций русла и ледовых явлений;
- удобен в эксплуатации, допускает регулировку локальных струй в пределах фронта рассредоточения общего расхода промстоков;
- легко доступен для контролирующих органов;
- интенсивно насыщает речную воду кислородом.

Последнее обстоятельство воочию проявилось на Селенге осенью 1974 г., когда омуль поднимался на нерест в основном (и в отличие от прошлых лет) по левому рукаву реки, а в зимний период сократились заморные ситуации на нижележащем участке реки.

#### **8.2.5.4. Предложения по нормализации работы инфильтрационного водозабора на о. Долгий**

Восемь колодцев инфильтрационного водозабора размещены равномерно вдоль правого берега о. Долгий от приверха к ухвостью примерно в 30–80 м от бровки. Правый берег о. Долгий на всем протяжении был вогнутым и подмываемым, для его защиты от размыва отсыпан крупногабаритный рваный камень.

Летне-осенний паводок 1971 г. с максимальным расходом воды 3 %-ной обеспеченности вызвал существенные переформирования русла Селенги и в частности — отторжение периферийной части пляжа от левобережного пойменного массива, расположенного непосредственно выше по течению приверха о. Долгий и начала протоки Саидиха, и смещение отторженного фрагмента вниз по течению с перекрытием основного входа в протоку Саидиха и всей плесовой ложины вдоль правого берега о. Долгий.

Сложившаяся неблагоприятная гидравлично-морфологическая ситуация (по условиям подпитки инфильтрационных колодцев водозабора) существенно усугубилась после летне-осеннего паводка 1973 г., оказавшегося еще более значительным и по расходу воды, и по объему стока. Бывшая плесовая ложина у правого берега о. Долгий оказалась полностью погребенной под надвинувшимися на него песками, и урез воды на этом участке реки (а это и есть внешний контур снабжения водой колодцев водозабора) переместился на нижних участках примерно на 100 м в сторону русла, а у приверха острова — на 200 м. В связи с этим проблема защиты правого берега о. Долгий от размыва (в периоды высоких уровней воды) дополнилась необходимостью решения задачи возвращения контура питания инфильтрационных колодцев в прежнее положение (в периоды низких, меженных уровней воды).

Решение этой проблемы было осуществлено на гидравлической модели путем устройства вдоль правого вогнутого берега о. Долгий тупикового подпитывающего канала с низовым входом и с внешней ограждающей дамбой, незатопляемой при максимальных уровнях воды (рис. 8.15).

На модели были подобраны оптимальные параметры канала, обеспечивающие требуемый расход воды для водозабора и такие скорости течения, при которых русловые наносы, переносимые в основном русле реки, не попадают в канал.

Учитывая значительные переформирования многорукавного русла, происшедшие в ходе паводков 1971 и 1973 гг., была предусмотрена дамба, перекрывающая правобережный пойменный массив со всеми протоками и выходящая оголовком в основное русло реки на поперечном сечении несколько ниже по течению нижнего инфильтрационного колодца, рис. 8.15. Испытание этого предложения на модели показало, что при расходах воды, близких к 1 %-ной

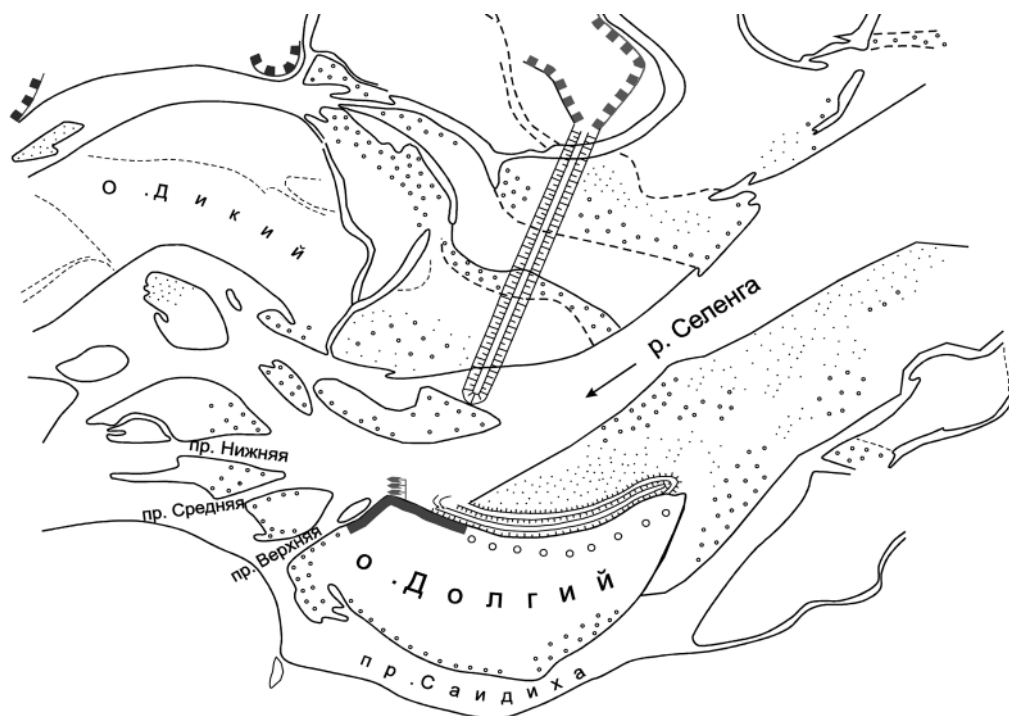


Рис. 8.15. Схема устройства подпитывающего канала и внешней ограждающей дамбы у о. Долгий

обеспеченности, весь речной поток, сосредоточенный между оголовком дамбы и правым берегом о. Долгий, достигает скоростей течения около 4,0 м/с, а после кальматации дамбы может достигнуть 5,5 м/с. Такие скорости течения могут вызвать существенные размывы как в русле основного рукава, так и на береговых участках, т. е. поток может разрушить и каменное крепление правого берега о. Долгий, и оголовок правобережной дамбы. Для исключения этих процессов регулирующую дамбу было предложено выполнить в траншейном варианте, создав искусственный местный базис эрозии на уровне отметок современной поймы и дна пересекаемых дамбой проток.

### 8.3. Регулирование русла Оби у Барнаула в связи с интенсивным хозяйственным использованием этого участка реки

На 25-километровом участке Оби в районе Барнаула размещены десятки различных объектов городского хозяйства, одни из которых испытывают на себе негативное воздействие гидрологических факторов, другие — будучи под влиянием реки, сами оказывают определенное влияние на речной поток, русло и пойму.

Обь в районе Барнаула — река с интенсивными планово-высотными преформированиями русла, что является основной причиной нарушения нормального функционирования тех или иных хозяйственных объектов и вызывает

необходимость принятия научно-обоснованных решений по их безопасной эксплуатации и инженерной защите [157].

В период 1960–1990 гг. Отдел русловых процессов ГГИ неоднократно привлекался руководством Барнаульского городского Совета и Алтайского края к решению наиболее острых водохозяйственных проблем, связанных с руслом и поймой Оби, в ходе разработки которых применялось гидравлическое моделирование отдельных объектов.

Приведем здесь наиболее значительные научно-производственные проработки ГГИ, в которых было задействовано гидравлическое моделирование, как один из составных инструментов решения той или иной задачи. Перечисленные ниже объекты частично показаны на рис. 8.16.

- Городской водозабор № 2 на Верхне-Ереснинской излучине.
- Городской водозабор № 1 на Верхне-Барнаульской (Нижне-Ереснинской) излучине.
- Правобережная опора ЛЭП-220 кВ на Верхне-Барнаульской излучине.
- Водные подходы к правобережному затону и поселку на о. Шубинский.
- Иловые площадки на правобережной пойме для сбора сточных вод поселка и промзоны на о. Шубинский.
- Коммунальный мост города в районе устья р. Барнаулки (через о. Помазкин).
- Барнаульский грузовой порт в затоне о. Отдыха (защита правого берега о. Отдыха от размыва).
- Правобережная пойма между коммунальным мостом и железной дорогой, планируемая под городскую застройку.
- Железнодорожный мост.
- Водозабор меланжевого комбината.
- Золоотвалы Барнаульской ТЭЦ-3.
- Водозабор картонно-руберойдного завода (КРЗ) г. Ново-Алтайска.
- Рассеивающие выпуски сточных вод г. Барнаула.
- Водозабор завода № 521.
- Русловые карьеры для добычи ПГС на строительные нужды.
- Обеспечение нормальных условий судоходства.

Некоторые из перечисленных объектов по отношению к реке и другим объектам находятся в противоположных интересах. Например, водозабору № 1 нужна хорошая обводненность и скорости течения, достаточные для транзитного транспортирования наносов, а опоре ЛЭП-220 кВ, расположенной в этом же створе реки, но у противоположенного берега, желательны небольшие скорости течения, способствующие аккумуляции наносов. Или, например, для о. Отдыха дальнейшее развитие Ново-Барнаульской излучины способствует увеличению пляжа, являющегося зоной отдыха горожан, но нежелательно для правобережного пойменного массива, предусмотренного под городскую застройку, и для железнодорожного моста — развитие излучины приводит к уменьшению площади правобережной поймы и вызывает еще большую асимметрию в форме подмостового поперечного профиля русла, что может создать угрозу устойчивости левобережных мостовых опор.

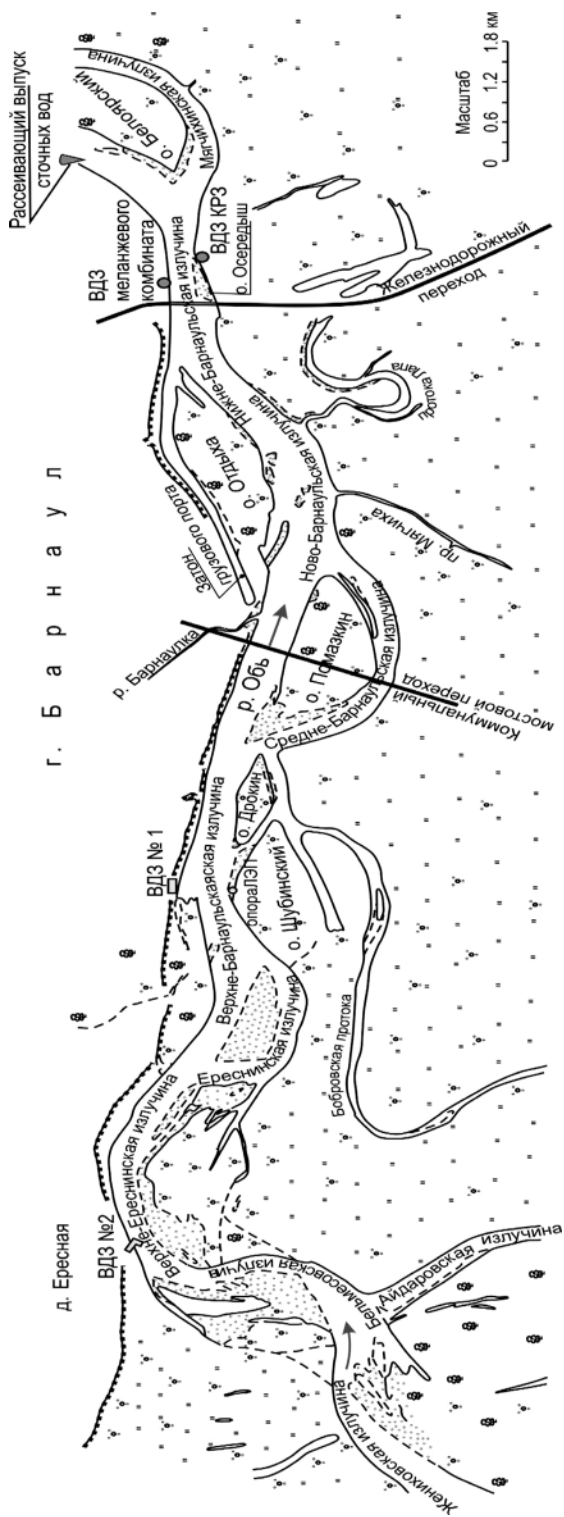


Рис. 8.16. Участок русла и поймы Оби в районе Барнаула с указанием мест расположения различных объектов городского хозяйства

В перечне этих многочисленных проблем городского хозяйства наиболее значимыми на момент выполнения исследований были проблемы обеспечения города питьевой водой и сооружения коммунального моста. Их решение, как и остальных перечисленных выше проблем, осуществлялось в традиционном для Отдела русловых процессов ГГИ методическом ключе: гидроморфологический анализ переформирований речного потока и русла с установлением на его основе типа и схем развития руслового процесса и разработкой прогноза его последующего состояния и детальными исследованиями кинематической структуры речного потока в натуральных условиях и на гидравлической пространственной модели применительно к естественному состоянию участка реки и к разным вариантам инженерного регулирования гидроморфологических процессов с оценкой воздействия их на конкретные объекты, размещенные в русле и на пойме реки.

Детальная информация о поле скоростей речного потока при разных расходах воды составляла основу для анализа и последующего заключения о характере перемещения русловых и взвешенных наносов, о возможных деформациях русла и поймы и, с учетом полученных выводов — для разработки предложений о наиболее рациональных инженерных вариантах обеспечения нормального функционирования водохозяйственных объектов [157].

### **8.3.1. Краткая характеристика гидрологического режима Оби у Барнаула**

#### **8.3.1.1. Физико-географическая характеристика**

Река Обь образуется слиянием рек Бии и Катунь. Исследуемый участок Оби расположен в 250 км от ее истока. В створе водомерного поста Барнаул площадь водосбора Оби составляет 169 000 км<sup>2</sup>, и в нее впадают (кроме образующих Бии и Катунь) левобережные притоки Ануй, Чарыш, Алей.

Преимущественное направление течения реки с юга на север является одной из основных причин образования весенних заторов льда и осенних зажоров.

В районе Барнаула расположены северо-восточные отроги Приобского плато. С востока плато ограничено долиной Оби, с абсолютными отметками местности 120–140 м. Плато сложено мощной толщей рыхлых четвертичных отложений (мощность только одних лессовидных суглинков составляет местами более 40 м). Особенностью этих суглинков является их просадка при намокании.

Русло Оби шириной около 700 м прижато к склону долины высотой 80–100 м. Этот очень крутой склон сложен в верхних слоях суглинками, а в нижних — тяжелыми глинами, сильно рассечен оврагами и подвержен оползням. Оползни вызываются размывом коренных пород берега, скорость размыва которого составляет около 0,5 м/год. Крупные оползни наблюдались в 1913, 1939, 1975 и в 1983 гг.

В русле Оби отмечены многочисленные выходы трудноразмываемых тяжелых глин, на которых формируются отмели, косы, осередки.

Мощными слоями суглинков местами сложены пойменные террасы, где эти суглинки залегают уже непосредственно под почвенным слоем.

Пойма Оби в районе Барнаула преимущественно правобережная, изрезана многочисленными протоками, старицами. На пойме много озер и понижений, которые заполняются водой во время половодий, а затем частично пересыхают или промерзают зимой. Пойма и острова местами покрыты луговой растительностью, а местами — кустарником и лесом (береза, осина, черемуха, тополь, реже сосна). Высота пойменных берегов над меженным уровнем воды составляет 2–4 м.

Климат региона континентальный. Максимальная температура воздуха летом  $+37$ – $+38^{\circ}\text{C}$ , минимальная температура января ниже  $-45^{\circ}\text{C}$ . Среднегодовое количество осадков составляет 480–496 мм. Около 70 % годовой нормы выпадает в теплый период года. Зимние осадки в целом невелики: в малоснежные зимы высота снежного покрова не превышает 15 см, в многоснежные годы достигает 60 см. Средняя глубина промерзания грунтов 133 см, максимальная — до 219 см.

### 8.3.1.2. Водный режим

Наблюдения за уровнем воды у г. Барнаула ведутся с 1893 г., а расходы воды измеряются с 1922 г. Характерные расходы воды за период 1922–1980 гг. составили: средний годовой расход —  $1470\text{ м}^3/\text{с}$ , средний из наибольших годовых —  $5350\text{ м}^3/\text{с}$ , наибольший —  $11\,200\text{ м}^3/\text{с}$  (1.04.1969 г.), наименьший —  $3070\text{ м}^3/\text{с}$  (18.19.04.1974 г.); наименьший зимний —  $125\text{ м}^3/\text{с}$  (7–14.03.1969 г.), наименьший открытого русла —  $360\text{ м}^3/\text{с}$  (11.11.1978 г.).

Водный режим Оби на исследуемом участке относится к Алтайскому типу, характеризующемуся растянутым и имеющим гребенчатый вид половодьем и низкой устойчивой зимней меженью.

В период половодья по реке проходит 70 % годового стока. Нередко половодье имеет две волны: первая формируется в апреле–мае от таяния снега в равнинной части водосбора, вторая — обычно проходит в июне в результате таяния высокогорных снежников и ледников. Иногда обе волны сливаются вместе (1969 г.), и тогда половодье бывает особенно мощным и высоким. Наибольший расход, измеренный вертушкой 5 июня 1969 г. при уровне 135,21 м, составил  $12\,600\text{ м}^3/\text{с}$ . За 5 зимних месяцев (ноябрь–март) по реке проходит всего 10 % годового стока.

Самый низкий зимний уровень наблюдался в 1924 г. (18 ноября) и составил 126,93 м. Наинизший меженный уровень открытого русла наблюдался 30.9–7.10.1918 г. и составил 127,74 м.

Устойчивый ледостав устанавливается в первой декаде ноября. Толщина льда в зимний период достигает 0,9–1,0 м.

Наивысший за весь период наблюдений уровень зафиксирован в 1937 г. и достигал отметки 135,52 м. Таким образом, предельный размах изменения уровня воды составил за многолетний период по летнему минимуму 7,78 м, а по зимнему минимуму 8,59 м. Летняя межень из-за таяния снегов и ледников в горах практически отсутствует, низкие уровни достигаются обычно в начале-середине октября.



Пойма в половодье почти ежегодно затопляется на разную глубину и на разный срок. В среднем продолжительность затопления поймы составляет 30–35 дней. В многоводные годы пойма затопляется слоем до 2–3 м, и продолжительность затопления достигает 70–90 дней.

Средняя и максимальная скорости течения на участке водпоста составили соответственно 2,0–2,5 м/с и 2,5–3,0 м/с.

Существенное влияние на ход уровней и уклонов потока оказывает глухая дамба железной дороги, перекрывающая всю правобережную пойму. При затопленной пойме уклоны потока на участке русла выше железнодорожного моста существенно уменьшаются вследствие образующегося подпора уровня воды.

### 8.3.1.3. Режим твердого стока

Наблюдения за стоком взвешенных наносов проводятся на Оби у Барнаула с 1936 г. Сток взвешенных наносов Оби формируется за счет поступления из притоков и в результате размыва ее собственных берегов.

В верховьях горных рек эрозионные процессы незначительны, поэтому после слияния Бии и Катунь мутность в реке не превышает значений 100–150 г/м<sup>3</sup>. Поверхность водосборов равнинных притоков (Алея, Ануя, Чарыша и др.) представлена долинным и овражно-балочным резко расчлененным эрозионным рельефом, и поэтому после их впадения мутность Оби возрастает до 500–1000 г/м<sup>3</sup>. Существенным поставщиком взвешенных наносов в русло Оби являются подмываемые рекой склоны долины, сложенные лессовидными суглинками с прослойками песка и гальки. Размер частиц взвешенных наносов колеблется в широких пределах (от 0,0064 до 0,04 мм).

Средняя годовая мутность воды составляет 170 г/м<sup>3</sup>, наибольшая измеренная мутность составила 1800 г/м<sup>3</sup>. Мутность 50 г/м<sup>3</sup> наблюдалась 160 суток в году, до 500 г/м<sup>3</sup> — 11 суток в году, 1000 г/м<sup>3</sup> — 5 суток в году.

Максимальные расходы взвешенных наносов (в среднем) наблюдаются в мае и составляют 1000 кг/с, наибольший расход взвешенных наносов зафиксирован в половодье 1,0%-ной обеспеченности (3.05.1969 г.) и составил 12 000 кг/с.

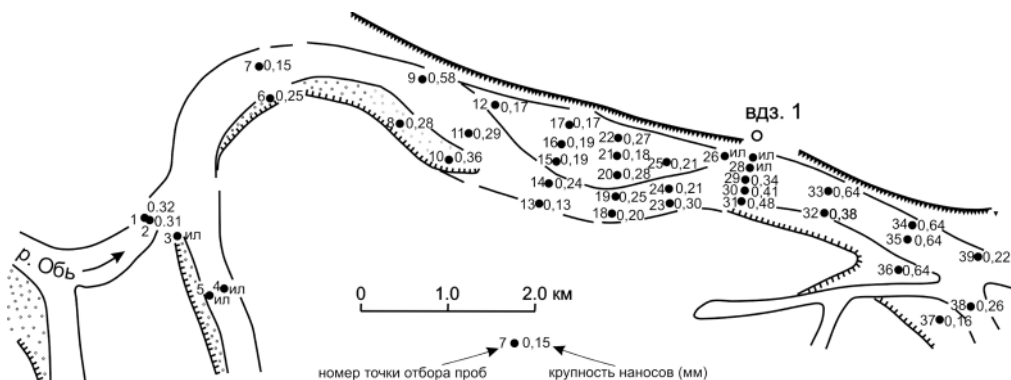


Рис. 8.17. Места отбора проб и их крупность (сентябрь 1975 г.)

Средний объем стока взвешенных наносов составляет 8 млн. т./год; в половодье проходит, в среднем, 85% всего объема.

Донные наносы изучались преимущественно в рамках экспедиционных исследований. Наиболее полный материал по гранулометрии влекомых наносов (или донных отложений) получен полевым отрядом ГГИ в 1975 г. (рис. 8.17). Из его рассмотрения следует, что наиболее крупные донные наносы приурочены к зонам потока со значительными скоростями течения, т. е. к зонам интенсивного размыва, наиболее мелкие — к зонам гидродинамической тени потока. В целом русловые наносы на исследуемом участке представлены мелко- и среднезернистыми частицами, крупность частиц больше 0,5 мм обнаружена только в 2-х пробах из 39 проб, отобранных на участке реки от Айдаровской излучины до приверха о. Помазкина [157].

### **8.3.2. Русловой процесс Оби у Барнаула**

Анализ переформирований русла и гидравлической структуры потока Оби выполнен по обширному материалу, включающему лоцманские карты реки, начиная с 1897 г., топографические карты разных лет, аэрофотосъемки и аэрофотосхемы, русловые съемки специального назначения, сведения по геологии района, данные наземных и авиационных гидрометрических работ, специальные измерения характеристик донного рельефа, грунтов дна, взвешенных наносов и фондовые материалы гидрометслужбы. Этот большой материал охватывает 90-летний период (с 1897 г. по 1987 г.), характеризует 490-километровый участок реки (от слияния Бии и Катунь до Камня на Оби), разные стороны и детали сложного природного явления, испытывающего влияние многообразной хозяйственной деятельности и, вместе с тем, оказывающего существенное воздействие на хозяйственные объекты, размещенные в русле и на пойме реки.

Но все же этот материал в значительной степени эпизодичен, недостаточно систематичен и требует существенного дополнения. Таким дополнительным материалом, детально освещающим поле скоростей потока при разных наполнениях русла и на этой основе позволяющим судить о направленности и интенсивности деформаций русла, являются результаты исследований на гидравлической пространственной модели участка реки, приведенные ниже.

Собранные материалы натуральных исследований позволяют прежде всего определить тип руслового процесса на рассматриваемом участке реки.

#### **8.3.2.1. Тип руслового процесса**

Русловой процесс Оби у Барнаула в целом развивается по типу незавершенного меандрирования. Для этого типа характерно наличие нескольких конкурирующих рукавов реки, из которых один все же является основным и по размерам, и по водности. Обычно основным рукавом является короткий (спрямляющий излучину) рукав. Спрямленная излучина может быть проточной в течение всего года или отделенной от основного рукава так, что проточность в ней наблю-

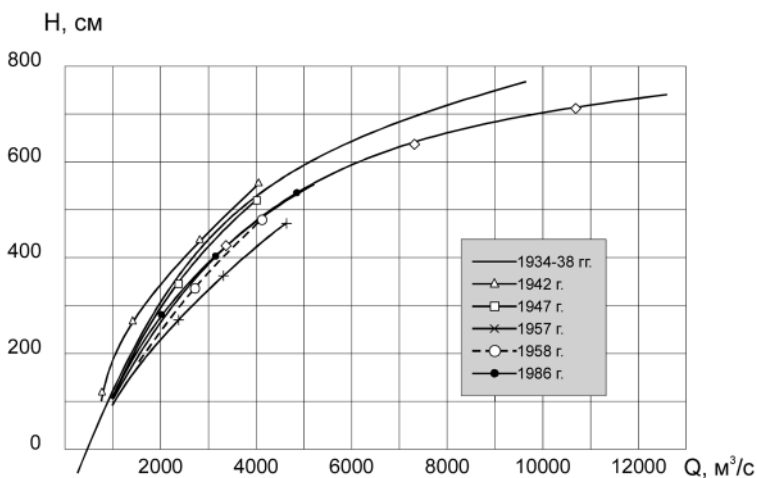


Рис. 8.18. Кривые связи расходов и уровней воды в створе поста р. Обь – г. Барнаул

дается только при высоких уровнях воды, а при низких уровнях сообщение с основным рукавом осуществляется только через низовой участок (или устье) излучины. При блокировании сверху и снизу спрямленная излучина превращается в старицу, а русло на этом участке реки становится на какое-то время одно-рукавным.

Вместе с тем, в незавершенном меандрировании содержится механизм образования на участке реки общего морфологического фона по типу пойменной многорукавности. На рассматриваемом участке Оби это проявляется в функционировании пойменных проток Бобровской, Мягчихи, Лапы и других.

Спрявление излучин на ранних стадиях развития свидетельствует об эпизодическом нарушении динамически равновесного состояния участка реки. Причиной такого нарушения на Оби могли быть, в частности, резкие изменения количества наносов, образующихся при оползнях или при спрямлениях излучин на вышележащих участках реки. Свидетельством проявления неравновесности в гидравлике потока и морфологии русла является динамика кривой расходов и уровней воды в многолетнем разрезе (рис. 8.18).

### 8.3.2.2. Морфогидродинамическая характеристика исследуемого участка Оби во второй половине 1980-х годов

Приведенная на рис. 8.16 морфологическая ситуация на реке сложилась к 1986 г. Толчком к ее образованию послужило спрявление Айдаровской излучины, случившееся в 1959 г., и половодье 1 %-ной обеспеченности 1969 г. с максимальным расходом 12 600 м³/с.

Развившийся к 1959 г. пляж Жениховской излучины перекрыл своим ухвостом вход в Айдаровскую излучину, ставшую к этому времени весьма неудобной для пропуска речного потока при больших расходах воды из-за значительной ее протяженности и слишком крутого разворота вправо (рис. 8.19).



Рис. 8.19. Вид на Верхне-Ересненскую, Бельмесовскую, Жениховскую и Айдаровскую излучины и водозабор № 2

Спрямоленный поток, обладая большими скоростями течения, стал интенсивно размывать вогнутые берега Бельмесовской и Верхне-Ереснинской излучин с соответственным разрастанием пляжей этих излучин.

Частично продукты размыва левого (вогнутого) берега Верхне-Ереснинской излучины отложились у этого же берега несколько ниже по течению реки в виде зарождающегося побочня, который был назван Ереснинским. Перемещаясь вниз по течению, Ереснинский побочень достиг створа, в котором коренной склон долины заметно и резко отклоняется влево (от реки), образуя при высоких уровнях воды гидродинамическую тень, способствующую аккумуляции поступающих сюда наносов. С этого момента Ереснинский побочень утратил свойственную ему ранее скорость перемещения и по существу трансформировался в Ереснинский пойменный массив протяженностью около 3 км с характерным составом пойменных грунтов с кустарниковой и древесной растительностью. В затонской части этого пойменного массива и расположены оголовки водозабора № 1.

В прикорневой части Ереснинского пойменного массива сохранилось понижение со следами некогда существовавшего здесь русла, наполняемого при высоких уровнях водой с образованием временно действующего транзитного течения, выходящего в акваторию водозабора № 1. Таким образом, водозабор № 1 оказался в некоторое время в затонской части Ереснинского пойменного массива, куда ежегодно при высоких уровнях поступает значительное количество русловых и взвешенных наносов, создающих значительные затруднения работе водозаборных оголовков.

Вместе с тем, значительно развивавшаяся Ереснинская излучина способствовала не менее интенсивному формированию Средне-Барнаульской излучины.

Обе эти излучины были спрямлены высоким половодьем, в результате чего образовались отторженный от Ереснинского пойменного массива обширный пляж и отторженный от левого берега пойменный массив, называемый о. Помазкин.

Течение в спрямлении Ереснинской излучины, развившемся в основной рукав реки, произвело значительный размыв правого пойменного берега в районе перехода ЛЭП-220 кВ и, в частности, у высоковольтной опоры, создав угрозу ее устойчивости. Вместе с тем, продукты размыва правого берега аккумулируются несколько ниже по течению, затрудняя судоходство на подходах к Шубинскому затону.

Несколько ниже по течению устья р. Барнаулки сформировался обширный пойменный массив под названием о. Отдыха. Он образовался, как и Ереснинский пойменный массив, в гидродинамической тени потока, за очередным изломом (отклонением влево) линий коренного склона долины. Зарождению аккумулятивной формы у левого берега могли способствовать наносы, поставляемые Барнаулкой в русло Оби и проявляющиеся в виде приустьевого конуса выноса, ниже которого затем оседали уже наносы, поставляемые собственно Обью. Но более вероятной представляется вариант образования о. Отдыха из пляжа, отторженного от правобережного пойменного массива в ходе спрямления русла примерно по линии его современного положения. В таком варианте понятен глубокий затон у левого берега как элемент бывшей когда-то излучины, сохранивший связь с современным руслом через низовой вход. В затоне размещается грузовой порт Барнаула. Спрямяющий рукав на этом участке стал переформировываться в какое-то время в излучину, называемую Ново-Барнаульской.

Ново-Барнаульская излучина способствовала отклонению стрежня потока на нижележащем участке к левому берегу с соответственным формированием здесь излучины противоположного направления, названной впоследствии Нижне-Барнаульской. Ее вершина обращена к левому берегу, поэтому левобережные опоры железнодорожного моста оказались в свое время в аварийном состоянии, будучи приуроченными к плесовой ложине, а русловой оголовок КРЗ г. Ново-Алтайска оказался на правобережном пляже этой излучины, т. е. в зоне аккумуляции наносов и, следовательно, тоже в аварийном состоянии.

Ниже железнодорожного моста река разделяется о. Белоярский на два рукава. Здесь тоже некогда произошло спрямление излучины по типу незавершенного меандрирования.

Спрямленная излучина (правый рукав) называется Мягчихинской и функционирует как второстепенный по водности и размерам рукав, а спрямление и по водности, и по размерам стало основным рукавом. Вместе с тем, в спрямление привлекается значительное количество наносов, которые, перемещаясь в виде крупных внутрирусловых форм, создают затруднения в работе рассеивающих выпусков сточных вод.

Приведенная морфогидродинамическая характеристика Оби в районе Барнаула относится к состоянию реки в 1986–1987 гг. Перечисленные в этом описании водохозяйственные и другие объекты на реке нуждаются в инженерной защите, которая должна базироваться на прогнозе руслового процесса, кинематики и гидравлики речного потока.

### 8.3.2.3. Прогноз руслового процесса

Переформирования русла Оби по типу незавершенного меандрирования генетически предопределяют вариантность прогноза руслового процесса, заключающую в себе не столько различие в количественных показателях какой-либо характеристики (например, интенсивности размыва вогнутого берега в ходе развития излучины), сколько радикальные, качественные преобразования (например, образование спрямлений излучин).

В связи с этим, прогноз руслового процесса в целом рассматриваемого участка Оби представлен в двух основных вариантах, определяемых водностью последующих лет (после 1986–1987 гг.).

Если последующие годы не будут включать половодий редкой повторяемости, то преимущественным видом деформаций русла будет развитие излучин как уже сложившихся, так и зарождающихся в образовавшихся спрямлениях русла. На конкретных участках реки и в конкретных гидравлических ситуациях интенсивность размыва пойменных берегов будет разной, но по аналогии с предыдущими годами может изменяться от 8 м/год до 35 м/год; интенсивность аккумулятивных процессов на пляжах и в ухвостьях островов и пойменных массивов может составлять от 13 м/год до 38 м/год.

Если в последующие годы пройдут половодья редкой повторяемости, в переформированиях русла проявится тенденция к спрямлению излучин с последующим развитием спрямляющих трактов и отмиранием спрямленных излучин. Очень высокое половодье может вызвать спрямление основного рукава реки из Бельмесовской излучины в Ереснинскую излучину по существующим понижениям в поверхности правобережного пойменного массива.

Для оценки возможных гидравлико-морфологических условий на участках размещения тех или иных хозяйственных объектов нужны детальные сведения о кинематической структуре, формах движения речных наносов и локальных деформациях русла. Такие сведения были получены частично в ходе натурных наблюдений непосредственно на Оби в 1986 и 1987 гг., а в основном — исследованиями на пространственной гидравлической модели в Русловой лаборатории ГГИ.

### 8.3.3. Натурные работы, выполненные на Оби в районе Барнаула в 1986–1987 гг.

Натурные исследования были предприняты для восполнения недостающих сведений о гидравлико-морфологических характеристиках на конкретных участках реки и для обеспечения необходимыми материалами для сооружения гидравлической модели и ее тарировки.

В течение двух летних сезонов на рассматриваемом участке реки были выполнены следующие работы:

- русловая съемка участка реки от Айдаровской излучины до ухвостья о. Белоярский (1986 г.);
- наблюдения за уровнем воды в период открытого русла;

- измерения расхода воды в рукавах реки у о. Помазкина и о. Белоярский;
- измерения скоростей течения гидрометрическими вертушками в 12 гидростровах;
- аэрогидрометрические измерения скорости течения на 12 участках реки (3 серии при разных уровнях воды в 1986 г.);
- нивелировка уклона водной поверхности потока при отметке уровня 130,81 м и расходе воды 2420 м<sup>3</sup>/с (10 уклонных точек в пределах всего участка);
- отбор проб донных отложений в районе оголовков водозабора № 1 (7 проб) и водозабора КРЗ (4 пробы). Отбор проб взвешенных наносов в 5 точках по глубине у оголовков водозабора КРЗ и одновременно из водоприемного колодца водозабора;
- эхолотирование дна по продольным створам, на трех участках русла у водозаборов № 1, № 2 и КРЗ (по 5 створам на каждом участке) для определения параметров микроформ речного рельефа;
- измерение поверхностных скоростей течения поплавками на акваториях водозаборов № 1 и КРЗ.

Участки выполнения и состав натурных работ показаны на рис. 8.20.

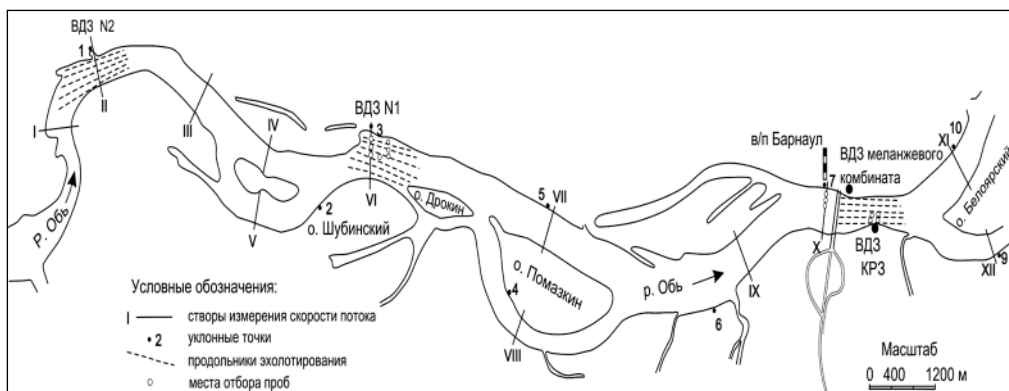


Рис. 8.20. Участки выполнения и состав натурных работ 1986–1987 гг. на Оби

Анализом материалов натурных работ установлено в частности следующее.

- Расходы воды на участках спрямленных излучин (у островов Помазкин и Белоярский) распределяются в пользу спрямлений: у о. Помазкина — 2080 м<sup>3</sup>/с в спрямлении и 460 м<sup>3</sup>/с в излучине, у о. Белоярский — 1350 м<sup>3</sup>/с в спрямлении и 950 м<sup>3</sup>/с в излучине.
- Поперечный профиль русла в створе железнодорожного моста сильно асимметричен: минимальные отметки в левобережной зоне составляют 118,5 м абс., а максимальные отметки в правобережной зоне достигают 129,0 м абс.
- Отметки дна в зоне оголовков водозабора №1 составляют 126,0 м абс., а у противоположного берега, в районе опоры ЛЭП — 120,0 м абс.
- Скорости течения на акватории водозабора №1 при уровне воды 132,78 м абс. составляют 0,08–0,13 м/с, а в правобережной зоне, в створе

ЛЭП-220 кВ при уровне воды 132,62 м абс. достигают 1,8–2,0 м/с. Это значит, что на акватории водозабора происходит активный процесс аккумуляции наносов, а в правобережной зоне — активный процесс размыва дна и пойменного берега.

- Водозабор КРЗ засоряется преимущественно русловыми (а не взвешенными) наносами.
- Максимальные размеры песчаных гряд составили (по измерениям в июне 1987 г.): в районе водозабора № 2 высота гряды  $h_2=1,8$  м, длина гряды  $L_2=40$  м; у водозабора № 1  $h_2=1,7$  м,  $L_2=35$  м; у водозабора КРЗ  $h_2=1,7$  м,  $L_2=30$  м; в районе п. Гоньба (рассеивающий выпуск сточных вод)  $h_2=1,0$  м,  $L_2=72$  м.
- В продольном профиле водной поверхности обнаруживается перелом, приуроченный к створу впадения в Обь р. Барнаулки и вызванный особенностями макроморфологии и гидравлики потока на этом участке реки: выше этого створа уклон водной поверхности потока даже при сравнительно небольшом расходе воды, равном  $2420 \text{ м}^3/\text{с}$ , заметно меньше, чем на нижележащем участке.

### 8.3.4. Экспериментальные исследования гидравлических характеристик потока, кинематической структуры течений и руслового процесса на гидравлической модели участка Оби у г. Барнаула

#### 8.3.4.1. Гидравлическая модель р. Оби

Русловая съемка Оби 1986 г., дополненная рельефом поймы, взятым с крупномасштабных топокарт, послужила основой для составления общего плана участка реки, по которому воспроизводился ее рельеф на модели. Модель сооружалась в жестком варианте с трехкратным искажением рельефа: горизонтальный масштаб модели 1:450, вертикальный — 1:150. Общий вид гидравлической модели приведен на рис. 8.21.

Условие  $Re_m > Re_{кр}$  обеспечивалось  $\text{аргіогі}$ , а для выполнения условия  $Fr=idem$  на поверхность модели была выложена дополнительная шероховатость.

Тарировка модели была произведена при расходе воды  $2420 \text{ м}^3/\text{с}$ . При этом расходе воды в натуре измерялись уклон потока, скорости течения и распределение расхода в рукавах реки.

На рис. 8.22 приведены натурный и модельный профили водной поверхности, обнаруживающие хорошее согласие и по уклонам потока, и по уровням воды.

Хорошее соответствие модельных скоростей течения с данными аэрогидрометрических измерений получалось не только в количественных значениях, но и в форме эпюр распределения поверхностных скоростей по ширине потока. Подобной натуре оказалась и макроструктура поля скоростей (зоны с малыми скоростями, циркуляционные зоны, положение стрежневой струи потока).

В табл. 8.6 приведены данные о распределении натуральных  $Q_n$  и модельных  $Q_m$  расходов воды по рукавам у о. Помазкина и о. Белоярский.

Из табл. 8.6 видно, что даже по такому комплексному показателю, как распределение расхода воды по рукавам реки, на двух независимых один от другого





Рис. 8.21. Общий вид гидравлической модели р. Оби у г. Барнаула (вид против течения)

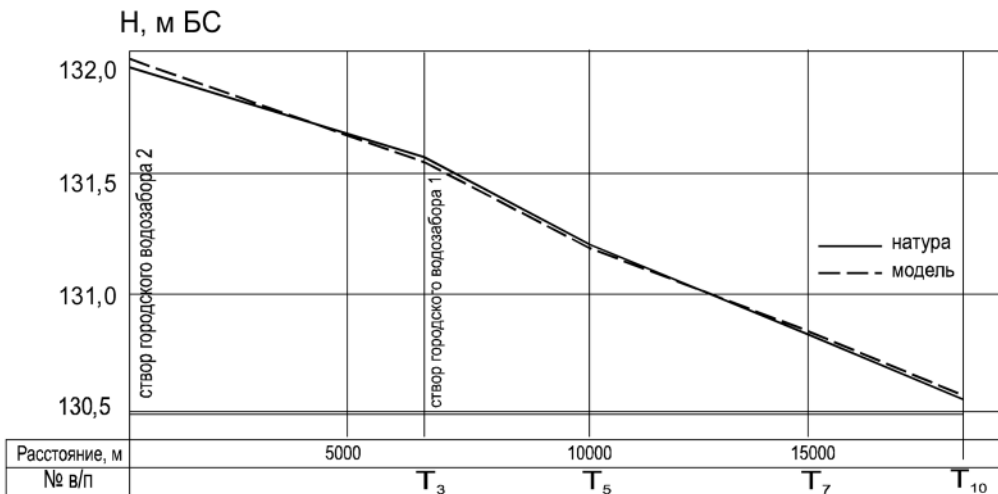


Рис. 8.22. Продольные профили водной поверхности Оби у Барнаула при расходе воды  $2420 \text{ м}^3/\text{с}$  в натуральных и лабораторных условиях

**Таблица 8.6. Распределение расходов воды по рукавам у о. Помазкина и о. Белоярский в натуре и на модели**

Местоположение створов	у о. Помазкина				у о. Белоярский			
	$Q_H, \text{ м}^3/\text{с}$	%	$Q_M, \text{ м}^3/\text{с}$	%	$Q_H, \text{ м}^3/\text{с}$	%	$Q_M, \text{ м}^3/\text{с}$	%
Левый рукав	2080	82	2100	84	1350	59	1390	61
Правый рукав	460	18	400	16	950	41	900	39
Общий расход	2540	100	2500	100	2300	100	2290	100

участках достигнуто хорошее соответствие модельных значений расходов воды с натурными значениями.

На гидравлической модели были выполнены исследования кинематической структуры речного потока, уклонов водной поверхности, характера и траекторий движения донных частиц в естественном состоянии участка реки и в различных проектных условиях в широком диапазоне изменения расходов воды: при меженном расходе  $964 \text{ м}^3/\text{с}$ , при тарифовочном расходе  $2420 \text{ м}^3/\text{с}$ , при расходе в бровках меженного русла  $3500 \text{ м}^3/\text{с}$ , при расходах  $5200$ ,  $7300$  и  $12\,000 \text{ м}^3/\text{с}$  соответственно  $50\%$ -,  $10\%$ - и  $1,0\%$ -ной обеспеченности.

Скорость течения на модели измерялась микровертушками и путем фотографирования поверхностных поплавков. Скорость и направление течения в придонной зоне фиксировались с помощью ватных шариков, пластмассовых частиц и окрашенной жидкости. Движение наносов и зоны их аккумуляции изучались с помощью частиц каменного угля, способных перемещаться при модельных скоростях течения.

В некоторых случаях из каменноугольного грунта выполнялся целый фрагмент жесткой модели, и затем исследовались деформации этого фрагмента (например, местный размыв у мостовых опор и распределенный на участке мостового перехода размыв дна). В части опытов в качестве грунта на модели использовались замоченные древесные опилки. Полученные таким образом модельные данные не могли быть количественно пересчитаны в натурные значения, но, тем не менее, качественную сторону изучаемых процессов они освещали вполне надежно и детально.

Модельные эксперименты, охватывающие все фазы водного режима и в том числе исключительно выдающиеся по расходу и уровню воды половодья, совместно с материалами натурных исследований 1986–1987 гг. и результатами многочисленных исследований этого участка реки в прошлые годы составили достаточный объем информации для выработки обоснованных заключений по перечисленным во введении объектам, размещенным в русле реки или на ее пойме.

Приведем здесь результаты модельных экспериментов по некоторым наиболее значимым для г. Барнаула объектам, перемещаясь последовательно от верхней границы исследуемого участка реки вниз по течению.

#### **8.3.4.2. Оценка возможности спрямления Верхне-Ереснинской излучины**

На правобережном пойменном массиве сохранилось несколько тальвегов (следов прежних положений русла Оби), по которым предположительно возможна разработка тракта, спрямляющего основное русло из нижней ветви Бельмесовской излучины в верхнюю ветвь Ереснинской излучины (рис. 8.16). Для проверки этого предположения часть жесткой модели на этом участке была сформирована из каменноугольного порошка с размером частиц  $0,1\text{--}0,5 \text{ мм}$ . На модель были поданы следующие расходы воды:  $3500 \text{ м}^3/\text{с}$  (в течение 23 суток),  $5200 \text{ м}^3/\text{с}$  (в течение 23 суток),  $7300 \text{ м}^3/\text{с}$  (в течение 46 суток) и  $12\,000 \text{ м}^3/\text{с}$  (в течение 21 суток).

Незначительный размыв тальвегов при расходе 3500 м<sup>3</sup>/с существенно активизировался с увеличением расходов воды. Наряду с размывом пойменных тальвегов образовались зоны аккумуляции наносов на нижерасположенных участках правобережной поймы. Однако даже после воздействия на пойму потоком при общем расходе 12 000 м<sup>3</sup>/с единого спрямляющего тракта не образовалось. Локальные размывы на глубину до 1,7 м от первоначальной поверхности поймы сочетались с локальными зонами аккумуляции высотой до 0,8 м.

Искусственное воспроизведение спрямляющей прорези на пойме с отметкой дна 126,0 м абс. (эти отметки дна наблюдаются в основном русле реки на этом участке) и воспроизведение расходов воды 7300 м<sup>3</sup>/с (6 суток), 12 000 м<sup>3</sup>/с (6 суток), 5200 м<sup>3</sup>/с (11 суток) и 3500 м<sup>3</sup>/с (28 суток) не привело к заметной разработке ее русла.

Этот модельный эксперимент свидетельствует о том, что возможность спрямления излуцины зависит не только от состояния пойменного массива и расходов половодья, а еще (и, по-видимому, в большей мере) от гидравлико-морфологической ситуации на вышележащем участке реки и на участке самой спрямляемой излуцины (от ее пропускной способности). Иными словами — рассматриваемый участок реки по его состоянию в 1986 г. был не готов к образованию спрямляющего тракта по правобережной пойме. Этот вывод был важен для прогноза условий функционирования городского водозабора № 2 (рис. 8.19 и 8.20).

Водозабор № 2 с самопромывающимся ковшом конструкции Образовского функционировал здесь в 1986—1987 гг. вполне нормально. Учитывая известное представление о постепенном развитии возможных спрямлений излуцин, было рекомендовано выполнять после значительных половодий обследования этого участка реки и при обнаружении тенденций к образованию спрямления произвести защиту вогнутого берега Бельмесовской излуцины отсыпкой рваного камня соответствующей крупности с закладкой траншейного базиса эрозии в понижениях — тальвегах правобережного пойменного массива.

#### **8.3.4.3. Оценка гидравлико-морфологической ситуации на участке размещения городского водозабора №1 и перехода ЛЭП-220 кВ**

Гидравлико-морфологическая обстановка на этом участке реки изучалась при расходах воды 964, 2420, 3500, 5200, 7300 и 12 000 м<sup>3</sup>/с. Анализ поля поверхностных скоростей течения приводит к заключению, что при всех расходах воды и наполнениях русла скорости течения на акватории расположения оголовков водозабора № 1 невелики и не превышают 0,6 м/с. Проявляется эффект гидродинамической тени, создаваемой здесь ухвостьем Ереснинского пойменного массива и сформировавшегося при нем пляжа с продольной песчаной косой, отделяющей акваторию с оголовками от основного русла реки.

Вместе с тем у противоположного берега скорости течения при всех расходах воды значительны, и поток интенсивно размывает пойменный правый берег выше по течению створа перехода ЛЭП-220 кВ и на участке правобережной опоры ЛЭП.

Траектории придонных течений, зафиксированные донными поплавками и краской, показывают, что почти при всех расходах воды и наполнениях русла донные наносы, поступающие с Ереснинского пляжа и продолжающей его косы, вовлекаются этими течениями на акваторию водозабора и накапливаются здесь, выводя оголовки из режима нормального функционирования. Наносы засасываются через водоприемные окна в водоводы и проникают далее (это зафиксировано эксплуатационниками) даже в городскую водопроводную сеть.

На модели были детально исследованы следующие варианты восстановления нормальных условий работы водозабора, предложенные в разное время различными организациями.

— Новосибирским институтом инженеров водного транспорта (НИИВТ'ом). Предложение заключается в разработке прорези в прикорневой части Ереснинского пойменного массива для подачи значительных объемов воды на акваторию водозабора с целью ее промывки.

— Красноярским отделением ВНИИИГа им. Веденеева. Предложение заключается в устройстве шпор у каждого оголовка, предназначенных для стеснения живого сечения потока, увеличения таким образом скоростей течения, активизации движения наносов и понижения поверхности дна у оголовков (рис. 8.23).

— Государственным гидрологическим институтом (ГГИ) в 1977 г. Предложение заключалось в сооружении непосредственно выше по течению акватории водозабора незатопляемой дамбы, корень которой сопрягался бы с левым коренным берегом, а внешняя часть разворачивалась по течению. Таким мероприятием предполагалось исключить поступление наносов на акваторию водозабора с ухвостья Ереснинского пойменного массива и из основного русла реки.

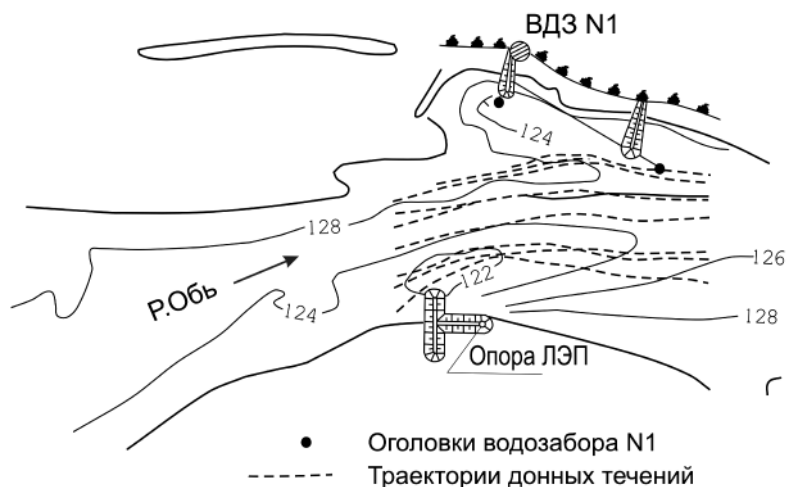


Рис. 8.23. Предложения ВНИИИГа по защите правого берега Оби от размыва в районе опоры ЛЭП Т-образной дамбой и по нормализации работы оголовков водозабора № 1 шпорами

— Государственным гидрологическим институтом в 1987 г. Предложение заключается в выдвигании оголовка водозабора в правобережную плесовую ложину основного русла (в районе опоры ЛЭП) и в сохранении прежних оголовков в левобережной зоне в законсервированном виде.

Результаты модельных экспериментов убедительно показали несостоятельность предложений НИИВТа, Красноярского отделения ВНИИГа и ГГИ 1977 г.

Попытка промывки акватории водозабора подачей воды через прикорневую прорезь закончилась занесением ее наносами, поскольку вся прорезь, начиная с ее входного участка, находилась в гидродинамической тени, за упомянутым выше выступом в линии склона коренного берега.

Предложенные ВНИИГом шпоры оказались неэффективными, поскольку на акватории водозабора скорости течения слишком малы, чтобы обеспечить стеснение живого сечения и таким путем увеличивать промывающую способность потока.

Устройство на модели незатопляемой дамбы по предложению ГГИ 1977 г. вызвало интенсивное разрастание продольной косы в устье Ереснинского пляжа с угрозой полного блокирования акватории водозабора в периоды межени, что было обусловлено сильно изменившейся гидравлично-морфологической обстановкой в связи со спрямлением Ереснинской излучины.

Предложение ГГИ 1987 г., как показали эксперименты, перспективно, поскольку оно допускает возможность работы либо правобережными оголовками, либо левобережными (прежними) оголовками, в зависимости от изменяющейся гидравлично-морфологической обстановки на участке Ереснинской излучины и Ереснинского пойменного массива. Вместе с тем, на момент 1987 г. это предложение оказалось рациональным рассматривать в комплексе с защитой правобережной опоры ЛЭП-220 кВ от размыва.

На модели исследовалось также предложение Красноярского отделения ВНИИГа по защите правобережного пойменного массива от размыва.

Предложение заключается в устройстве в правобережной зоне русла Т-образной насыпной дамбы, которая ориентировалась на местности, как показано на рис. 8.23. В основании Т-образной дамбы заключена аварийная опора ЛЭП-220 кВ.

Во всем диапазоне заданных на модели гидравлических режимов у оголовка дамбы, обращенного в русло, наблюдались большие скорости течения (1,4–1,8 м/с), что способствует поддержанию в этой части русла достаточных глубин для размещения оголовка водозабора. Оголовков может быть совмещен с этим конструктивным элементом дамбы.

Вместе с тем, за оголовками Т-образной дамбы на всех гидравлических режимах формировались водоворотные структуры, в которых интенсивно осаждались поступающие с вышележащих участков реки наносы.

Таким образом, предложенный ВНИИГом вариант защиты правого берега реки от размыва оказался удачным как для нормализации работы городского водозабора, так и для защиты ЛЭП-220 кВ и в целом правого берега от размыва.

Рекомендовался и другой вариант защиты правого берега от размыва — отсыпкой каменного банкета вдоль правого берега на 400–600 м вверх по течению и на 50–100 м вниз по течению от опоры ЛЭП. Однако вариант ВНИИГА в виде Т-образной защитной дамбы представляется предпочтительным.

#### **8.3.4.4. Сравнительная оценка вариантов проектирования коммунального моста**

Коммунальный мост намечен к строительству на участке двухрукавного русла через о. Помазкин. Правый рукав представлен спрямленной излучиной (Барнаульской), левый рукав — спрямляющий и основной, пропускающий 80% общего расхода реки.

Рассматривались два варианта конструкции моста: мост с двумя водопропускными отверстиями (в обоих рукавах реки) и с глухой правобережной дамбой в пределах всей поймы, и мост с одним водопропускным отверстием в левом рукаве и с глухой дамбой в правом рукаве и на пойме.

Экспериментами на модели было установлено, что перекрытие правобережной протоки (излучины) даже при расходах воды в бровках русла вызывает подъем уровня в створе водозабора № 1 на 0,2 м, а в створе водозабора № 2 — на 0,1 м. При расходе воды 1 %-ной обеспеченности (12 000 м<sup>3</sup>/с) по первому варианту конструкции моста подъем уровня в створе водозабора № 1 составляет 0,1 м, на водозаборе № 2 — 0,21 м, а по второму варианту конструкции моста — соответственно 0,66 м и 0,66 м.

Скорости течения на участке мостового перехода по второму варианту конструкции моста возрастают при расходе 1 %-ной обеспеченности до 3,5 м/с, а при расходе 10 %-ной обеспеченности (7300 м<sup>3</sup>/с) — до 2,9 м/с. Такие скорости течения вызывают сильный размыв дна (что и было показано в качественной форме на фрагменте, сформированном из каменноугольного материала) с последующим выносом наносов на нижележащие участки русла и осложнениями в работе расположенных там водохозяйственных объектов (водозаборов, рассеивающих выпусков сточных вод, судоходных прорезей).

При двухпролетном варианте моста скорости течения даже при расходе 1 %-ной обеспеченности не превышают 2,6 м/с, поэтому этот вариант мостового перехода представлялся предпочтительным. Однако, по совокупности определяющих целесообразность сооружения моста факторов, к строительству был принят второй вариант сооружения моста.

Для однопролетного моста на модели исследовались варианты регуляционных сооружений на правобережном пойменном массиве и на о. Помазкине.

#### **8.3.4.5. Экспериментальная оценка гидравлико-морфологической ситуации на участке реки между коммунальным и железнодорожным мостами**

На участке реки между о. Помазкинским и железнодорожным мостом в период до сооружения коммунального моста деформации русла проявлялись в размыве правого пойменного берега и разрастании пляжа при острове Отдыха.

Сооружение коммунального моста, как показано выше, вызовет значительный размыв дна (по аналогии с железнодорожным мостом и по результатам модельного эксперимента на размываемом фрагменте — до 10 м и более). Продукты

размыва дна, перемещаясь вниз по течению будут способствовать интенсивному наращиванию левобережного пляжа у о. Отдыха и правобережного пляжа у железнодорожного моста.

Вместе с тем значительно возросшие скорости течения ниже коммунального моста приведут к более интенсивным размывам правого пойменного и вогнутого берега, ускоряя развитие Ново-Барнаульской излучины и усугубляя гидравлико-морфологическую обстановку на участке железнодорожного моста.

На основании экспериментов на этом участке Оби было рекомендовано выполнить каменный банкет вдоль правого размываемого берега в пределах устьев проток Мягчиха и Лапы, а за левобережным пляжем вести наблюдение и эпизодически осуществлять выемку песка с его периферийной части, поддерживая таким путем эту аккумулятивную форму в стабильном состоянии.

#### **8.3.4.6. Экспериментальная оценка гидравлико-морфологической ситуации на участке реки между железнодорожным мостом и о. Белоярским**

Выше уже отмечалось, что русло реки на участке железнодорожного моста (фактически это два моста на независимых опорах, расположенных в непосредственной близости друг от друга) имеет резко асимметричный поперечный профиль. Плесовая ложина и стрежень потока приближены к левому берегу, а у правого берега сформировались обширный пляж при выпуклом берегу Нижне-Барнаульской излучины и поток с малыми скоростями течения, способствующими аккумуляции поступающих сюда наносов.

Эксперименты с коммунальным мостом обнаруживают еще большее обострение этих процессов. В связи с этим левобережные опоры железнодорожного моста, находящиеся уже в аварийном состоянии, будут еще более утрачивать устойчивость из-за дополнительного размыва дна в плесовой ложине, а водозабор КРЗ, также находящийся в аварийном состоянии, будет испытывать еще большие затруднения в работе.

На модели испытывались разные варианты нормализации гидравлико-морфологической обстановки на этом участке реки: струнаправляющая шпора в ухвостьи левобережного пляжа для отклонения стрежня потока от левого берега в центральную зону подмостового сечения, прорезь на правобережном пляже для отвлечения части потока из левобережной зоны в правобережную и, вместе с тем, для увеличения скоростей течения над правобережным пляжем и нормализации таким способом обстановки у оголовка водозабора КРЗ.

Однако эти меры, как показали модельные эксперименты, не дали значительного положительного результата, но в то же время существенно изменили естественный ход руслоформирования на этом участке реки. Поэтому рекомендации, направленные на нормализацию функционирования моста и водозабора КРЗ свелись к следующему: отсыпка банкета из крупного камня у левобережных опор моста и вынос оголовка водозабора в левобережную зону русла. Рекомендовались и нетрадиционные варианты конструкции водозабора, в частности, плавающий оголовок, забирающий воду из приповерхностных слоев потока, содержащих относительно меньшее количество взвешенных наносов в течение круглого года.

Ниже по течению железнодорожного моста на реке функционируют два выпуска сточных вод города: верхний по течению в левой протоке у о. Белоярский, нижний в районе пос. Гоньба.

Верхний выпуск работает относительно нормально за счет выемок грунта из русла на вышележащем участке реки, предпринимавшихся в других целях [157]. Нижний выпуск полностью перекрыт надвинувшейся мезоформой и работает по принципу сосредоточенного истечения, фонтанируя над поверхностью потока.

Хотя этот участок реки находится уже за пределами границ гидравлической модели, полученные в экспериментах результаты убедительно прогнозируют именно такую судьбу этих сооружений. Вместе с тем, при столь значительных высотных деформациях русла, вызванных перемещением мезоформ, надежным выходом из положения представляется устройство поверхностного рассеивающего выпуска, как это было сделано на Селенге в 1974 г.

#### **8.4. Комплексные исследования гидравлического режима и руслового процесса р. Иртыш с целью обоснования проекта регулирующих мероприятий по обеспечению надежного функционирования автотрассы и речного порта г. Ханты-Мансийска**

Территория г. Ханты-Мансийска ограничена двумя излучинами Иртыша, которые далее будем называть верхней и нижней, следуя сверху вниз по течению реки (рис. 8.24).

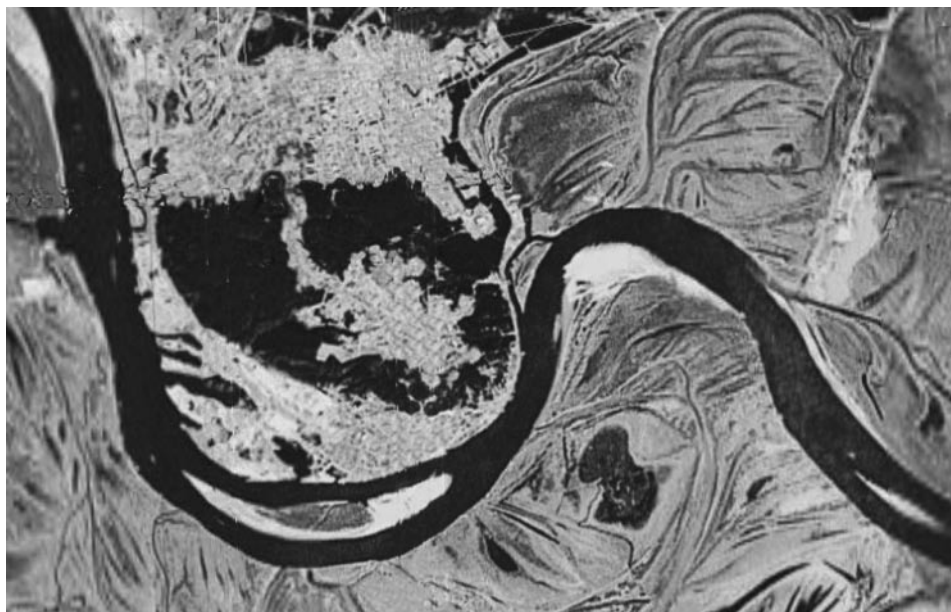


Рис. 8.24. Излучины Иртыша в районе г. Ханты-Мансийска (космический снимок 2005 г.).  
Течение справа налево



Верхняя излучина в ходе своего развития врежется в правобережный пойменный массив, перемещаясь вершиной на север, и только нижней ветвью при-мыкает к восточному коренному склону Ханты-Мансийского увала, на кото-ром и расположен весь город. Нижняя излучина, ориентированная вершиной на юг, обигает город с юго-восточной, южной, юго-западной и западной сторон и в ходе своего развития размывает левобережный пойменный массив.

В соответствии с законами развития свободных излучин, у их выпуклых бере-гов сформировались обширные пляжи с характерной структурой речного потока в этих зонах русла. Пляж нижней излучины отделен от основного русла остро-вом Самаровским естественно-искусственного происхождения, между которым и собственно выпуклым берегом сформировалась протока Самаровская.

На участке входа в Самаровскую протоку, на правом берегу, расположен речной вокзал, подходы к которому, будучи в зоне малых скоростей потока (ти-ховода), интенсивно заносятся русловыми и даже взвешенными наносами. Вся протока Самаровская сильно мелководна, и судоходство в ней, как и на под-ходах к речному вокзалу, крайне затруднено. За период с 1983 г. по 1998 г. на 660-метровом входном участке в Самаровскую протоку из ее русла было извле-чено 756 тыс. м<sup>3</sup> грунта, что при средней ширине полосы землечерпания около 200 м соответствует слою изъятых грунта около 5,5 м.

Верхняя излучина за период с 1909 г. по 2000 г. внедрилась в правобереж-ный пойменный массив примерно на 2 км. Скорость деформаций на участке ее вершины составляла в 1960–1980-х гг. около 30 м/год. Вместе с тем, право-бережный пойменный массив предполагается использовать в перспективе под городскую застройку, и ежегодная утрата его площади крайне нежелательна.

При проектировании кольцевой автотрассы в восточном секторе, где она, по существу, сопрягается с современным руслом, возникла проблема защиты берега и собственно автотрассы от воздействия речного потока.

В конце нижней излучины в 2004 г. на реке возведен автодорожный мост, центральный 230-метровый пролет которого является судоходным. Перечис-ленные выше проблемы предполагается решить путем регулирования речного потока и руслового процесса — прекращения или существенного уменьшения темпов размыва правого берега верхней излучины, устранения зоны аккумуля-ции наносов на подходах к речному вокзалу и в целом реанимации Самаров-ской протоки. При этом необходимо сохранить местоположение судового хода на участке мостового перехода.

#### **8.4.1. Методика решения проблемы**

Комплексные исследования в рамках данной проблемы выполнялись с исполь-зованием трех основных методических приемов:

- путем анализа и обобщения имеющихся данных о топографии, морфо-логии, геологии, гидрологическом режиме и гидравлике потока, а также осуществляемой и планируемой хозяйственной деятельности на реке;
- путем физического лабораторного моделирования гидравлического режима и кинематической структуры потока и оценки на их основе

тенденций развития руслового процесса и характера русловых деформаций;

- путем количественных оценок ряда процессов с использованием известных, апробированных расчетных методов.

Первый методический прием послужил основой для установления особенностей гидрологического режима и характеристик руслового процесса Нижнего Иртыша в целом и приустьевого его участка в районе Ханты-Мансийска.

Второй методический прием позволил получить достаточно детальные сведения о гидравлике и кинематической структуре речного потока, а также составить представление о динамике речного русла в естественном его состоянии и в проектных условиях в разные фазы гидрологического годового цикла и на этой основе выбрать наиболее эффективный вариант инженерных мероприятий, направленных на регулирование гидравлического режима потока и руслового процесса.

С помощью третьего приема оценена работоспособность предложенных инженерных мероприятий в долговременной перспективе.

#### **8.4.2. Основные характеристики и особенности гидрологического режима реки**

Протяженность Иртыша от истока до устья составляет 4248 км, площадь водосбора — 1 643 000 км<sup>2</sup>. В верхнем течении, до г. Семипалатинска, реке свойственен горный характер. Ниже Семипалатинска вплоть до Омска Иртыш представляет собою типичную равнинную реку, протекающую в широкой долине среди невысоких песчаных берегов. Принимая ниже Омска множество притоков, Иртыш становится мощной равнинной рекой меандрирующего типа, участок которой ниже Тобольска называется Нижним Иртышом.

Долина Нижнего Иртыша имеет четкообразный вид в плане: широкие участки (10–20 км) сменяются узкостями, в пределах которых расстояние между увалами, ограничивающими долину с обеих сторон, составляет 2–3 км.

На исследуемом участке река представляет собой, как и выше по течению, меандрирующее русло, однако часто разделяющееся на рукава в широкой (до 18 км) пойме, приближенное почти повсеместно (и нередко вплотную) к правобережному склону увалов.

Увалы имеют высоту над меженным уровнем 100 и более метров и сложены в значительной части супесями, суглинками и мелкозернистыми песками, легко поддающимися размыву речным потоком и дождями. Особенности строения и состава коренной породы оказали влияние как на формирование морфологического облика Нижнего Иртыша, так и на ряд элементов его гидрологического режима, в том числе на состав и крупность речных наносов, тип руслового процесса и на характер русловых деформаций.

Нижнему Иртышу свойственны основные черты сибирских рек, текущих с юга на север: многоводное и продолжительное весенне-летнее половодье (с начала апреля до конца сентября), переходящее в непродолжительную осеннюю межень (с конца сентября до середины ноября), и далее продолжительная зим-

няя межень (с середины ноября до начала мая) с периодом предледоставных ледовых явлений и постепенным понижением уровня воды к началу очередного половодья.

На приустьевом участке у Ханты-Мансийска максимальная амплитуда уровня воды превышает 11 м, средняя составляет около 9 м. В связи с этим пойма реки ежегодно затопляется в половодье. Уровень и продолжительность затопления поймы определяются не только величиной расхода воды, но также пропускной способностью русла и подпором Иртыша Обью. При расходе воды расчетной вероятностью превышения 10 %, равном 9390 м<sup>3</sup>/с и формирующем уровень воды 26,1 м БС, глубина затопления поймы составляет от 1 до 3 м, а при расходе воды расчетной вероятностью превышения 1 %, равном 13 200 м<sup>3</sup>/с, глубина затопления становится на 1 м больше.

Несогласованность фаз половодья Иртыша и Оби определяет значительную изменчивость уклонов водной поверхности на приустьевом участке реки (от 0,000005 до 0,00005, а в ряде случаев уклон оказывается даже отрицательным).

Скорости течения речного потока в меженный период составляют около 0,6–0,8 м/с, а на пике половодья достигают 1,5–1,6 м/с.

В ходе затопления поймы на ней образуется сложная система течений, формируемая пойменным рельефом. Скорости этих течений невелики и составляют в основном 0,2–0,3 м/с. Пойменные протоки в период половодья пропускают расходы 600–800 м<sup>3</sup>/с, а при уровне воды около 1 %-ной обеспеченности — более 1000 м<sup>3</sup>/с (при этом скорости течения в протоках возрастают до 1,0 м/с и более).

Речные наносы формируются в значительной мере под влиянием особенностей геологического строения коренных пород, составляющих прилегающую к реке местность. Годовой сток взвешенных наносов составляет около 16 млн. т или около 8 млн. м<sup>3</sup>. Годовой сток влекомых наносов (оценивая их количество в 5–10 % от взвешенных наносов) составляет около 0,8–1,6 млн. т или около 400–800 тыс. м<sup>3</sup>. В составе взвешенных наносов в течение всего теплого времени года преобладают пыль ( $d=0,06–0,01$  мм) и ил ( $d<0,01$  мм) — 80–90 % по весу с примесью мелкого песка. Влекомые наносы представлены преимущественно мелким и средним песком и небольшим количеством крупного песка. В период половодья проходит до 89 % стока наносов, в летне-осеннюю межень — около 9 %, в зимнюю — около 2 %.

Зимний режим реки (предледоставные ледовые явления, ледостав и весенний ледоход) не сопровождается какими-либо явлениями, оказывающими существенное влияние на перераспределение стока воды и на русловые процессы. Зажорных явлений не отмечается, весенние заторы льда наблюдаются в 60 % случаев и не вызывают опасных подъемов уровня воды. Толщина льда в предледоходный период составляет в среднем около 70 см и достигает местами 92 см. Предледоставный подъем уровня воды осенью обычно составляет около 1,5 м и может достигать 3 м.

Переформирования русла в пределах Нижнего Иртыша и, в частности, у Ханты-Мансийска осуществляются по схеме свободного меандрирования. Однако излучины основного русла нередко оказываются в непосредственном

контакте с правобережным коренным склоном увалов. В этих случаях темпы смещения русла в плане существенно замедляются, и вместе с тем из-за размыва коренного склона в русло поступает большое количество твердого материала, вызывающего уменьшение площади поперечного сечения и создающего дополнительное сопротивление речному потоку. По этой причине на многих участках Нижнего Иртыша тип руслового процесса переходит из свободного в незавершенное меандрирование, а гидравлический режим речного потока характеризуется нарушением сложившейся связи расходов и уровней воды. Образование проток, спрямляющих излучины реки, встречается на Нижнем Иртыше достаточно часто, и поэтому это явление следует рассматривать как типичную схему деформаций русла. Вместе с тем установлено, что образующееся в результате спрямления излучин двухрукавное русло может функционировать в таком виде многие десятилетия.

Скорость смещения вогнутых берегов свободных излучин варьирует от 9 до 20 м/год. Но она может быть и меньше этих значений на участках сопряжения реки со склонами увалов, и больше этих значений, из-за эпизодических «перегрузок» реки наносами.

Установлено, что Самаровская протока систематически заносится русловыми и частично взвешенными наносами, а причиной этому является приуроченность ее к пляжу нижней излучины, т. е. к аккумулятивной форме процесса. Установлено также, что скорость смещения правого вогнутого берега реки на лимитирующем участке проектируемой автотрассы существенна и составляет 20 м/год. Смещение русла заметно замедляется при непосредственном контакте с коренным склоном увала из-за большого количества материала, поступающего в русло от размыва склона и таким образом экранирующего его от воздействия потока.

Влияние хозяйственной деятельности на реку связано с сооружением автодорожного моста и собственно автомобильной дороги, перекрывшей насыпью левобережную пойму. Это влияние носит систематический характер и выражается в формировании местного размыва ниже мостовых переходов и в образовании подпора уровня в период затопления поймы. Кроме этого эпизодически выполняется землечерпание на отдельных участках реки в целях улучшения судоходных условий. Однако оба эти вида хозяйственной деятельности не вносят каких-либо существенных изменений ни в гидрологический режим, ни в русловый процесс и поэтому не требуют специальной прогнозной оценки.

### **8.4.3. Прогноз руслового процесса**

С учетом характера гидрологического режима и современных темпов плановых деформаций излучин, а также особенностей руслоформирования, связанных с образованием спрямлений излучин (включая ранние стадии их развития), разработан прогноз их переформирования на 50-летний срок, исчисляемый от 2006 г.

Прогноз составлен для участка реки, включающего 9 последовательных излучин: рассматриваемые в работе нижнюю и верхнюю излучины и 7 выше-

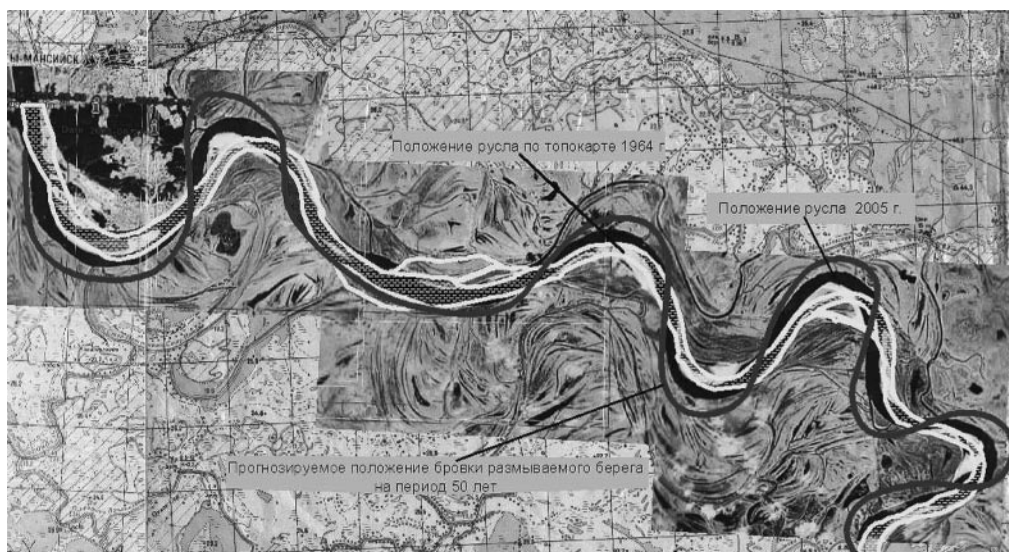


Рис. 8.25. Совмещенные планы русла р. Иртыш (топокарта 1964 г. – космический снимок 2005 г.) и прогнозируемое положение русла (течение справа налево)

расположенных излучин. Общая протяженность прогнозируемого участка реки составляет около 60 км (рис. 8.25).

Из этого рисунка видно, что темпы деформации вогнутых берегов излучин различны. Соответственно, различны и величины смещения излучин за 50-летний период. Наибольшее прогнозируемое смещение в правобережную пойму (около 1,0 км) произойдет на верхней из исследуемых двух излучин. При этом нижняя ее ветвь войдет в непосредственный контакт с коренным склоном увала. На излучине, сопрягающейся с верхней, левый вогнутый берег оказался устойчивым к размыву, и его смещение в плане на прогнозируемый срок близко к нулю. Здесь сказывается влияние геологического фактора (останца на пойме в виде тяжелой глины, или пещины, сформировавшейся при заилинии старицы) и современной морфологической ситуации (участок перегиба русла между двумя излучинами, обычно устойчивый в плане).

Смещение вогнутого берега в районе вершины нижней излучины составит за прогнозируемый период от 500 м до 600 м, исходя из современных темпов ее деформации.

Вместе с тем, с учетом специфики руслового процесса Нижнего Иртыша прогноз предполагает возможность спрямления верхней излучины по прикорневой части ее пляжа, либо по одному из староречий на левобережном пойменном массиве. Образованию такого спрямляющего рукава может способствовать цикл многоводных лет, включающий в себя один или несколько лет с расходами воды редкой (1 %, 2 % или 3 %) повторяемости, и (или) значительно возросшее (по какой-либо причине) поступление русловых наносов в верхнюю излучину, способное вызвать заметное уменьшение ее пропускной способности.

#### **8.4.4. Варианты инженерных мероприятий, направленных на регулирование речного потока и руслового процесса**

С учетом составленного прогноза переформирований русла Иртыша на 50-летний период и основных задач исследования были намечены следующие варианты инженерных мероприятий для оценки их эффективности на гидравлической модели.

Устройство шпор у правого берега верхней излучины на лимитирующем участке проектируемой автодороги для защиты пойменного берега от размыва.

Три варианта запруд меженного регулирования в нижней излучине, отличающихся количеством запруд и отметкой их гребня, для увеличения таким способом расходов воды в Самаровской протоке для освобождения ее от скопившихся здесь русловых и взвешенных наносов.

Два варианта спрямляющего верхнюю излучину канала на левобережной пойме: длиной 5 км, шириной по верху 200 м, с отметкой дна 15 м БС (при отметках тальвега в основном русле на участках начала канала и его устья соответственно 10 и 5 м БС и с отметками бровок 25 м БС (не изолированный от поймы канал) и 28 м БС (изолированный от поймы дамбами канал, не испытывающий влияние пойменных течений и ветрового волнения)). Устье канала несколько ниже по течению приверха о. Самаровский.

Четыре варианта спрямляющего канала длиной около 4 км, совмещенного началом с первоначальным вариантом 5-километрового канала и устьем сопрягающегося с началом Самаровской протоки: в подвариантах ширина по верху 200 м, отметка дна 15 м БС, не изолированный от поймы и изолированный защитными дамбами от пойменных течений и ветрового волнения канал; ширина по верху 300 м, с отметкой дна 15 м БС, и ширина по верху 200 м, с отметкой дна 13 м БС.

Спрямляющий канал длиной около 4 км, шириной по верху 200 м с отметкой дна 13 м БС в сочетании с реконструированной Самаровской протокой (ширина прорези в протоке 200 м по верху, 150 м по низу, отметка дна 13 м БС, протяженность прорези около 5 км). Устройство прорези в протоке предполагает увеличение пропускной способности и нормализацию условий транзитного судоходства (в том числе и на акватории речного вокзала).

Все перечисленные варианты инженерных мероприятий и естественные условия движения речного потока на гидравлической модели исследовались при четырех расходах воды: 1060 м<sup>3</sup>/с (межень), 6250 м<sup>3</sup>/с (наполнение русла до бровок), 9390 м<sup>3</sup>/с (расход половодья обеспеченностью 10%) и 13 200 м<sup>3</sup>/с (расход половодья обеспеченностью 1,0%).

#### **8.4.5. Гидравлическая модель р. Иртыш**

Гидравлическая модель включала участок реки протяженностью по руслу около 22,5 км (от 15,5 до 38,0 км судового хода по лоции 1991 г.) с элементами правого и левобережной поймы. Этим условиям соответствует участок территории длиной около 14 км (направление запад-восток) и шириной около 8 км (направление север-юг).

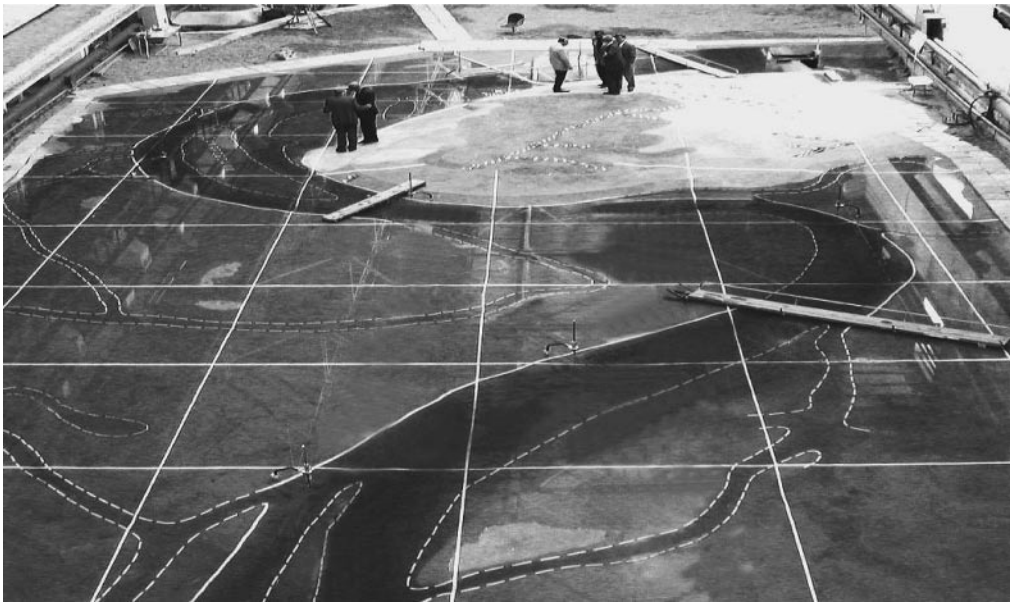


Рис. 8.26. Общий вид модели с руслом в естественном состоянии. Вид по течению

Модель была выполнена в жестком варианте в горизонтальном масштабе 1:500 и в вертикальном масштабе 1:200, т. е. с 2,5-кратным искажением рельефа. В этих масштабах и с некоторой дополнительной шероховатостью поверхности модель обеспечивала условия кинематического ( $Re_m > Re_{кр}$ ) и динамического ( $Fr = idem$ ) подобия. Общий вид модели в естественном состоянии участка реки приведен на рис. 8.26.

На модели измерялись следующие гидравлические характеристики и оценивались следующие процессы, применительно к разным расходам воды (приведенным выше) и к разным вариантам инженерных руслорегулирующих мероприятий.

- Расходы воды в 3 гидростворах.
- Уровни воды в 8 пунктах.
- Поле поверхностных скоростей в пределах всех рукавов русла, проток и затопленной поймы (фотографированием светящихся поплавков).
- Придонные скорости течения на лимитирующем участке проектируемой автодороги (микровертушкой с лопастным винтом диаметром 6 мм).
- Структура поверхностных течений (поплавками) и придонных течений (краской нигрозин).
- Выполнена оценка устойчивости дноуглубительной прорези в Самаровской протоке и русла спрямляющего канала.
- Выполнена оценка возможного состояния (подвижности) влекомых наносов путем сопоставления измеренной средней скорости на модели с неразмывающей скоростью, рассчитанной по формуле В.Н. Гончарова [67, 269].
- Выполнена оценка возможных форм транспорта речных наносов путем сопоставления их гидравлической крупности с расчетными значениями

вертикальной компоненты пульсационной скорости и с расчетными значениями размаха пульсации продольной компоненты пульсационной скорости вблизи дна.

- Получены характеристики грядовых форм движения русловых наносов в спрямляющем канале и в судоходной прорези в Самаровской протоке (с помощью мелких замоченных древесных опилок).

Комплексный анализ результатов экспериментов, полученных в ходе проработки на гидравлической модели перечисленных выше вариантов инженерных мероприятий, регулирующих русло и речной поток, с учетом особенностей гидрологического режима и руслового процесса Нижнего Иртыша привел к выводу рекомендовать устройство спрямляющего канала, сопрягающегося с началом Самаровской протоки (в реконструированном ее виде), в качестве наиболее эффективного средства решения задач в поставленной проблеме.

Канал имеет ширину по верху (на отметке пойменных бровок, равной 25 м БС) 200 м, отметку дна 13 м БС, заложение откосов 2,0, ширину по дну 150 м, протяженность 4,0 км. Самаровская протока имеет ширину по верху 200 м, отметку дна 13 м БС, заложение откосов 2,0, ширину по дну около 150 м, протяженность около 5 км.

При этих гидравлических параметрах канала и Самаровской протоки в них формируются следующие расходы воды, скорости течения и уклоны потока (при общем расходе воды в реке 6250 м<sup>3</sup>/с, наполняющем русло до уровня его бровок): соответственно 1943 м<sup>3</sup>/с, 1,09 м/с, 0,000030 (в канале) и 1658 м<sup>3</sup>/с, 1,13 м/с, 0,000043 (в протоке). При таких характеристиках потока в спрямляющем канале и в Самаровской протоке будет обеспечиваться транспорт русловых наносов крупностью даже около 1,0 мм. Имитацией русловых наносов на модели древесными замоченными опилками показано, что наносы в спрямляющем канале и в Самаровской протоке могут перемещаться в форме донных гряд.

Общий вид гидравлической модели с рассмотренным вариантом руслорегулирующих мероприятий приведен на рис. 8.27. Физический механизм этого варианта руслорегулирующих мероприятий заключается в отклонении течением канала вод основного русла к правому берегу и таким образом в исключении тиховодной зоны и аккумуляции речных наносов на этом участке Самаровской протоки. Вместе с тем канал, начинаясь в вершине слабовыраженной и устойчивой излучины, забирает из нее сравнительно небольшое количество наносов, которые, вливаясь снова в основное русло, направляются его потоком в нижнюю излучину, не достигая Самаровской протоки.

Таким образом, в Самаровской протоке этими мероприятиями создаются условия, обеспечивающие нормальный режим для транзитного судоходства и на подходах к речному вокзалу. В то же время это способствует устойчивости судоходной прорези в многолетнем разрезе. Отвлекаемый каналом из основного русла расход воды способствует уменьшению скоростей течения в верхней излучине, в частности вдоль правого пойменного берега, и, следовательно, уменьшению его размыва.





Рис. 8.27. Общий вид модели с руслом в проектных условиях (спрямляющий канал).  
Вид по течению

Вместе с тем, впадающий в нижнюю излучину поток спрямляющего канала формирует вдоль левого берега верхней ветви излучины протяженную гидродинамическую тень, которая в совокупности с уменьшенным расходом воды за счет Самаровской протоки будет способствовать сильному уменьшению темпов размыва левого берега излучины и, следовательно, сохранению нормальной гидравлической ситуации на участке автодорожного моста, в частности, сохранению судового хода в центральном 230-метровом пролете этого моста.

Под русло спрямляющего канала потребуется извлечь из левобережного пойменного массива около 9,5 млн м<sup>3</sup> грунта, а для организации судоходной прорези в Самаровской протоке из ее русла потребуется извлечь около 2,5 млн м<sup>3</sup> грунта. Извлеченный из русел канала и протоки грунт транспортируется затем на правобережный пойменный массив, предусмотренный в перспективе под городскую застройку.

Необходимо отметить, что разработанный вариант регулирования русла, хотя и способствует уменьшению интенсивности размыва вогнутого пойменного берега верхней излучины, тем не менее, не исключает его полностью. Поэтому рекомендуется этот вариант регулирования дополнить мероприятиями по защите пойменного берега от размыва одним из известных способов (береговые полузапруды, шпунтовая стенка, каменнонабросной банкет), а на лимитирующем участке проектируемой автодороги, возможно, и устройством эстакады.

## 8.5. Гидравлическое моделирование пропуска половодий по пойме Иртыша в естественных и проектных условиях

В настоящем разделе представлен пример гидравлического моделирования пропуска половодий по пойме Иртыша на основе метода Винкеля, усовершенствованного М.М. Гендельманом.

Задача исследования состояла в выборе оптимального створа для размещения гидроузла по условиям наименьшего влияния на естественный режим пропуска половодий по пойме (наименьшему увеличению пойменных расходов и скоростей течения на пойме). Подробные сведения об этих исследованиях содержатся в работе [59]. Здесь приведем лишь краткую информацию об этих опытах.

В качестве масштабных коэффициентов для пересчета значений скоростей и расходов воды с модели на натуру использовались зависимости:

$$\alpha_v = \alpha_H^{5/7} \alpha_l^{4/7} \quad (8.3)$$

и

$$\alpha_Q = \alpha_L \alpha_H^{12/7} \alpha_l^{4/7}, \quad (8.4)$$

вытекающие из зависимости:

$$\frac{C}{\sqrt{g}} = 1,16 Re^{1/8}, \quad (8.5)$$

полученной М.М. Гендельманом [58] для меандрирующих участков рек при наполнении русла водой до уровня бровок их берегов, в развитие общей зависимости (7.1) Р. Винкеля [117]:

$$C = 7,42 Re^{1/8}.$$

Участок моделирования, протяженностью по руслу около 80 км, охватывал три последовательных сужения поймы (рис. 8.28, 8.29). Плановый масштаб модели был принят равным 2000, а вертикальный — 100. Для условий решаемой задачи, сводящейся к исследованию гидравлических характеристик пойменного потока крупной меандрирующей реки, принятое 20-кратное искажение линейных масштабов модели представляется допустимым, имея в виду большое значение отношения ширины поймы к ширине русла и глубине потока в русле.

Отсутствие необходимой для расчета и тарировки модели исходной информации о редких паводках на исследуемом участке потребовало принятия некоторых допущений. В частности, в любые паводки и в период межени разность отметок свободной водной поверхности в начальном и конечном створах моделируемого участка была принята неизменной. Это предположение оправдано тем, что участок имеет достаточно большую протяженность. Результаты выполненных измерений уклонов в меженный период и меток высоких вод подтверждают правомерность принятого допущения. Согласно этим данным, перепад



Ри. 8.28. Общий вид гидравлической модели р. Иртыш

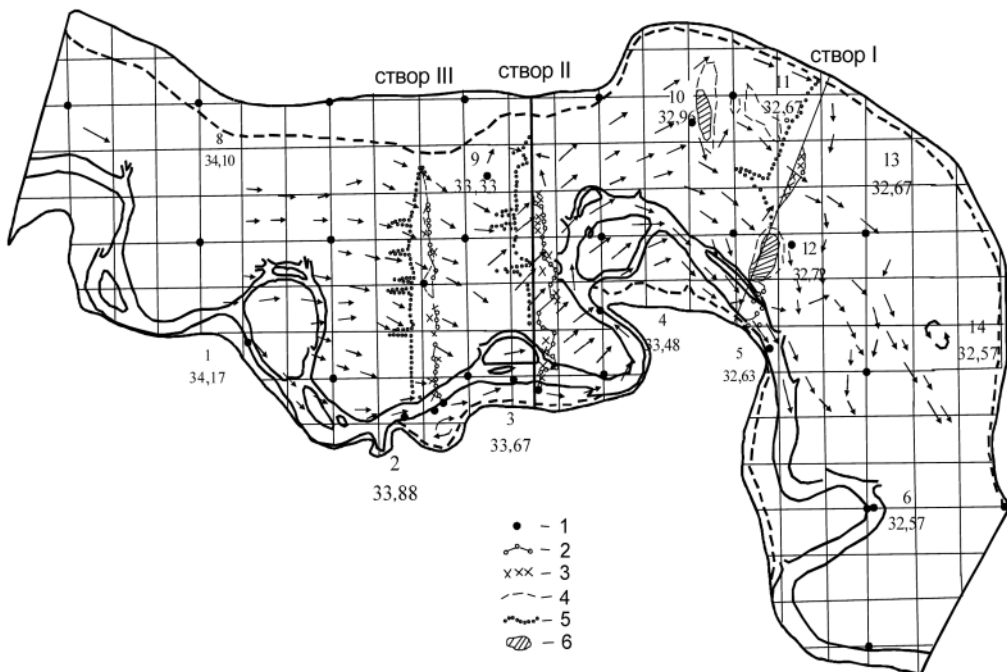


Рис. 8.29. Схема исследуемого участка и план течений в половодье 0,1 %-ной обеспеченности (по данным эксперимента с лесом): 1 – в числителе номер тастера, в знаменателе уровень воды; 4 – граница затопления поймы; 2, 3 – эпюра скоростей течения в эксперименте соответственно без леса, с лесом; 5 – поперечное сечение пойменного потока; 6 – останцы

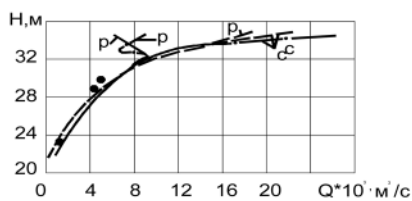


Рис. 8.30. Кривые связи расходов и уровней воды в створе III:

- 1 – экспериментальная с лесом;
- 2 – то же без леса; 3 – расчетная;
- 4 – натурные измерения; с – суммарная;
- ρ – основного русла

водной поверхности между пунктами, которым на модели соответствуют тастеры 1 и 7, составляет 1,5 м. Кроме того, исследования на модели производились при различных, но каждый раз установившихся режимах.

Принятые допущения позволили получить кривые связи расходов и уровней воды в исследуемых створах (рис. 8.30).

Основную часть исследований на модели составляли три серии экспериментов. Каждая серия соответствовала одному из половодий 0,01; 0,1 и 1 %-ной обеспеченности и включала исследования гидравлических характеристик руслового и пойменного потоков в условиях бытового режима, а также при полном ( $\omega_c/\omega=1$ ) и частичном ( $\omega_c/\omega=0,5$ ) стеснении площади сечения основного русла в трех створах. Неполное стеснение осуществлялось симметричным перекрытием русла у обоих берегов по всей глубине потока.

Вместе с тем был рассмотрен вопрос о влиянии леса на результаты исследований пропуска паводков по пойме. С этой целью перечисленный комплекс экспериментов, выполненный на модели, воспроизводящей лишь рельеф местности, был повторен с учетом пойменных лесных массивов. Диаметр цилиндрических стержней (10 мм), имитирующих деревья, и расстояние между ними (11 см) были выбраны в соответствии с натурными данными о густоте леса и реальной возможностью проведения необходимых измерений на модели. Первое условие заключается в обеспечении на модели натурального значения отношения части площади лесного массива, занятой стволами деревьев, к части, свободной от стволов.

В результате экспериментов, для всех трех створов I, II и III (рис. 8.29), соответственно для половодий 0,01, 0,1 и 1 %-ной обеспеченности при различной величине стеснения русла  $\omega_c/\omega$  от 0 до 1 были получены графические зависимости отношения пойменного расхода воды к суммарному расходу  $Q_n/Q$ , зависимости максимальной скорости течения по пойме и зависимости подпора в верхнем бьефе сооружения.

В табл. 8.7 представлены характеристики расходов воды и скоростей течения пойменного потока в исследуемых створах в бытовых условиях по данным экспериментов без леса и с лесом.

Из этой таблицы следует, что лес, оказывая влияние на абсолютные величины расходов воды в русле и на пойме, практически за редким исключением не изменяет их соотношения.

В табл. 8.8 представлены результаты сравнения величин  $Q_n/Q$  для различных обеспеченностей половодья в створах I и III по данным экспериментов и гидравлических расчетов.

Данные, полученные в результате исследований, дают основание утверждать, что наименьшее влияние от введения в основное русло сооружений ис-

**Таблица 8.7. Характеристики расходов воды и скоростей течения пойменного потока в исследуемых створах в бытовых условиях (по данным экспериментов)**

Опыты	Створ измерений	$Q_n/Q$		$V_{n, макс}$ , м/с	
		без леса	с лесом	без леса	с лесом
<i>Серия I, половодье 0,01 %-ной обеспеченности</i>					
1	I	0,30	0,19	0,80	0,45
	II	0,74	0,73	1,30	0,80
	III	0,66	0,71	0,90	0,70
<i>Серия II, половодье 0,1 %-ной обеспеченности</i>					
8	I	0,11	0,15	0,50	0,40
	II	0,61	0,56	1,35	1,10
	III	0,54	0,55	1,00	0,75
<i>Серия III, половодье 1 %-ной обеспеченности</i>					
15	I	0,09	0,14	0,10	0,10
	II	0,39	0,38	0,85	0,80
	III	0,41	0,29	0,70	0,60

**Таблица 8.8. Сравнение данных экспериментов и гидравлических расчетов**

Обеспеченность половодья, %	$Q_n/Q$ по данным экспериментов		$Q_n/Q$ по данным гидравлического расчета	
	створ I	створ III	створ I	створ III
0,01	0,19	0,71	0,26	0,14
0,1	0,15	0,55	0,18	0,09
1,0	0,14	0,29	0,14	0,12

пытывает створ III. Максимальные скорости течения по пойме в этом створе при любых условиях не превышают 1,6 м/с. Скорости течения на пойме во всех створах не настолько велики, чтобы следовало опасаться непосредственно угрожающих сооружениям локальных размывов поймы за короткий период и, тем более, смещения руслового потока и русла в обход гидроузла.

Таким образом, по условиям режима пойменных течений в качестве наиболее целесообразного створа размещения гидроузла может быть рекомендован створ III, в котором строительство русловых сооружений приводит к наименьшему увеличению пойменных расходов и скоростей течения и, следовательно, требует минимального числа водопропускных отверстий, а значит и минимальных затрат.

Глава 9  
**О ГИДРАВЛИЧЕСКОМ МОДЕЛИРОВАНИИ  
НА ДЕФОРМИРУЕМЫХ МОДЕЛЯХ РЕЧНЫХ РУСЕЛ  
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЗАМЕНИТЕЛЕЙ НАНОСОВ**

**Введение**

Как известно, полное гидромеханическое подобие, подобие руслового процесса, русловых форм и транспорта наносов на гидравлических моделях речных русел соблюдается лишь на неискаженных деформируемых моделях рек, сложенных из крупного аллювия. В этом случае обеспечивается геометрическое подобие донных наносов — крупность донных частиц на модели воспроизводится в масштабе глубины потока [117, 142, 144, 145, 385, 444]. При моделировании участков рек, сложенных из песка, т. е. равнинных рек, уменьшение крупности частиц в геометрическом масштабе модели невозможно, так как приводит к микроскопическим размерам песка, обладающего свойством сцепления между частицами, не характерным для песка крупностью более 0,2 мм. Поэтому для приведения частиц песка в движение на таких моделях возникает необходимость «форсировки числа Фруда», либо увеличения уклона дна и водной поверхности путем искажения линейных масштабов модели (уклон увеличивается в число искажений раз), либо дополнительного наклона дна без искажения линейных масштабов. Во избежание или минимизации отмеченных выше процедур, в практике большинства зарубежных и отечественных гидравлических лабораторий вот уже более 100 лет прибегают к использованию различных легких заменителей песка.

Первая попытка использования заменителей наносов на гидравлических моделях речных русел с подвижным дном была предпринята уже в 1886 г. Вернон-Гаркутом в лабораторных исследованиях улучшения условий судоходства на устьевом участке р. Сены. Этот опыт использования вместо песка синтетического материала, по свидетельству автора, оказался неудачным, т. к. «уплотнение опытного материала в ходе экспериментов препятствовало размыву дна» [464].

С созданием первой в мире гидротехнической лаборатории в Германии в 1898 г. и неуклонным ростом их числа в первой половине XX века заменители песка стали применяться во многих гидравлических лабораториях мира. Впервые в России заменители наносов на моделях речных русел были использованы в лаборатории В.Е. Тимонова при Петербургском институте инженеров путей сообщения в лабораторных исследованиях улучшения судоходных условий р. Гдовки в 1908 г. В качестве заменителя песка на деформируемой модели использовалась гречневая крупа. В исследованиях заносимости Рыбницкого затона на р. Днепр в этой же лаборатории в 1909–1910 гг. использовался измельченный уголь — «угольный порошок» [64, 117].

В известной гидравлической лаборатории Германии в Карлсруэ Т. Ребоком в 20-х годах XX столетия в качестве заменителя естественного песка на моделях использовались вулканический песок с плотностью  $1,3 \text{ г/см}^3$  и янтарь в виде янтарной крошки или порошка с плотностью  $1,02\text{--}1,10 \text{ г/см}^3$ . В специальной литературе 20–40-х годов имеются и другие указания о применении различных видов заменителей песка на деформируемых моделях: в США — асфальтового песка, керамзита, угольного порошка, синтетических материалов, битума и различных смол; в СССР — древесных опилок хвойных пород и каменного угля; в Голландии (Дельфт) — пемзы; в Швейцарии (Цюрих) — лигнита (бурый уголь) [117] и т. д.

Подводя итог довоенного периода по применению заменителей наносов на деформируемых моделях, А.П. Зегжда в 1938 г., на наш взгляд совершенно справедливо, отмечал: «К сожалению, в опубликованной литературе авторы статей ограничиваются лишь упоминанием о применении в лаборатории того или иного материала и не дают никаких указаний относительно методики расчета и работы с этими материалами» [96]. В известной мере приведенное замечание Зегжды оказалось справедливым и для послевоенного периода, включая существующую в настоящее время практику использования заменителей песка на деформируемых моделях.

В настоящей главе по возможности подробно рассмотрен круг вопросов, связанных с использованием заменителей наносов на деформируемых моделях речных русел: виды и свойства заменителей, существующий опыт их изучения и использования в гидравлических лабораториях за рубежом и в России, результаты исследований, выполненных по этой проблеме в Русловой лаборатории ГГИ, а также рекомендации авторов настоящей монографии по перспективе дальнейшего изучения и использования легких заменителей песка в лабораторных исследованиях и гидравлическом моделировании транспорта наносов в реках и руслового процесса.

## **9.1. Виды и физико-механические свойства заменителей наносов**

Круг поиска легких заменителей песка для их использования на гидравлических деформируемых моделях речных русел оказался весьма широким. Прежде всего, это сыпучие материалы или материалы, которым можно легко придать сыпучее состояние путем механического дробления или химических реакций в диапазоне удельного веса  $1,05\text{--}2,50 \text{ г/см}^3$ . Заменители могут быть естественного или искусственного происхождения. Наряду с физико-механическими и гидродинамическими свойствами, удобство получения заменителей в нужном объеме является важным, а иногда решающим обстоятельством для практического их использования на деформируемых моделях.

Все разнообразие заменителей, используемых на деформируемых гидравлических моделях, можно разбить на несколько групп. Прежде всего, это ископаемые угли: лигнит, бурый уголь и антрацит, которые в зависимости от метаморфизма могут иметь удельный вес (плотность) в широких пределах ( $1,1\text{--}1,75 \text{ г/см}^3$ ), а также кокс с удельным весом  $1,8\text{--}2,0 \text{ г/см}^3$ .

Следующую большую группу составляют искусственные органические вещества: асфальт, битум, эбонитовая пыль, акрилат, полистирол (синтетический полимер), пластик, бакелит (синтетическая смола), *PVC* (поливинилхлорид), нейлон, *Perspex*, гильзонит (чистый битум), полистерин.

В группу заменителей, получаемых из вулканических и других естественных горных пород и природных органических веществ, входят: пемза, туф, вулканический песок и пепел, мел (известняк), янтарь, канифоль.

В гидравлических, русловых лабораториях широко используются также искусственные материалы, такие как: керамзит, шлак, угольная изгарь и паровозная зола, дробленый кирпич (кирпичный песок), шамотный порошок (молотая, обожженная глина угловатой формы), стеклянные шарики, а также древесные опилки.

Еще одна группа заменителей наносов, популярная в некоторых лабораториях, получается из продуктов с/х производства. Это — зола рисовой шелухи и дробленая скорлупа грецких орехов, абрикосовых косточек, миндального ореха и земляных орехов.

У перечисленных выше заменителей наносов их физико-механические свойства, такие как: форма частиц, крупность, плотность, связность, гидрофобность (несмачиваемость) или гидрофильность (смачиваемость), а также выветриваемость, растворимость в воде, подверженность флокулированию или разложению в воде, электростатичность и др., варьируют в широких пределах. Многие из этих свойств поддаются изменению с помощью специальной обработки, как например с древесными опилками. По С.В. Избашу [96], плотность опилок свежесрубленной породы составляет: березы —  $1,09 \text{ г/см}^3$ , ели —  $1,23 \text{ г/см}^3$ , дуба —  $1,28 \text{ г/см}^3$ . В различных лабораториях используются различные приемы искусственной обработки опилок для доведения их до кондиции, пригодной к использованию в качестве наносов на деформируемых моделях [97, 375, 414].

В послевоенный период заменители наносов использовались в ряде лабораторий СССР. Наиболее широко в практике моделирования на деформируемых моделях заменители использовались в Среднеазиатском научно-исследовательском институте ирригации им. В.Д. Журина в Ташкенте (САНИИРИ).

В период 1947–1958 гг. в качестве заменителей в САНИИРИ использовались: шлаковый песок крупностью 0,18 мм, плотностью  $1,70\text{--}1,85 \text{ г/см}^3$ ; паровозная угольная изгарь крупностью 1,08 мм, плотностью  $1,8 \text{ г/см}^3$ ; зола рисовой шелухи крупностью 0,13–0,15 мм, плотностью  $2,12\text{--}2,28 \text{ г/см}^3$ ; а также паровозная угольная изгарь крупностью 4,0 мм и плотностью  $1,4 \text{ г/см}^3$ . Позднее в САНИИРИ в качестве заменителей использовались также молотый жженый кирпич и молотый мел, керамзит [162, 194, 195, 245] и древесные опилки [245].

Единственная известная нам попытка систематизировать за пределами одной лаборатории информацию о видах и физико-механических свойствах заменителей наносов, используемых в лабораторных исследованиях, принадлежит Веллингфордской гидравлической лаборатории (Великобритания) со-



вместно с МАГИ и гидравлической лабораторией в Дельфте (Нидерланды). Результаты этой инициативы были опубликованы Р. Беттесом в 1990 г. [316]. Было опрошено 16 гидравлических лабораторий в 11 странах мира, в результате чего была получена информация о 14 разновидностях заменителей песка в диапазоне плотностей 1,05–1,70 г/см<sup>3</sup> и крупности частиц 0,2–4,0 мм. Ниже представлена итоговая таблица, составленная в результате опроса.

**Таблица 9.1. Удельный вес и виды заменителей песка по материалам опроса 16 гидравлических лабораторий мира**

Удельный вес, г/см <sup>3</sup>	Материал
1,0–1,1	Полистирол, опилки с асфальтом
1,1–1,2	Нейлон, Perspex, PVC (поливинилхлорид), дерево
1,2–1,3	ABS (акрилатбутадиенстирол), бакелит, PVC
1,3–1,4	Бакелит, уголь, скорлупа орехов (грецких, земляных)
1,4–1,5	Бакелит, уголь, песок Луары
1,5–1,6	Уголь, песок Луары
1,6–1,7	Зола, шлак

К сожалению, работа [316] ставила целью лишь выявление и инвентаризацию видов заменителей, используемых в различных гидравлических лабораториях. Информация об их практическом использовании разбросана в огромном количестве отдельных статей и научно-исследовательских отчетов и еще не систематизирована.

## **9.2. Информация об использовании заменителей наносов в различных гидравлических лабораториях мира**

В табл. 9.2 и 9.3 приведены сведения об использовании различных заменителей наносов на деформируемых моделях речных русел в различных лабораториях мира. Эти таблицы, не претендующие на полноту изложения информации по этой проблеме, наглядно демонстрируют, сколь разнообразна география, спектр задач, виды и условия использования заменителей донных наносов в лабораторных исследованиях. А подробное ознакомление с идейно-методической базой этих исследований не оставляет никакого шанса на возможность сколько-нибудь последовательной классификации или систематизации всего разнообразия взглядов, методических подходов и приемов, используемых различными исследователями при постановке модельных исследований с использованием заменителей наносов и интерпретации результатов этих исследований, носящих исключительно качественный характер.

**Таблица 9.2. Сведения об использовании угля в качестве заменителя наносов на деформируемых гидравлических моделях речных русел**

№ п/п	Объект исследования	Характеристики модели и заменителя		Задача исследования	Источник информации
		Геометрические масштабы модели: горизонт. / вертикал.	Плотность, г/см <sup>3</sup> Ср. крупность заменителя, мм		
1	2	3	4	5	6
1	р. Рейн, г. Дюссельдорф	<u>150</u> 150	<u>1,27</u> 1,00	Обеспечение условий судоходства	[349]
2	р. Рейн у Зондерхейма	<u>100</u> 100	<u>1,27</u> 1,00	Регулирование русла	[349]
3	р. Огайо, г. Манчестер	<u>300</u> 80	—	Исследование судоходных условий	[60]
4	р. Рейн выше Женевского оз.	<u>100</u> 100	<u>1,25</u> 1,0–3,0	Регулирование русла	[181]
5	р. Беас, Индия	<u>100</u> 100	<u>1,52</u> 4,0	Обеспечение водозабора выше плотины Пандон	[355]
6	р. Дунай	<u>300</u> 100	<u>1,39</u> 1,15	Регулирование русла и улучшение судоходных условий	[411]
7	р. Эльба	<u>60</u> 60	<u>1,39</u>	Обеспечение водозабора из реки	[411]
8	р. Вах	<u>250</u> 100	<u>1,40</u> 11,0	Занесение наносами водохранилища	[411]
9	р. Ишикари, Япония	<u>50</u> 50	<u>1,44</u> 0,16	Разработка противопаводковых мероприятий (уширение русла)	[370]
10	р. Янцзы, гидроузел Гецоуба	<u>150</u> 150	<u>1,33</u>	Компоновка гидроузла, занесение бьефа, судоходные условия	[459]
11	р. Арканзас		1,35	Разработка мероприятий по улучшению судоходства	[60]
12	р. Нагара, устьевой участок	<u>100</u> 64	— 0,35	Учет руслового процесса при проектировании устьевой плотины и выемок аллювия	[256]
13	р. Тонэ	<u>100</u> 50	—	Русловой процесс в естественных и проектных условиях	[256]
14	р. Оя, устьевой участок	<u>50</u> 50	— 0,40	Регулирование русла	[256]

1	2	3	4	5	6
15	р. Тонэ, г. Сахара	$\frac{60}{40}$	—	Русловой процесс в естественных и проектных условиях	[256]
16	р. Нагара	$\frac{60}{40}$	$\frac{0,21}{0,21}$	Обоснование проекта регулирования русла на устьевом участке	[256]
17	р. Момма	$\frac{50}{50}$	—	Обоснование проекта русла водоотвода	[256]
18	р. Дунай, Кикийский рукав, г. Измаил	$\frac{150}{150}$	$\frac{1,38}{0,29}$	Русловой процесс Кикийского рукава р. Дунай для обеспечения судоходных условий	Русловая лаборатория ГГИ
19	р. Иртыш, г. Павлодар	Переменные масштабы	$\frac{1,30}{0,29}$	Рекомендации по обеспечению надежности эксплуатации подводного перехода магистрального нефтепровода	Русловая лаборатория ГГИ

Таблица 9.3. Сведения об использовании различных видов заменителей наносов на деформируемых гидравлических моделях речных русел

Вид заменителя	Объект исследования	Характеристики модели и заменителя		Задача исследования	Источник информации
		Геометрические масштабы модели: горизонтальные, вертикальные	Плотность, г/см <sup>3</sup> средняя крупность заменителя, мм		
1	2	3	4	5	6
Бакелит	р. Воол	$\frac{100}{40}$	$\frac{1,40}{0,7}$	Улучшение судоходных условий	[373]
	р. Нил	$\frac{150}{37,5}$	$\frac{1,40}{0,68}$	То же	[449]
	р. Заир	$\frac{100}{500}$	$\frac{1,40}{-}$	Обеспечение судоходных условий	[416]
	р. Нил, Судан			То же	[449]
	р. Восточный Мор	$\frac{100}{50}$	$\frac{1,40}{0,60}$	Определение влияния низконапорной плотины на русловой процесс	[430]
	р. Янцзы у Гецоуба	$\frac{200}{10}$	$\frac{1,45}{-}$	Научное обоснование проекта Гецоуба	[359]
	р. Рона у р. Дром	$\frac{300}{175}$	$\frac{1,33}{1,50}$	Изучение руслового процесса у слияния рек Рона и Дром	[410]

1	2	3	4	5	6
Древесные опилки	р. Янцзы у Шатанзи	$\frac{800}{125}$	$\frac{1,04}{0,50}$	Исследование влияния спрямления русла на русловой процесс	[414]
	р. Янцзы у Жонгхоузи	$\frac{1000}{120}$	$\frac{-}{0,40}$		[414]
	р. Махавели Ганг у Полгола, Шри-Ланка	$\frac{72}{72}$	$\frac{1,10}{0,85}$	Определение условий водозабора в отводящий канал выше барража	[375]
Шлаковый песок	р. Сырдарья	$\frac{100}{100}$	$\frac{1,70-1,85}{0,18}$	Исследование компоновки сооружений Кызыл-Ординского гидроузла и прогноз русловых переформирований в зоне его влияния	[117]
Паровозная угольная изгарь	р. Сырдарья	$\frac{200}{25}$	$\frac{1,8}{1,08}$	То же	[117]
	р. Амударья	$\frac{500}{50}$	$\frac{1,4-1,8}{1,09}$	Исследование компоновки сооружений Тахиаташского гидроузла, включая подводящее русло, и режима деления наносов	[9]
Зола рисовой шелухи	р. Амударья	$\frac{150}{150}$	$\frac{2,12}{0,21}$	Компоновка сооружений Голодностепнинской ГЭС и прогноз русловых переформирований в бьефах ГЭС	[117]
			$\frac{2,28}{0,14}$	Исследование компоновки сооружений Тахиаташского гидроузла	[117]
Молотый жженный кирпич	р. Амударья	$\frac{1250}{100}$	–	Прогноз русловых деформаций р. Амударьи в зоне влияния Тюяму-юнского гидроузла	[10]
Керамзит	Главный канал переброски части стока сибирских рек в Центральную Азию	$\frac{50}{20}$ $\frac{40}{40}$	$\frac{2,1}{0,49}$	Обоснование геометрических и гидравлических характеристик Главного канала переброски части стока сибирских рек в Центральную Азию	[117]

1	2	3	4	5	6
Зола	р. Шеньжень Гонконг	$\frac{150}{40}$	$\frac{2,15}{-}$	Разработка мероприятий по увеличению пропускной способности русла (расширение и углубление)	[498]
Полистирин	р. Рейн	$\frac{100}{50}$	$\frac{1,08}{2,5}$	Боковой водозабор из р. Рейн	[336]
	р. Янцзы, Три ущелья	$\frac{250}{100}$	$\frac{1,06}{-}$	Влияние зоны выклинивания подпора от гидроузла Три ущелья на русловой процесс	[19]
	р. Эмс	$\frac{50}{25}$	$\frac{1,05}{-}$	Изучение режимов наносов в узле слияния для обеспечения судоходства	[349]
Терлуран	Гидравлический лоток		$\frac{1,22}{3,0}$	Изучение местных размывов у мостовых опор	[335]
Пластик	р. Янцзы, Три ущелья	$\frac{180}{180}$	$\frac{1,05}{-}$	Изучение руслового процесса в зоне выклинивания подпора гидроузла	[471]
Стеарин	Река в Африке	$\frac{180}{60}$	$\frac{1,04}{1,0}$	Изучение руслового процесса	[410]
	р. Луара у г. Орлеана	$\frac{150}{40}$	$\frac{1,04}{2,50}$	Изучение руслового процесса	[410]
Гильзонит	р. Св. Лоренса у г. Квебека	$\frac{10000}{500}$	$\frac{1,05}{0,5-3,0}$	Улучшение судоходных условий	[478]
Скорлупа земляных орехов	р. Миссури у г. Канзас-Сити	$\frac{150}{54}$	$\frac{1,33}{-}$	Разработка систем регуляционных сооружений для обеспечения судоходства	[456]
Полихлорвинил	Рейн-Майн-Донау и р. Регниц, узел слияния у Бамберга	$\frac{130}{90}$	$\frac{1,26}{3,0}$	Изучение судоходных условий в узле слияния	[436]

### 9.3. Экспериментальные исследования динамических свойств различных заменителей донных наносов. Опыты Хенг-Сенг Лоу и В.К. Дебольского

Логично, что прежде, чем для конкретной гидравлической модели будет выбран тот или иной заменитель, должны быть известны или предварительно исследованы его динамические свойства в условиях гидравлических режимов, подлежащих моделированию.

В практике гидравлических лабораторий чаще эти процедуры совмещают в тарировочных (наладочных) сериях экспериментов на самих моделях. Однако целесообразность специального исследования и поиска заменителей, наиболее пригодных для использования на русловых деформируемых моделях, была понята давно, свидетельством чему являются исследования ряда авторов, работавших и продолжающих работать в этом направлении.

Уже в 30-х годах XX века в Висксбургской лаборатории водных путей США были выполнены специальные лабораторные исследования движения в гидравлическом лотке различных фракций заменителей песка: керамзита, угля, гильзонита. Сведения об этих исследованиях приведены в табл. 9.4 [463].

Таблица 9.4. Сведения об экспериментальных исследованиях движения заменителей наносов в лотке, выполненных в США

Вид заменителя	Крупность частиц, мм	Удельный вес, г/см <sup>3</sup>	Количество опытов
Гильзонит	0,90	1,07	15
	3,55	1,07	14
Керамзит	0,91	1,85	28
	1,07	1,85	25
	1,33	1,74	27
	1,10	1,35	17
Уголь	1,48	1,32	18
	3,20	1,32	15
	3,30	1,35	14

В гидроэлектрической лаборатории ВНИИГа, руководимой И.В. Егiazаровым, в этот же период также были выполнены специальные экспериментальные исследования движения в гидравлическом лотке наносов из каменного угля. Исследовались три состава смеси наносов средней крупностью: 0,53 мм; 1,04 мм и 2,02 мм. Удельный вес угля составлял 1,5 г/см<sup>3</sup>. Эти исследования ставили целью дать оценку опытному материалу из угля, для выяснения его пригодности для последующего использования в модельных исследованиях головного узла сооружений Чирчикстроя. Были установлены неразмывающая скорость потока и влекущая сила, а также особенности транспорта наносов из угля, включая условия возникновения или отсутствия рифелей и гряд [200].

В Русловой лаборатории ГГИ Н.А. Котловой был выполнен большой цикл экспериментов в гидравлическом лотке длиной 30 м, посвященный сравнительному анализу образования гряд и антидюн из наносов однородного и разнородного состава естественной плотности и угля [156]. Там же З.Д. Копалиани исследовал динамические свойства наносов из керамзита различной крупности и плотности [136]. Хорошо известны также исследования Ж. Шобэра, Ж. Шовина [323] и других исследователей [171, 410, 419, 420].

Остановимся на двух наиболее подробных экспериментальных исследованиях, посвященных изучению движения заменителей наносов различной плотности при различных гидравлических режимах потока.

*Опыты Хенг-Сенг Лоу.* В опытах Хенг-Сенг Лоу, выполненных в гидравлической лаборатории Кентерберийского университета в Новой Зеландии и опубликованных в 1989 г. [364], изучался бесструктурный транспорт одной фракции заменителей наносов. Частицы представляли собой цилиндры, длина и диаметр которых составляли 3,5 мм. Они были изготовлены из пластика со свинцовым вкраплением. В зависимости от массы внесенного в пластик свинца достигалась различная плотность частиц от 1,17 г/см<sup>3</sup> до 2,46 г/см<sup>3</sup>. Опыты выполнялись в гидравлическом лотке со стеклянными стенками, с переменным уклоном. Длина лотка составляла 6,0 м, ширина — 0,155 м. Лоток был снабжен автономной рециркуляционной системой водоснабжения. Подача наносов в начале лотка, их съем в конце лотка и взвешивание осуществлялось автоматически. Измерения выполнялись для условий динамического равновесия транспорта наносов. Всего было выполнено 187 опытов. Диапазон изменения исходных гидравлических характеристик экспериментов представлен в табл. 9.5.

**Таблица 9.5. Диапазон изменения исходных гидравлических характеристик в опытах Хенг-Сенг Лоу**

Удельная плотность частиц, $s = \rho_i/\rho$	Расход воды $Q \times 10^{-3}$ , м <sup>3</sup> /с	Уклон дна $I \times 10^{-3}$	Расход наносов $q_T \times 10^{-3}$ , кг/с	Количество опытов
1,17	0,75–1,50	4,60–10,0	10–63	38
1,18	1,75–0,50	5,3–8,1	10–55	18
1,41	1,00–3,00	6,0–11,8	2–42	35
1,61	2,00–4,00	6,5–11,6	3–32	24
2,14	4,00–5,50	8,5–12,5	4–18	27
2,46	3,00–5,50	9,2–14,9	2–17	45

Используя информацию, имеющуюся в статье Хенг-Сенг Лоу, мы составили табл. 9.6, в которой представлен диапазон изменения основных гидравлических характеристик потока в этих опытах.

Экспериментами Хенг-Сенг Лоу было установлено, что расход донных наносов из заменителей плотностью 1,17–2,46 г/см<sup>3</sup> и крупностью 3,5 мм прямо пропорционален шестой степени динамической скорости потока и обратно пропорционален пятой степени гидравлической крупности частиц. В соответствии с этими экспериментами расход донных наносов из заменителей может быть выражен в форме:

Таблица 9.6. Диапазон изменения основных гидравлических характеристик потока в экспериментах Хенг-Сенг Лоу

Удельная плотность частиц $s = \frac{\rho_T}{\rho}$	Скорость потока, м/с	Глубина потока, м	Относительная* гладкость потока $\frac{H}{d}$	Число Фруда $Fr = \frac{v}{\sqrt{gH}}$
1,17	0,26–0,45	0,010–0,037	2,5–10,6	0,43–1,45
1,41	0,33–0,56	0,012–0,058	3,4–8,6	0,44–1,60
1,61	0,45–0,70	0,028–0,057	8,0–10,6	0,44–1,07
2,14	0,59–0,70	0,037–0,060	10,6–14,3	0,77–1,17
2,46	0,60–0,80	0,024–0,058	9,1–12,6	0,80–1,67

Примечание: \* в отдельных опытах относительная гладкость потока достигает 16–17.

$$q_T = 110 \frac{v_*^6}{w^5} d \quad (9.1)$$

или

$$q_T = 40 \left[ \frac{v_*^2}{gd(s-1)} \right] wd. \quad (9.2)$$

Обозначения в зависимостях (9.1) и (9.2) общепринятые:  $q_T$  — расход донных наносов;  $v_*$  — динамическая скорость;  $w$  — гидравлическая крупность;  $d$  — диаметр частиц;  $s = \frac{\rho_T}{\rho}$  — относительная плотность частиц.

Сравнение результатов опытов Хенг-Сенг Лоу с известными формулами для расхода донных наносов Шильдса (1936 г.), Мейэр-Петера и Мюллера (1948 г.), Бэгнольда (1956 г.), Ялина (1963 г.), Смата (1984 г.), Эйнштейна и Брауна (1950 г.) показали, что формулы Шильдса, Мейэр-Петера и Мюллера по сравнению с опытными данными дают завышенные значения расхода донных наносов, тогда как зависимости Бэгнольда и Ялина дают заниженные значения. Хорошее совпадение с опытными данными во всем диапазоне изменения плотности заменителя дают формулы Эйнштейна-Брауна и модифицированная Хенг-Сенг Лоу формула Смата, которая после введения в эту формулу параметра гидравлической крупности для частиц различной плотности получила вид:

$$q_T = \frac{6,42}{s-1} (\theta - \theta_{cr}) d v I^{0,6}, \quad (9.3)$$

где  $\theta$  и  $\theta_{cr}$  соответственно критерий Шильдса  $\theta = \frac{v_*^2}{gd(s-1)}$  и его критическое значение  $\theta_{cr} = 0,06$ .

Возвращаясь к табл. 9.6, можно видеть, что опыты Хенг-Сенг Лоу были выполнены в весьма ограниченном диапазоне глубин потока (0,01–0,06 м) и, соответственно, относительной гладкости потока  $\frac{H}{d} = 2,5–14,3$ . Только в нескольких опытах относительная гладкость потока  $\frac{H}{d}$  достигала значений 16–17, когда



начинают формироваться гряды из крупных частиц [135, 385, 386]. Отсюда понятно, почему в описанных экспериментах образование гряд не наблюдалось. Кроме того, в опытах Хенг-Сенг Лоу диапазон изменения числа Фруда составлял 0,43–1,67, что не характерно для равнинных рек, а характеризует горно-предгорные реки с крупным составом речного аллювия.

*Опыты В.К. Дебольского.* К настоящему времени наиболее полные экспериментальные исследования движения наносов в гидравлических лотках при их различной плотности выполнены В.К. Дебольским [87]. Эти опыты были поставлены в гидравлическом лотке длиной 12 м и шириной 0,34 м. Лоток имел замкнутую циркуляционную систему, в которой вода и наносы перемещались вместе.

Эксперименты проводились с двумя составами песков: люберецким и вольским, а также тремя заменителями: бакелитом — синтетическим порошком с частицами формы параллелепипеда, полистиролом — синтетическим материалом с частицами формы цилиндров и шамотным порошком — молотой обожженной глины с частицами угловатой формы.

Характеристики материалов, использованных в опытах Дебольского, представлены в табл. 9.7. Из этой таблицы следует, что использованные в опытах естественные и искусственные материалы значительно отличаются по размерам, плотности и гидравлической крупности.

**Таблица 9.7. Характеристики материалов, использованных в опытах Дебольского**

Наименование материала	$d$ , мм	$w$ , см/с	$\rho$ , г/см <sup>3</sup>	Неоднородность материала $\frac{d_{15}}{d_{85}}$
Полистирол	4,50	4,3	1,05	0,60
Бакелит	0,37	1,2	1,41	0,45
Шамотный порошок	0,21	2,0	2,20	0,55
Люберецкий песок	0,25	2,9	2,65	0,64
Вольский песок	0,65	8,7	2,65	0,62

В опытах исследовались: неразрывающие скорости потока, геометрические и динамические параметры гряд, процессы смыва гряд и перемещения наносов во взвешенном состоянии, а также общий расход наносов.

Геометрические и динамические характеристики гряд снимались после их полной стабилизации. Для определения сдвигающей скорости потока на основе опытов Дебольский получил:

$$v_0 = 1,4w \left[ \left( \frac{\sqrt{gd_{50}}}{m} + 1 \right) \left( \frac{1}{\sqrt{\rho'} + 1} \right) \lg \frac{h}{d} \right]^{\frac{7}{6}}. \quad (9.4)$$

Эмпирические зависимости, полученные Дебольским, соответственно для высоты и скорости движения гряд имеют вид:

$$\frac{h_r}{h} = 1,25 \left( \frac{v}{v_0} \frac{d}{h} \frac{w}{\sqrt{gh}} \right)^{\frac{1}{5}}; \quad (9.5)$$

$$\frac{C_r}{\sqrt{gd}} = 0,001 \left( \frac{v}{v_0} \sqrt{\frac{w}{v_0}} \frac{h}{h_r} \right)^{\frac{1}{5}}. \quad (9.6)$$

В результате выполненного исследования были найдены зависимости для определения твердого расхода при грядовом режиме движения наносов и гладкой фазе движения наносов. Установлен приближенный критерий перехода грядовой формы дна в гладкую фазу движения наносов, а также области устойчивого существования гладкого и грядового дна:

$$\frac{v^2}{w} \sqrt{\frac{d}{h}} > 100 \text{ см/с} \quad \text{— гладкое дно,}$$

$$10 \text{ см/с} < \frac{v^2}{w} \sqrt{\frac{d}{h}} < 100 \text{ см/с} \quad \text{— грядовое дно.}$$

В табл. 9.8 представлены результаты экспериментов по определению параметров гряд в опытах Дебольского. Из таблицы следует, что отношение длины гряды к глубине потока в опытах с полистиролом составляет 4–8, тогда как в опытах с бакелитом составляет 1–2, т. е. значительно меньше. Это обстоятельство, на наш взгляд, имеет принципиальное значение, т. к. приводит к качественным различиям гряд из бакелита по сравнению с грядами из песка.

**Таблица 9.8. Результаты экспериментов по определению параметров гряд с заменителями наносов**

$h$ , см	$v$ , см/с	$h_r$ , см	$\lambda_1$ , см*	$C_r$ , см/с	$Fr$
Бакелит					
8,5	34,5	2,0	20	0,124	0,38
14,9	37,6	2,7	30	0,083	0,31
15,5	28,8	2,5	32	0,072	0,23
21,5	32,0	3,2	19	0,059	0,22
22,0	27,0	4,0	30	0,073	0,18
23,0	40,5	3,8	25	0,092	0,27
23,5	42,5	3,7	20	0,122	0,28
Полистирол					
15,0	32,0	4,0	180	0,716	0,26
15,0	49,0	6,6	270	1,117	0,40
26,0	31,0	8,0	150	0,483	0,19
27,0	38,0	9,0	185	0,658	0,23
27,0	53,0	9,7	280	1,116	0,32
35,5	29,0	9,7	140	0,333	0,15
36,0	44,5	11,0	260	0,783	0,24
36,5	21,5	8,4	120	0,145	0,11

\*  $\lambda_1$ , см — длина гряды.

Отмечая исключительную ценность работы Дебольского, с точки зрения перспектив использования заменителей наносов на деформируемых моделях речных русел, необходимо отметить, что опыты проводились только с тремя заменителями, из них параметры гряд были получены по двум заменителям. Оба эти заменителя синтетические. Один из них — бакелит, дает гряды иного качества, по сравнению с песком. Испытывалось только по одной фракции каждого заменителя. Испытанные заменители имели неестественную форму: бакелит — форму параллелепипеда, полистирол — форму цилиндра. И наконец, опыты с полистиролом проводились при глубине потока 15 см (2 опыта) и выше, а опыты с бакелитом при глубине 8,5 см (1 опыт), остальные — более 15 см. Как известно, глубины на деформируемых моделях обычно составляют 3–20 см, т. е. недостаточно охвачены опытами Дебольского.

#### **9.4. Экспериментальные исследования заменителей наносов, выполненные в Русловой лаборатории ГГИ**

С целью получения геометрических и динамических характеристик микроформ из различных заменителей естественного и искусственного происхождения в широком диапазоне изменения плотности частиц, их фракционного состава и гидравлических режимов потока, характерных для деформируемых моделей речных русел, в Русловой лаборатории ГГИ были выполнены лабораторные исследования движения пяти разновидностей заменителей наносов в гидравлическом лотке длиной 8 м [117, 146, 147, 148]. В опытах использовались по два фракционных состава акрилата и керамзита и по три фракционных состава шлака, угля и силикатного, туфового, песка (всего 13 фракционных составов) в диапазоне крупности частиц 0,06–2,25 мм и плотности 1,19–1,85 г/см<sup>3</sup>. Глубины потока менялись от 3 до 17 см. Было выполнено 63 опыта. Кроме того, в этом же лотке по той же методике было выполнено более 30 экспериментов с тремя разновидностями естественного песка и их смесью.

Выполнению исследований с заменителями предшествовала подготовка образцов для предварительных опытов по определению физико-механических свойств различных заменителей для их отбора и подготовки к опытам в гидравлическом лотке. Определялись удельный вес и гидравлическая крупность частиц различных размеров искусственного дробленого кирпича (красного, силикатного, шамотного), шлака, каменного угля, керамзита (естественного и дробленого), силикатного, туфового, песка, привезенного из Армении, янтаря, полистирола и акрилата.

Все характеристики определялись отдельно для каждой фракции. Разделение на фракции производилось на ситах с квадратными отверстиями размерами в миллиметрах: 1,4; 1,0; 0,63; 0,32; 0,20; 0,10; 0,06. Фракции крупнее 2 мм отделялись на ситах с крупными отверстиями. Объемы определялись мерным цилиндром с точностью до 1 см<sup>3</sup>.

Взвешивание выполнялось на электронных аналитических весах с точностью до 0,1 г. Плотность частиц определялась для материала в воздушно-сухом

состоянии без учета пор, методом вытеснения воды. Гидравлическая крупность определялась на фракциометре высотой 100 см как средняя скорость падения в воде от 10 до 100 частиц. Опыты, как отмечалось, выполнялись в стеклянном 8-метровом лотке шириной 10 см. Для работы в этом лотке были выбраны следующие заменители: акрилат, каменный уголь, шлак, керамзит, силикатный песок. Эти материалы не требовали предварительного дробления и охватывали интересующую нас область значений крупности и плотности твердых частиц.

Для работы в лотке все материалы (за исключением акрилата) делились на 2–3 фракции, с каждой из которых опыты проводились отдельно. Из-за небольшого количества акрилата опыты пришлось проводить со смесью. Под микроскопом определялась форма частиц опытных образцов, а для сравнения — саблинского и карельского песков. Опыты в лотке заключались в фиксации параметров гряд установившегося профиля (высоты, длины, скорости перемещения) при различных расходах воды и наполнениях лотка при равномерном режиме движения воды. Предварительно определялась неразмывающая скорость потока при различных уровнях воды  $v_0 = f(H)$  с охватом диапазона глубин от 3 до 20 см. Сведения о физико-механических и гидродинамических характеристиках заменителей, использованных в опытах, представлены в табл. 9.9.

Результаты экспериментов по определению неразмывающих скоростей потока для опытных материалов представлены в табл. 9.10.

Фиксация параметров гряд в опытах производилась в большинстве случаев непосредственным измерением через боковую стеклянную стенку лотка. Перед началом каждого опыта грунт укладывался на дно лотка ровным слоем высотой 3,5 см. Расход наносов определялся по смещению гряд установившегося профиля при заданных гидравлических условиях. Сначала лоток заполнялся водой до необходимого уровня при очень малых расходах воды, исключающих подвижность грунта. Опыт начинался с такого расхода воды, чтобы  $v_{cp} \approx 1,1v_0$ . Для мелких фракций (менее 1 мм) этого оказалось достаточным для возникновения гряд. Однако при работе с крупными фракциями гряды возникали при больших значениях  $\frac{v}{v_0}$ .

Необходимая подача наносов, предварительно рассчитываемая по расходу наносов по грядам, проверялась опытным путем и осуществлялась как вручную, так и автоматически. Автоматический вариант обеспечивал большую равномерность подачи, но в связи с тем, что часть грунта в опытах с некоторыми заменителями прилипала к транспортерной ленте, автоматическая подача применялась только при больших расходах наносов. В опытах фиксировались параметры гряд только установившегося профиля. Кроме параметров гряд во всех опытах фиксировались: глубина воды над гребнем гряды ( $H$ ) и почти во всех — уклон дна и водной поверхности на рабочем участке лотка 2–6 м от его начала.

В табл. 9.11 представлены общие сведения о гидравлических режимах и типе гряд, соответствующих этим режимам в опытах с различными заменителями донных наносов. Как следует из этой таблицы, в экспериментах фиксировались микроформы двух категорий: рифели и собственно гряды типа дюн. Рифели имели высоту менее  $0,1 H$  и длину, менее  $2 H$ . Гряды типа дюн имели высоту

**Таблица 9.9. Физико-механические характеристики опытных материалов  
и диапазон изменения гидравлических условий в экспериментах**

Опытный материал	Интервал крупности частиц, мм	Средняя крупность, мм	Плотность частиц, г/см <sup>3</sup>	Гидравлическая крупность, см/с	Диапазон изменения		K.
					Глубины потока, см	Числа Фруда $Fr = \frac{v}{\sqrt{gH}}$	
Акрилат	0,06–0,65	0,33	1,19	0,99	5,0–17,0	0,11–0,21	8,68
Керамзит	1,25–1,65	1,45	1,25	6,20	4,2–15,2	0,36–0,78	6,60
	1,65–2,00	1,82	1,25	6,90	11,8–14,0	0,36–0,46	6,60
Каменный уголь	0,20–0,65	0,42	1,30	2,31	3,0–16,5	0,19–0,41	5,50
	0,65–1,00	0,82	1,30	3,44	3,2–17,6	0,19–0,52	5,50
	1,00–2,25	1,31	1,30	4,81	4,0–15,7	0,26–0,63	5,50
Угольный порошок	0,06–0,65	0,29	1,38	1,25	2,6–14,0	0,07–0,21	4,34
Силикатный песок	0,10–0,65	0,35	1,51	-	10,2–16,0	0,29–0,41	3,23
	0,65–1,00	0,82	1,35	4,50	4,6–15,5	0,24–0,66	4,71
	1,00–2,00	1,50	1,22	5,50	5,4–17,0	0,30–0,67	7,50
Шлак	0,20–0,65	0,42	1,85	2,74	4,6–16,6	0,27–0,56	1,94
	0,65–1,00	0,82	1,81	4,90	4,6–16,0	0,36–0,61	2,04
	1,00–1,25	1,12	1,67	5,80	4,9–16,0	0,39–0,81	2,46
Песок	0,65–1,00	0,82	2,65	13,8	4,5–15,6	0,46–0,84	1,00
	1,00–1,27	1,14	2,65	16,3	4,7–15,3	0,45–0,97	1,00
	1,25–1,65	1,45	2,65	18,4	9,0–15,1	0,48–0,84	1,00
Смесь песка	0,65–1,65	1,13	2,65	16,2	5,1–14,3	0,61–0,83	1,00

Примечание: K\* — плотностной коэффициент, см. формулу (9.8).

(0,1–0,27) Н и длину (2–8) Н. В каждом опыте в лотке фиксировалось 2–10 гряд установившегося профиля, т. е. гряд, находящихся в состоянии динамического равновесия. Для дальнейшего анализа использовались данные только о грядах типа дюн. Их образование в потоке и размеры обусловлены крупномасштабными структурными элементами турбулентного потока, с поперечным размером, близким к его глубине, обладающими наибольшей энергией в спектре турбулентных пульсаций и наибольшей устойчивостью во времени [115]. Движение на дне потока гряд типа дюн определяет характер и величину знакопеременных высотных колебаний отметок дна. Именно на долю гряд этого типа приходится основной объем стока донных наносов в реках. Кроме того, они играют определяющую роль в формировании гидравлических сопротивлений и в целом в русловом процессе. Гряды типа рифелей в реках возникают в начальной стадии

**Таблица 9.10. Результаты экспериментов по определению неразмывающих скоростей потока для опытных материалов**

Материал	Интервал крупности частиц, мм	Средняя крупность, мм	Неразмывающая скорость потока, см/с, при глубине:				
			3 см	5 см	10 см	15 см	20 см
Акрилат	0,06–0,63	0,33	6,0	6,6	7,8	9,0	11,1
Уголь	0,20–0,65	0,42	12,7	14,0	16,1	18,0	19,2
	0,65–1,00	0,82	13,5	14,8	17,3	19,4	21,0
	1,00–2,25	1,31	15,1	16,7	19,4	20,6	21,8
Шлак	0,20–0,65	0,42	16,0	17,6	20,4	22,3	23,5
	0,65–1,00	0,82	17,1	18,9	21,7	23,4	24,5
	1,00–1,25	1,12	18,1	20,0	23,8	25,6	26,4
Силикатный песок	0,10–0,65	0,35	18,0	19,3	22,0	24,0	25,5
	0,65–1,00	0,82	18,7	19,9	22,5	24,6	26,1
	1,00–2,00	1,50	17,1	18,7	21,7	23,4	24,1
Керамзит	1,25–1,65	1,45	18,7	20,6	25,0	27,6	28,9
	1,35–2,00	1,82	17,8	19,3	22,5	25,2	26,8

движения донных наносов в узком диапазоне гидравлических условий, и на их долю приходится мизерная доля в годовом твердом стоке рек.

Буквой «Н» в табл. 9.11 обозначены опыты, в которых получались либо неразвитые, либо неустойчивые гряды. Неразвитость гряд-микроформ чаще заключалась в том, что по значениям их длин они подпадали под определение гряд-дюн, а по высоте — гряд типа рифелей. Неустойчивость же гряд состояла в том, что характеристики отдельных гряд в лотке при одном и том же гидравлическом режиме сильно различались по своим геометрическим и динамическим показателям, что не позволяло их корректное осреднение. Этому способствует и то обстоятельство, что пористые материалы характеризуются неоднородной гидравлической крупностью даже в пределах одной и той же фракции. Эта неоднородность возрастает с крупностью частиц, что отражается на характере транспорта наносов и точности определения неразмывающих скоростей потока. Достаточно устойчивой можно считать гидравлическую крупность акрилата и угля.

Для дальнейшего анализа использовались данные экспериментов с грядами типа дюн.

В табл. 9.12 представлены результаты измерений характеристик потока и гряд в опытах с различными заместителями донных наносов. В этой таблице приведены осредненные в каждом эксперименте в пределах рабочего участка лотка величины геометрических и динамических характеристик гряд. В экспериментах в лотке во всех случаях образования гряд-дюн получались двухмерные гряды, а гряды-рифели в большинстве случаев имели трехмерный характер.

Для сравнения, в этом же лотке, по той же методике была выполнена серия экспериментов с естественным песком (табл. 9.13).

**Таблица 9.11. Сводная таблица гидравлических условий  
в опытах с заменителями донных наносов**

№ опыта	Вид замени- теля	Фракцион- ный состав наносов, мм	Гидравлический режим				Количе- ство гряд в опыте	Тип гряд	
			Расход воды, л/с	Уклон дна и водной поверх- ности	Глубина потока, см	Расход донных наносов, см <sup>3</sup> /с·м			
1	2	3	4	5	6	7	8	9	
1	Акрилат	0,06–0,65	2,47	-	17,0	0,0049	14	Р	
2			1,12	0,0006	10,0	0,0054	15	Р	
3			0,72	0,0010	5,0	0,0082	8	Д	
4	Уголь	0,20–0,65	4,72	0,0007	16,0	0,058	11	Р	
5			3,58	0,0005	15,1	0,016	5	Р	
6			2,95	0,0010	11,0	0,057	4	Д	
7			2,27	0,0007	10,9	0,017	5	Р	
8			0,78	0,0018	4,0	0,061	7	Д	
9			0,60	0,0015	3,8	0,020	4	Д	
10			0,65–1,00	4,53	0,0005	17,0	0,028	2	Р
11				5,60	0,0010	17,0	0,147	3	Н
12		3,60		0,0010	13,0	0,047	5	Д	
13		1,60		-	7,0	0,0016	7	Д	
14		0,93		-	4,0	0,062	5	Н	
15		1,00–2,25		3,70	0,0011	10,5	0,234	6	Д
16			3,32	0,0011	11,0	0,092	3	Д	
17			6,00	0,0013	15,5	0,235	7	Д	
18			5,05	0,0009	15,5	0,075	8	Н	
19			7,77	0,0010	16,0	-	4	Д	
20			1,40	0,0012	4,9	0,130	8	Д	
21			1,57	0,0012	4,3	0,302	7	Д	
22			4,65	0,0024	15,0	0,028	9	Р	
23			6,50	0,0012	16,5	0,076	7	Р	

1	2	3	4	5	6	7	8	9
24	Шлак	0,20–0,65	3,50	0,0017	10,0	0,064	5	Д
25			4,82	0,0015	11,5	0,126	5	Д
26			1,48	0,0024	5,5	0,048	4	Д
27			2,08	0,0027	5,5	0,127	3	Д
28		0,65–1,00	7,17	0,0013	16,0	0,211	10	Р
29			6,65	-	16,0	0,114	7	Н
30			4,07	0,0022	10,0	0,087	7	Н
31			4,72	0,0082	10,0	0,342	8	Д
32			8,02	0,0022	15,0	0,353	10	Д
33			2,63	0,0035	6,0	0,281	10	Н
34		1,58	0,0019	5,0	0,043	7	Д	
35		1,00–1,25	7,78	0,0020	16,0	0,204	6	Д
36			5,00	0,0013	11,0	0,235	4	Д
37			6,40	-	11,0	0,353	4	Д
38			2,83	0,0034	6,1	0,482	2	Д
39		Сили- катный песок	0,65–1,00	4,16	0,0009	15,0	0,033	10
40	5,12			0,0014	15,0	0,130	7	Д
41	6,42			-	15,5	0,367	6	Д
42	2,9			0,0012	11,0	0,059	7	Р
43	4,15			0,0024	11,0	0,240	6	Д
44	3,52			0,0021	10,0	0,251	7	Д
45	1,56			0,0018	6,0	0,103	7	Д
46	2,32			0,0031	6,0	0,442	6	Д
47	6,25			0,0090	17,0	0,127	4	Р
48	3,40		-	10,7	0,106	6	Р	
49	4,15		-	10,7	0,236	4	Р	
50	1,00–2,00		6,77	0,0023	17,0	0,292	9	Д
51			6,05	-	15,0	0,280	3	Р
52		5,33	0,0014	15,0	0,089	6	Р	
53		3,80	0,0021	11,0	0,152	8	Д	
54		4,78	0,0027	11,0	0,456	9	Д	
55		2,12	0,0022	6,0	0,194	9	Д	
56		2,65	0,0033	6,5	0,498	7	Д	
57	Керам- зит	1,25–1,65	6,80	0,0016	16,4	0,296	4	Д
58			7,80	0,0019	16,0	0,655	7	Д
59			4,85	0,0014	10,7	0,558	5	Н
60			5,05	-	10,0	0,554	4	Д
61			4,05	-	10,5	0,720	3	Д
62		1,65–2,00	2,10	0,0020	5,7	0,322	3	Д
63	5,85	0,0017	15,0	0,403	10	Д		



**Таблица 9.12. Данные измерений характеристик потока и гряд  
в опытах с различными заменителями донных наносов**

№ опыта по табл. 5	Вид опытного материала	Средняя крупность наносов, мм	Гидравлические характеристики потока			Геометрические и динамические характеристики гряд				
			Расход воды, л/с	Глубина потока, см	Скорость потока, v, см/с	Высота, см	Длина, см	Скорость пере- мещения, C <sub>г</sub> см/с	$Fr = \frac{v}{\sqrt{gh}}$	K.
3	Акрилат	0,33	0,72	5,5	13,1	1,5	12,7	0,0096	0,18	12526
6	Уголь	0,42	2,95	10,7	27,5	1,4	22,0	0,065	0,27	2324
8			0,78	3,7	20,7	1,2	19,3	0,080	0,35	1425
9			0,60	3,2	18,6	0,8	18,0	0,040	0,33	2837
12		3,60	12,7	28,3	1,7	30,0	0,047	0,25	3816	
13		1,60	7,5	21,4	1,2	22,0	0,002	0,25	5403	
15		0,82	3,70	10,5	35,2	1,3	37,0	0,30	0,35	656
16		3,32	10,7	30,9	1,1	46,0	0,14	0,30	1203	
17		1,31	6,00	15,3	39,2	1,7	57,0	0,23	0,32	941
20		1,40	4,7	30,4	0,7	31,0	0,31	0,44	546	
21		1,57	4,4	35,0	0,9	41,0	0,56	0,55	374	
24		Шлак	0,42	3,50	9,9	35,4	2,0	28,2	0,053	0,36
25	4,82			10,5	46,1	1,5	23,0	0,14	0,46	650
26	1,48			4,9	30,1	1,2	17,0	0,067	0,43	878
27	0,42		2,08	5,0	40,8	1,2	23,0	0,176	0,58	453
31	0,82		4,72	8,9	53,1	1,5	36,0	0,38	0,57	311
32	8,02		14,4	55,8	2,1	44,2	0,28	0,47	403	
34	1,58		4,8	32,9	0,5	38,0	0,13	0,48	499	
35	1,12		7,78	15,3	50,8	2,0	51,0	0,17	0,41	772
36	5,00		10,0	50,3	1,4	59,5	0,28	0,50	444	
37	6,40		10,4	61,6	1,4	54,0	0,42	0,61	370	
38	2,83		5,2	54,4	1,1	49,5	0,73	0,76	184	
40	Сили- катный песок	0,82	5,12	14,1	36,3	1,3	36,5	0,16	0,31	1116
41			6,42	14,9	43,0	1,7	35,8	0,36	0,35	572
43			4,15	10,0	41,5	1,0	21,0	0,40	0,42	499
44		3,52	9,2	38,1	1,1	18,6	0,38	0,40	477	
45		1,56	5,1	30,7	0,9	25,0	0,19	0,43	757	
46		2,32	5,3	43,9	1,1	33,7	0,67	0,61	374	
50		1,50	6,77	15,8	42,8	1,8	39,0	0,27	0,34	1220
53		3,80	10,1	37,7	1,1	38,0	0,23	0,38	1242	
54		4,78	10,3	46,5	1,9	52,0	0,40	0,46	904	
55		2,12	5,6	37,7	0,9	31,7	0,36	0,50	809	
56		2,65	5,9	44,8	1,2	31,0	0,83	0,59	409	
57	Керам- зит	1,45	6,80	14,8	45,9	2,6	99,0	0,19	0,38	1698
58			7,80	14,3	54,7	2,1	73,3	0,52	0,46	705
60			5,05	9,8	51,5	1,2	93,0	0,77	0,53	441
61		4,05	8,4	48,4	2,4	75,0	0,50	0,53	646	
62		2,10	5,2	40,7	0,8	55,0	0,67	0,57	405	
63		1,82	5,85	12,8	45,7	2,4	73,0	0,28	0,40	1104

**Таблица 9.13. Данные измерений характеристик потока и гряд  
в опытах с естественными наносами**

№ опыта	Крупность наносов, мм	Гидравлические характеристики потока				Геометрические и динамические характеристики гряд					
		Расход воды, л/с	Глубина потока, см	Скорость потока, $v$ , см/с	Уклон дна и водной поверхности	Высота, см	Длина, см	Скорость пере- мещения, $C_T$ , см/с	$Fr = \frac{v}{\sqrt{gh}}$	$\frac{v}{C_T} v_*$	
1	0,82	2,58	4,8	53,8	0,0037	0,6	34,0	0,46	0,78	120	
2		2,75	5,0	51,9	0,0036	0,7	28,0	0,45	0,74	117	
3		3,02	5,2	57,6	0,0037	0,7	32,0	0,61	0,80	96	
4		3,38	5,3	56,6	0,00039	0,7	26,6	0,57	0,79	102	
5		5,50	9,0	60,9	0,0025	0,9	60,0	0,25	0,65	228	
6		5,48	9,1	60,6	0,0019	1,2	47,0	0,24	0,65	265	
7		5,50	10,0	55,0	0,0025	1,2	42,0	0,14	0,56	386	
8		6,60	10,3	65,1	0,0048	1,5	42,6	0,24	0,65	271	
9		6,85	10,0	68,8	0,0030	1,7	54,0	0,28	0,69	256	
10		8,90	13,5	65,9	0,0023	1,7	43,6	0,26	0,58	258	
11		9,50	13,2	70,3	0,0034	2,1	52,5	0,21	0,62	322	
12		9,60	13,9	69,0	0,0040	1,7	49,0	0,29	0,59	254	
13	1,14	2,90	4,9	58,8	0,0041	0,6	31,4	0,52	0,84	115	
14		3,15	5,0	62,4	0,0039	0,7	18,0	0,65	0,88	97	
15		5,60	7,9	71,0	0,0031	1,0	49,0	0,44	0,80	167	
16		6,25	9,7	64,7	0,0027	1,0	52,0	0,26	0,66	256	
17		7,05	9,6	73,2	0,0028	1,3	48,0	0,42	0,75	178	
18		9,75	14,5	67,3	0,0035	1,6	56,0	0,20	0,56	346	
19	1,45	6,67	9,7	69,2	0,0045	1,4	55,0	0,33	0,71	219	
20		7,72	10,1	76,4	0,0079	1,5	54,0	0,53	0,77	159	
21		9,50	12,7	74,8	0,0052	1,7	65,0	0,38	0,67	197	
22		9,75	14,0	67,9	0,0043	1,7	48,0	0,26	0,58	268	
23		10,35	11,3	91,7	0,0057	2,4	33,0	0,87	0,87	108	
24		10,55	14,4	72,0	0,0034	1,4	42,0	0,48	0,61	153	
25		10,75	14,0	73,8	0,0046	1,8	59,0	0,36	0,62	211	
26		10,90	13,3	78,1	0,0057	2,0	57,0	0,49	0,68	173	
27	Смесь трех фракций 1,13	2,90	5,2	55,6	0,0042	0,6	30,0	0,64	0,77	86	
28		2,95	5,1	57,3	0,0047	0,7	32,0	0,99	0,81	58	
29		3,17	5,2	55,5	0,0048	0,7	40,0	0,72	0,78	77	
30		7,05	10,3	68,6	0,0055	1,8	63,0	0,35	0,68	200	
31		7,72	10,0	77,2	0,0043	1,7	56,0	0,48	0,77	175	
32		10,35	13,5	78,2	0,0039	2,4	63,0	0,29	0,67	253	

## 9.5. Масштаб времени русловых деформаций при использовании заменителей наносов на деформируемых моделях речных русел

Как отмечалось выше, в главе 7, при расчете деформируемых моделей разные авторы для расчета масштабных множителей времени русловых деформаций используют различные подходы, приводящие к разным результатам для одних и тех же моделей.

Обычно масштабный множитель времени русловых деформаций  $\alpha_t$  различные исследователи определяют по-разному: из уравнения баланса наносов, выражения числа Фруда, из выражения для времени размыва или из условий тождественности систем уравнений для природы и модели, устанавливаемых разными авторами для описания руслового процесса. При этом при выводе  $\alpha_t$  не учитывается характер движения донных наносов в форме гряд, и расход донных наносов определяется для бесструктурного (безгрядового) движения донных частиц.

Анализ современной практики использования заменителей наносов на деформируемых моделях показывает, что исследователи ограничиваются в основном выводами качественного характера, не располагая надежными количественными зависимостями для расчета моделей и пересчета динамических характеристик рельефа дна и руслового процесса с модели на натуру.

Сложившуюся ситуацию отчасти можно объяснить следующим образом. Еще с 20–30-х годов XX столетия крупными авторитетами Европейских лабораторий был наложен строгий запрет, некоторое «табу» на образование структурных форм транспорта наносов (рифелей и гряд) на деформируемых моделях. Роль последних в транспорте наносов тогда не была должным образом осознана, и рекомендовалось всячески «бороться» с этим явлением, создающим «лишние сопротивления». Рекомендовалось укрупнять наносы. Эти традиции до сих пор живы во многих гидравлических лабораториях [256, 289, 443].

Используя данные описанных выше экспериментов, была предпринята попытка обобщить полученную ранее, в 1978 г., зависимость для скорости движения гряд типа дюн [249], справедливую для природных и лабораторных условий движения донных наносов естественной плотности, и на их легкие заменители.

Отмеченная зависимость имеет вид:

$$c_T = 0,019vFr^3. \quad (9.7)$$

Графический вид этой зависимости представлен на рис. 9.1. Для получения зависимости (9.7) был использован большой массив данных, включающий результаты исследований ГГИ на 13 реках СССР и 8 лабораторных установках, а также литературные источники (7 природных и 6 лабораторных исследований). Однако все точки, нанесенные на графике рис. 9.1, получены позднее 1978 г., когда была установлена отмеченная зависимость [249]. Как видно из этого рисунка, новые, независимые природные и лабораторные данные еще раз подтверждают справедливость зависимости (9.7).

Для совместного анализа данных, относящихся к движению частиц различной плотности, был использован плотностной коэффициент:

$$K_* = \frac{\left(\frac{\rho_T - \rho}{\rho}\right)_п}{\left(\frac{\rho_T - \rho}{\rho}\right)_{оп}}. \quad (9.8)$$

В этой зависимости  $\rho_T$  и  $\rho$  — соответственно плотность наносов и воды. Индексы (п) и (оп) означают «песок» и «опытный материал». Для песка  $K_*$  равен единице, а для заменителей песка  $K_* > 1$ . Чем легче опытный материал, тем больше  $K_*$  (табл. 9.4). Обобщение данных с заменителями наносов производилось в тех же координатах, что при получении зависимости (9.7), но на оси ординат в качестве множителя был введен коэффициент  $K_*$ , который, как отмечалось, для частиц естественной плотности равен единице.

На рис. 9.1 в качестве примера показано соответствие экспериментальных данных для заменителей из силикатного песка зависимости (9.7) с учетом коэффициента  $K_*$ . На этот график нанесены точки, соответствующие режиму с грядами-дюнами, полученными в экспериментах с силикатным песком при всех режимах потока. Такие же зависимости получены для каждого заменителя: угля, шлака, акрилата, керамзита.

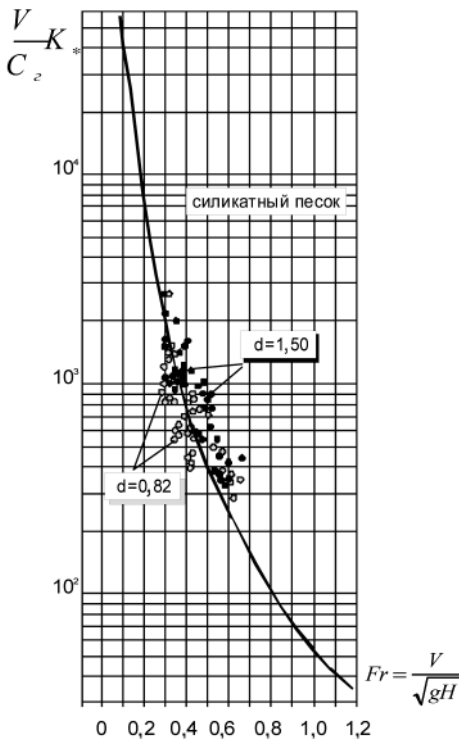


Рис. 9.1. Зависимость относительной скорости движения гряд из силикатного песка от числа Фруда

На рис. 9.2 представлено обобщение отмеченной зависимости (9.7) с учетом коэффициента  $K_*$  на все виды песка и заменителей, с которыми выполнялись опыты в лотке. Здесь же нанесены данные, полученные в Русловой лаборатории ГГИ на двух деформируемых моделях (р. Дунай, р. Иртыш), где в качестве заменителей использовался уголь (угольный порошок, табл. 9.4). Точки на рис. 9.2 соответствуют осредненным для каждого гидравлического режима данным, а для деформируемых моделей — конкретным грядам.

Таким образом, обобщенная зависимость для скорости движения микроформ — гряд (дюн), справедливая для движения песка в натуральных и лабораторных условиях и легких заменителей песка в лабораторных условиях, имеет вид:

$$c_T = 0,019 K_* v Fr. \quad (9.9)$$

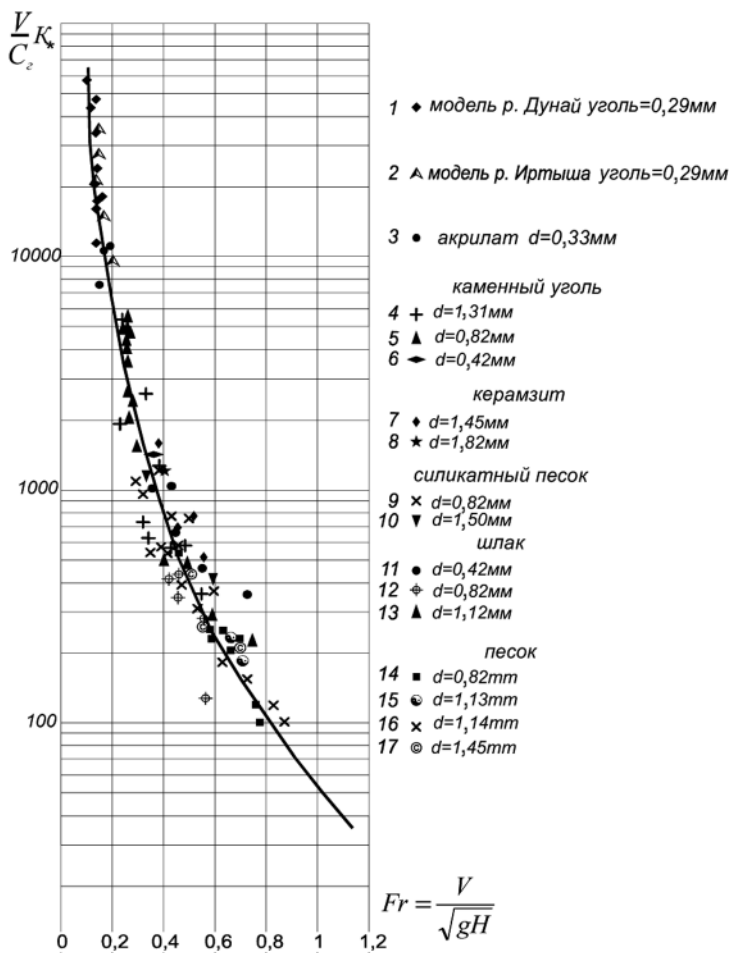


Рис. 9.2. Обобщенная зависимость относительной скорости движения гряд  $\frac{v}{C_r} K_*$  от числа Фруда для всех видов заменителей

Зависимость (9.9) в дополнение к полученному ранее результату и изложенному в разделе 7.4 позволяет определить выражение для расчета масштаба времени русловых деформаций (морфологического масштаба времени) при гидравлическом моделировании руслового процесса и для случая использования легких заменителей донных наносов.

Запишем уравнение баланса донных наносов для единицы ширины потока:

$$\frac{dq_{\Gamma}}{ds} + \frac{dz}{dt} = 0. \quad (9.10)$$

Отсюда, выражение для масштаба времени будет иметь вид:

$$\alpha_{\tau} = \frac{\alpha_L \cdot \alpha_h}{\alpha_{q_{\Gamma}}}. \quad (9.11)$$

Согласно известной зависимости для расхода донных наносов:

$$\alpha_{q_T} = \alpha_\Phi \alpha_{h_T} \alpha_{C_T}, \quad (9.12)$$

где  $\alpha_\Phi \alpha_{h_T} \alpha_{C_T}$  — соответственно масштабы коэффициента формы гряд, высоты гряд и скорости их смещения.

Воспользуемся для определения  $\alpha_{C_T}$ , а затем  $\alpha_{q_T}$ , полученным выше уравнением (9.9).

Тогда

$$\alpha_{q_T} = \alpha_{h_T} \alpha_{K_*} \alpha_v \alpha_{Fr}^3. \quad (9.13)$$

Подставляя (9.13) в (9.11), получим:

$$\alpha_\tau = \frac{\alpha_L \alpha_h}{\alpha_{h_T} \alpha_{K_*} \alpha_v \alpha_{Fr}^3} = \alpha_{\frac{h}{h_T}} \frac{\alpha_t}{\alpha_{K_*} \alpha_{Fr}^3}. \quad (9.14)$$

Выражение (9.14) можно переписать в виде соотношения масштабов времени русловых деформаций  $\alpha_\tau$  и гидравлического  $\alpha_t$ :

$$\frac{\alpha_\tau}{\alpha_t} = \frac{\alpha_{\frac{h}{h_T}}}{\alpha_{K_*} \alpha_{Fr}^3}. \quad (9.15)$$

При неискаженном моделировании ( $\alpha_{\frac{h}{h_T}} = 1$ ;  $\alpha_{Fr} = 1$ ) и при использовании легких заменителей донных наносов получаем следующее выражение для соотношения масштабов времени русловых процессов и гидравлического:

$$\alpha_\tau = \frac{\alpha_t}{\alpha_{K_*}}. \quad (9.16)$$

Зависимость (9.15) с учетом

$$\alpha_t = \frac{\alpha_L}{\alpha_{Fr} \sqrt{\alpha_h}},$$

определяемом из выражения числа Fr, может быть переписана в виде:

$$\alpha_\tau = \frac{\alpha_L}{\sqrt{\alpha_h}} \cdot \frac{\alpha_{\frac{h}{h_T}}}{\alpha_{Fr}^4 \alpha_{K_*}}, \quad (9.17)$$

не содержащем масштаб времени гидравлических процессов в явном виде.

Зависимости (9.15) и (9.17) не противоречат уравнению баланса наносов и учитывают структурный транспорт донных наносов естественной плотности и их легких заменителей в форме гряд. Кроме того, преимуществом этого вида зависимостей является то, что он содержит критерий динамического подобия Fr и отражает соотношение масштабов времени морфологического (русловых деформаций) и гидравлического.

По аналогии с главой 7, можно показать, что выражение (9.14) для определения масштаба времени русловых деформаций при движении на модели микроформ из заменителей донных наносов будет справедливым и для случаев

движения мезоформ и времени размыва (намыва) дна при структурном транспорте заменителей на модели.

Полученный результат впервые позволяет при использовании легких заменителей донных наносов на деформируемых гидравлических моделях подбирать, количественно рассчитывать и пересчитывать с модели на натуру динамические характеристики рельефа дна и руслового процесса с учетом перемещения донных наносов в форме гряд.

Дальнейшее развитие методики использования заменителей наносов на деформируемых моделях речных русел представляется в совершенствовании критериальных условий существования форм транспорта донных наносов различной плотности, разработке новых, более совершенных классификаций и типизаций русловых форм, а также в необходимости выполнения исследований на конкретных моделях для оценки пригодности и дальнейшего совершенствования предлагаемого метода.

## ЛАБОРАТОРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И ГИДРАВЛИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РУСЕЛ РЕК, СЛОЖЕННЫХ ИЗ КРУПНОГО АЛЛЮВИЯ

### Введение

Горные хребты, предгорья и возвышенности занимают значительную часть суши. В горах формируется основной объем речного стока и водных ресурсов, а также продуктов разрушения горных пород, переносимых реками. Эти территории характеризуются наибольшей густотой речной сети, и на их долю приходится наибольшее количество рек в речных водосборах крупных речных систем. Руслу рек, протекающих на территории горных стран и возвышенностей, характеризуются большими уклонами и крупным составом речного аллювия: от гравия и гальки крупностью 10–20 мм до валунов размером более 500 мм.

Изучение руслового процесса и транспорта крупного аллювия в реках горно-предгорной зоны исторически началось значительно позже, чем равнинных рек, которые в связи с их использованием в целях судоходства стали объектом активных исследований в Европе, России и США уже с середины XIX века.

С 20-х годов XX столетия урбанизация и интенсивное освоение горно-предгорных районов, гидроэнергетика и транспортное строительство, а также борьба с паводками стали основным стимулом для систематического и всестороннего исследования горных рек. Однако при изучении руслового процесса и транспорта наносов в реках горно-предгорной зоны по сравнению с равнинными возникает ряд дополнительных объективных методических трудностей. Скорости потока в горных реках могут превышать 8,0 м/с, а процессы, протекающие в их руслах, отличаются чрезвычайной быстротечностью. Эти реки, обладая большими уклонами и энергией потока, переносят огромное количество обломочного материала. При отмеченных выше значениях скоростей потока, больших уклонах и современных, несовершенных технических средствах измерений выполнение полевых работ и прямых измерений во время паводков на реках горно-предгорной зоны практически не возможно. Редкая повторяемость руслоформирующих условий на таких реках, когда наблюдается активный транспорт всего руслового материала со «срывом» самоотмостки дна и формированием руслового рельефа (1 раз в 30–50 лет и реже), а также чрезвычайно малая продолжительность этих паводков, исчисляющаяся несколькими часами (чаще в ночное время), оставляют мало шансов на успех. О руслоформирующих процессах на этих реках приходится судить по результатам измерений в период между паводками во время межени. Вместе с этим, с точки зрения возможностей изучения руслового процесса и транспорта донных наносов, реки, сложенные из крупного аллювия, по сравнению с равнинными обладают одним неоспоримым преимуществом. В лабораторных условиях представляется возможным воспроизводить крупность донных отложений в масштабе глубины



потока и вести опыты на лабораторных установках (лотках и моделях) с соблюдением геометрического и динамического подобия, без искажения линейных масштабов модели.

Очевидно, эти обстоятельства и побудили крупного советского ученого и организатора науки И.В. Егиазарова заявить еще в 1935 г. следующее: «У автора на основе анализа цифр по измерениям в природе и на основе восьмилетнего лабораторного опыта на моделях горных рек создано, и все более крепнет, убеждение, что расход донных наносов на рассматриваемом участке реки можно будет еще в течение целого ряда лет точнее определять лабораторным путем, на русловой модели, чем путем непосредственных измерений в природе; во всяком случае, до тех пор, пока не будет произведена революция в методах измерений, применяемых в настоящее время» [86, с. 5].

Как известно, революции в создании новых методов измерений расхода донных наносов в горных реках с тех пор так и не произошло, и лабораторный метод, в силу перечисленных выше доводов, остается мощным средством для изучения процессов, происходящих в руслах рек отмеченной категории.

В России, СССР и за рубежом выполнен большой объем теоретических, полевых и лабораторных исследований, посвященных различным аспектам руслового процесса и транспорта наносов в реках горно-предгорной зоны: морфологии русел и типам руслового процесса, гидроморфометрии, гидравлическим характеристикам потока и его турбулентной структуре, транспорту наносов, гидравлическим сопротивлениям, взаимодействию руслового процесса с инженерными сооружениями, гидравлическому моделированию и др. Число публикаций по перечисленной тематике в зарубежной и отечественной литературе насчитывает тысячи наименований.

За рубежом морфологии и гидроморфологическим зависимостям русел, сложенных из крупного аллювия, посвящены работы Л. Леопольда и М. Волмана, С. Томсона, Р. Келлехалса, В. Гелея, Р. Хейя, М. Никсона, Д. Саймонса и М. Альбертсона, Д. Брея и многих др. [134, 146, 344, 357, 395, 447, 462]. Большое число работ по различным аспектам транспорта крупных наносов в реках, выполненных зарубежными исследователями, содержится в специальных сборниках трудов, посвященных этой проблеме [332]. Вопросы гидравлических сопротивлений в руслах рек, сложенных из крупного аллювия, за рубежом посвящены работы Д. Гриффитса, В. Графа, Д. Лимериноса, Мартинекка Р. Хейя и др. [79, 357]. В СССР этот вопрос изучался А.П. Зегждой, К.В. Гришаниным, Л.А. Морозовым, В.Ф. Талмазой, Р.Н. Бершадером и Д.И. Наботовым, Г.Л. Гладковым и др. [72, 97, 259].

Большое число исследований руслового процесса рек горно-предгорной зоны, выполненных в СССР, охватывали горные регионы Центральной Азии, Кавказа, Карпат, Восточной Сибири, Болгарии. В работах С.Т. Алтунина, А.М. Мухамедова, К.Ф. Артамонова, В.Ф. Талмазы и А.Н. Крошкина, Р.К. Кромера, А.Ю. Умарова, Г.В. Калиниченко и др. исследовались гидроморфология, транспорт наносов, скоростная структура, гранулометрия и другие аспекты руслового процесса рек Центральной Азии, а также решались задачи инженерных приложений результатов этих исследований к проектированию и эксплуатации

гидротехнических сооружений на реках этого региона [6, 17, 18, 105, 194, 195, 259]. Подобные работы применительно к рекам Украинских Карпат выполнялись В.А. Базилевичем, М.Н. Бухиным, М.И. Кагановым, А.Н. Кафтаном, В.В. Онищуком и др. [20, 37].

Работами ГГИ охвачен широкий круг проблем по теории и методам расчета характеристик руслового процесса и транспорта наносов в реках горно-предгорной зоны на примере рек Кавказа, Центральной Азии, Болгарии и зоны БАМ. Это работы А.В. Караушева, И.В. Боголюбовой, В.В. Романовского, Н.М. Капитонова, Ш.Р. Позднякова, В.В. Ромашина, З.Д. Копалиани и др. [108, 134, 138, 141]. Романовским исследовано влияние формы частиц на гидравлическую крупность, начальную скорость влечения и скорость перемещения по дну гравийно-галечных наносов. Этими работами показано, что форма частиц оказывает существенное влияние на все гидравлические характеристики крупных наносов. Получены расчетные зависимости для учета формы частиц при оценке начальной скорости и скорости влечения крупных частиц в горно-предгорных реках [108].

Изучением руслового процесса и транспорта наносов на горных реках Кавказа и решением инженерных задач на этих реках занимались И.В. Егизаров, Ц.Е. Мирцхулава, Н.Ф. Данелия, Л.Г. Гвелесиани, И.И. Херхеулидзе, Г.И. Херхеулидзе, Н.И. Маккавеев, Р.С. Чалов, А.Ф. Мандич, Г.Н. Хмаладзе, Ш.В. Джаошвили, Н.В. Рухадзе, О.Д. Шаутидзе и др. [75, 85, 134, 178, 187, 282, 283].

В настоящей работе нет возможности и необходимости осветить результаты всех перечисленных выше работ. Ниже остановимся вкратце только на вопросе об основных различиях и сходстве между русловым процессом равнинных и горно-предгорных рек, установленных в работах ГГИ [134, 149, 269, 291], и в соответствии с контекстом этой монографии в последующих разделах этой главы приведем краткую информацию лишь о предшествующих лабораторных исследованиях транспорта крупных наносов в реках и гидравлическом моделировании русел, сложенных из крупного аллювия, а также дальнейшем развитии этих вопросов в работах ГГИ.

### **10.1. Особенности руслового процесса рек горно-предгорной зоны**

По величине реки, сложенные из крупного аллювия, условно могут быть подразделены на малые, с максимальным расходом воды менее 500 м<sup>3</sup>/с; средние, с максимальным расходом воды 500–2500 м<sup>3</sup>/с; и большие, с максимальным расходом воды более 2500 м<sup>3</sup>/с. Малые и средние реки с крупным аллювием следует в свою очередь подразделять на селевые и неселевые. Селевые паводки на реках с крупным аллювием формируются при уклонах дна русла более 0,05 и геоландшафтных и климатических условиях, обеспечивающих высокую (селевую) концентрацию твердой составляющей паводочного стока указанных рек. Ниже речь идет об аллювиальных неселевых участках рек горно-предгорной зоны.

Долгое время о русловом процессе на горных реках, особенно на начальной стадии их изучения, доминировали представления как о беспорядочном

явлении, лишенном каких-либо закономерностей. Морфология русла и поймы, транспорт донных наносов и структура потока, по этим представлениям имеют хаотический характер проявления и не подчиняются каким-либо закономерностям. Со временем, по мере изучения этих рек, представления об этих процессах уточнялись, и к настоящему времени установлено, что, подчиняясь тем же общим природным закономерностям, что и равнинные реки, русловый процесс рек горно-предгорной зоны имеет ряд существенных особенностей, сходств и различий с русловым процессом равнинных рек [134, 149, 269].

Основное различие горно-предгорных рек от равнинных, кроме резких отличий их гидравлических характеристик и режима стока, выражается, прежде всего, в характере и степени проявления ограничивающего фактора (выходы скальных пород в русле, пороги, водопады, каньоны и др.), способе питания реки наносами, более четком делении наносов на горных реках на донные и взвешенные и их различной роли в русловом процессе, а также в различном влиянии внутригодовой и многолетней изменчивости стока воды на режим руслового процесса и характеристики стока наносов.

Ограничивающие факторы на равнинных и горных реках проявляются по-разному. В верхних звеньях гидрографической сети горных рек на всем протяжении от истока до выхода из гор они, как правило, целиком определяют характер руслового процесса, тогда как на равнинных реках проявление ограничивающего фактора носит лишь локальный характер.

Поступление наносов в русло на горных реках не ограничивается поступлением их из гидрографической сети (боковой эрозией и притоками), как на равнинных реках, а в значительной степени возрастает за счет наносов гравитационного (негидродинамического) происхождения — обвалов, осыпей, оползней (рис. 10.1).



Рис. 10.1. Иностранное тело в русле горной реки

Важной особенностью рек горно-предгорной зоны является более четкое, чем на равнинных реках, разделение наносов на донные и взвешенные.

Взвешенные наносы практически не участвуют в русловом процессе горных рек. Качественной особенностью их транзита является непрерывность перемещения со скоростями, близкими к скорости потока, а количество зависит не столько от гидравлических характеристик потока, сколько от изменчивых во времени условий выветривания и склоновой эрозии на водосборе реки.

В противоположность взвешенным, менее подвижные русловые наносы перемещаются от источников их поступления в русло до устья реки многие годы, в течение которых они претерпевают существенную сортировку и наконец утрачивают свою первоначальную связь с конкретными условиями их образования. Движение донных наносов целиком определяется гидравлическими характеристиками паводочного потока, сформировавшегося много позже самих наносов. По указанным причинам, на горных реках взвешенные и влекомые наносы дифференцируются довольно четко по их крупности, а к их расчету должны применяться зависимости с принципиально разной структурой.

В отличие от равнинных рек, в которых транспорт донных наносов поддерживается в течение большей части года, в руслах рек горно-предгорной зоны донные наносы движутся только во время высоких паводков при больших скоростях потока, и их движение носит прерывистый, резко неравномерный и неустановившийся характер. Поэтому особенности характеристик стока воды и их изменчивости внутри года и в многолетнем разрезе на каждой реке горно-предгорной зоны в каждом конкретном случае определяют уникальный характер хода во времени плановых и высотных деформаций их русел и характеристик стока наносов.

В равнинных реках песчаный материал, его мелкие и крупные фракции приходят в движение при близких значениях скоростей потока, обеспечивающих движение всей смеси. Различные фракции гравийно-галечных наносов, слагающих дно рек горно-предгорной зоны, приходят в движение при резко различающихся друг от друга значениях скоростей потока. Поэтому диапазон скоростей, при которых обеспечивается подвижка всей смеси, включая крупные наносы, весьма широк, по сравнению с песчаными наносами. Это является причиной частичной подвижности, избирательного характера движения различных фракций в смеси крупных наносов, их сортировки и образования самоотмостки. Отмеченное явление на реках горно-предгорной зоны, в отличие от равнинных, имеет решающее значение в транспорте наносов и характере русловых деформаций. Срыв самоотмостки и транспорт всего руслового материала на горно-предгорных реках имеет место лишь при максимальных расходах воды обеспеченностью менее 5–10 %.

В верхних звеньях речной сети в горно-предгорной зоне при малых значениях относительной гладкости потока  $\frac{H}{d_{90}} < 15$  и сильном проявлении ограничивающего фактора наблюдается бесструктурный транспорт донных наносов, без

их скопления в грядовые образования. По мере движения вниз по течению проявляется тенденция освобождения реки от влияния ограничивающего фактора и рост величины  $\frac{H}{d_{90}}$ , что приводит к постепенному переходу транспорта наносов сначала к элементам структурности (появлению микро- и мезоэлементов русла), а затем к полностью структурному транспорту и свободному руслоформированию. В горно-предгорной зоне и на участках рек, удаленных от гор, в руслах которых в составе донных отложений в качестве преобладающей фракции сохраняются крупные частицы (гравий, галька), наблюдаются почти все типы руслового процесса, свойственные равнинным рекам, кроме пойменной многоорукавности. Вместе с этим, на участках аллювиальных расширений горных долин и на предгорном участке широко распространены два не свойственных равнинным рекам типа руслового процесса: горная пойменная многоорукавность (пойменное блуждание) и долинное блуждание.



а)



б)

Рис. 10.2. Горная пойменная многоорукавность: а – р. Ладжанури; б – р. Цхенисцкали (Грузия)

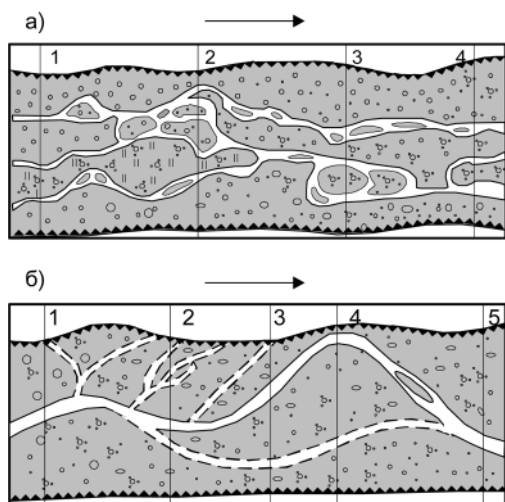


Рис. 10.3. Типы руслового процесса на участке рек горно-предгорной зоны: а – горная пойменная многоорукавность (пойменное блуждание); б – долинное блуждание

представлен на фотографиях (рис. 10.2) и схемах (рис. 10.3).

Паводочное русло горной реки представляет собой часть долины, систематически затапливаемую паводками средней повторяемости, в пределах которой регулярно, каждый год во время паводков, поддерживается процесс переотложения наносов. Растительность в пределах паводочного русла горно-предгорных рек практически отсутствует. Паводочное русло представляет собой широкое галечно-валунное пространство, в значительной степени обсыхающее в меженный период.

Рельеф обсохшего паводочного русла горной реки состоит из пологих гравийно-галечных россыпей-мезоформ. Мезоформы паводочного русла выступают как формы регулярного перемещения наносов. Частично или целиком обсыхая в межень, они обуславливают извилистость и разветвленность русла в плане.

При установившемся режиме течения транспорт наносов на горных реках при значениях относительной гладкости потока  $\frac{H}{d_{90}} > 15$  выражается перемещением русловых мезо- и микроформ. В условиях колебаний водности установившиеся формы транспорта наносов периодически перестраиваются. На реках горно-предгорной зоны с присущей им неравномерностью режима стока воды в многолетнем разрезе и внутри года инерционность русловых образований сравнительно невелика. Подвижные морфологические структуры, сформировавшиеся при высоких (редких и выдающихся) паводках, резко перестраиваются только такими же паводками, повторяющимися 1 раз в 30–50 лет. В относительно маловодные периоды продолжительностью 5–15 лет подвижные крупные формы частично зарастают и превращаются в пойменные пространства. В промежутке

На дне горной долины выделяются два характерных элемента рельефа: пойма и паводочное русло. Характерным признаком поймы является наличие растительности, стабильность которой определяется стабильностью субстрата (грунта) на поверхности поймы, режимом стока воды и гидравлической паводочного русла. В отличие от рельефа равнинных пойм, формирующихся в результате постоянного перемещения русла в плане, пойменный рельеф горных рек является результатом прерывисто происходящих во времени процессов стабилизации, зарастания и временной консервации подвижных русловых образований. Характерный вид русел такого типа

времени между высокими, редкими паводками транспорт наносов осуществляется в виде структурных форм меньших порядков. При описанной многопорядковой структуре руслового рельефа функционирование каждого порядка форм связано с соответствующим диапазоном расходов воды, а процесс в целом в многолетнем и внутригодовом разрезе воспринимается как блуждание русла реки по пойме или речной долине, соответствующее типу горной пойменной многорукавности (на больших и средних горных реках) или долинному блужданию (на малых горных реках).

## 10.2. Лабораторные исследования структурного транспорта крупных наносов в реках

Одним из важнейших вопросов современной теории руслового процесса и транспорта донных наносов в реках, сложенных из крупного аллювия, представляется вопрос о принципиальной возможности и гидравлических условиях транспорта донных наносов в виде структурных форм: микроформ (гряд) и мезоформ руслового рельефа. Несмотря на многие свидетельства о наличии таких форм в природе [134], ряд авторитетных исследователей либо отрицают существование структурных, мобильных форм транспорта крупных наносов в реках, или считают эти формы консервативными формами аккумуляции донных наносов. К числу последних относятся И.В. Егизаров, Р.С. Чалов, А.Н. Крошкин, Р. Хэй, Ч. Янг и др. [84, 146, 259, 282, 492]. В многочисленных лабораторных исследованиях зарубежных авторов, выполненных с крупными частицами (диаметром более 1,0 мм), донные русловые образования — гряды и мезоформы — либо не наблюдались, либо их наличие фиксировалось качественно, без измерения их геометрических и динамических характеристик. В качестве примера в табл. 10.1 представлены сведения о гидравлических условиях в опытах различных исследователей транспорта крупных наносов в гидравлических лотках [321].

Лабораторные исследования движения крупных наносов в лотках, выполненные в бывшем СССР, либо охватывали условия малых значений относительной гладкости потока  $\frac{H}{d} < 10$  [105, 259], при которых образование гряд в потоке заведомо исключается, либо были выполнены при грядовом движении наносов в условиях  $\frac{H}{d} \geq 28-36,5$  [223]. Формы транспорта наносов и возможность образования гряд в диапазоне значений  $\frac{H}{d} \leq 30$  в комбинации со значениями  $Fr \geq 1,6$ ;  $\frac{v}{v_0} = 1-3$ ;  $I = 0,003-0,03$ , как отечественными, так и зарубежными исследователями, не изучались.

Экспериментальные исследования ГГИ ставили целью исследовать пограничные условия возникновения и движения гряд установившегося профиля в руслах рек горно-предгорной зоны [136]. В табл. 10.2 приведены данные, показывающие диапазон изменения гидравлических характеристик потока на реках Западного Закавказья при расходах воды больших или близких к руслоформи-

рующим, в качестве которого принят среднемноголетний паводочный максимум. При составлении этой таблицы были использованы материалы измерений на гидрологических постах Гидрометслужбы СССР [108, 136].

Значения крупности донных отложений в основном взяты из материалов полевых измерений ГГИ, частично заимствованы у Н.И. Маккавеева. Неразмывающие скорости определялись по рекомендациям В.Ф. Талмазы [259], а гидравлическая крупность определялась по таблице [269].

В качестве наносов в опытах использовались естественный гравий с удельным весом  $2,65 \text{ г/см}^3$  и керамзит с удельным весом  $1,25 \text{ г/см}^3$ . Серии опытов различались по крупности и гранулометрическому составу наносов. В табл. 10.3 приведены характеристики наносов в этих сериях: удельный вес, средневзвешенный диаметр, коэффициент неоднородности и гидравлическая крупность. Последняя была определена экспериментально в большом фракциометре ГГИ.

Основная часть опытов, всего около 100, была проведена в 30-метровом стеклянном гидравлическом лотке шириной 0,5 м и высотой 0,5 м. Лоток снабжен двумя тастерами: стационарным, установленным на мерном баке, и переносным на рельсах. В конце лотка установлены водосливной щиток для регулирования глубины и песколовка для улова наносов. Кроме того, лоток оборудован автотранспортером для автоматической подачи наносов.

При проведении опытов опытный материал укладывался на горизонтальное дно лотка под определенным уклоном. В верхней части лотка вместе с водой непрерывно подавались наносы. В опытах с малой концентрацией наносов подача производилась автотранспортером, при больших концентрациях наносы подавались вручную. Характеристики гряд и потока измерялись при достижении состояния динамического равновесия, т. е. когда уклон подвижного дна, расход наносов в начале и конце лотка и средние характеристики гряд и потока не менялись во времени.

В некоторых опытах для измерения использовались акустический профилограф и трубка Пито. Основные измерения производились через боковое стекло лотка; в нескольких опытах выполнялась киносъемка с частотой 16 кадров в секунду. Во время опытов и после слива воды производилось фотографирование гряд и нивелировка дна.

В табл. 10.4 приведены данные пятой (основной) серии опытов с гравием при  $d_{с.в.}=6,5 \text{ мм}$ . Как следует из этой таблицы, эксперименты проводились в широком диапазоне расходов воды ( $Q=20-150 \text{ л/с}$ ) и основных определяющих безразмерных характеристик: числа Фруда ( $Fr = \frac{v}{\sqrt{gh}}=0,6-3,0$ ), уклона дна ( $I=0,003-0,03$ ), критериев подвижности ( $\frac{v}{v_0}=1,1-4,9$  и  $\frac{v}{w}=2,02-8,28$ ), относительной гладкости ( $\frac{H}{d}=5-40$ ) и концентрации наносов ( $\mu=0,74-18,23 \text{ г/л}$ ).

В каждой серии опыты начинались с определения неразмывающих скоростей потока. Известно, что неразмывающая скорость для данной крупности кроме глубины потока зависит от удельного веса материала, фракционного со-



Таблица 10.1. Общие сведения о диапазоне изменения основных гидравлических характеристик в лабораторных опытах различных исследователей по транспорту крупных наносов ( $d \geq 1,0$  мм)

№ п/п	Автор, год, количество опытов	Ширина лотка, м	Глубина потока, м	Уклон дна	Крупность наносов, мм	Концентрация наносов, по весу, г/м <sup>3</sup>	Характер дна в опытах*
1	2	3	4	5	6	7	8
1	Джилберт, 1914, 179	0,20 0,30 0,40	0,024–0,17	0,0018–0,029	(1,7–7,0) 1,7; 3,2; 4,9; 7,0	91,0–15000,0	0; 3; 4; 5
2	Мак Доугэл, 1933, 26	0,61	0,04–0,16	0,001–0,003	1,26	122,6–1318,0	0
3	Кейзи, 1935, 92	0,40	0,015–0,22	0,001–0,005	(1,0–2,5) 1,0; 2,5	0,01–2722,0	0
4	Богарди и Йен, 1936, 48	0,82	0,039–0,197	0,011–0,025	(6,8–15,2)	6,3–1010,0	0
5	Экспериментальная станция США, 1936, 314	0,30	0,02–0,24	0,0001–0,0015	(1,1–3,5) 1,1; 1,2; 3,0; 3,5	3,2–5643,0	0
6	Мэвис и др., 1937, 293	0,82	0,01–0,13	0,001–0,010	(1,4–4,2) 4,2; 3,12; 2,0; 1,4; 3,7; 1,7	0,9–2361,0	0
7	Хо Панг-Янг, 1939, 80	0,40	0,05–0,005	0,001–0,005	(1,4–6,3)	0,09–441,0	0
8	Мейэр-Петер и Мюллер, 1948, 130	2,0; 0,35 0,50; 0,65 0,30; 0,15	0,01–1,09	0,001–0,023	(1,0–28,6) 28,6; 5,2; 2,7; 3,3; 1,1; 1,5; 4,0; 1,0	4,1–18618,5	0
9	Эйнштейн и Чин, 1955, 5	0,31	0,11–0,14	0,014–0,026	1,3	5500,0–35970,0	0

1	2	3	4	5	6	7	8
10	Саго, Киккава и Ашида, 1958	0,78	0,18–0,48	0,0006–0,0025	(1,0–46) 1,0; 2,2; 2,6; 3,8; 4,6	5500,0–35970,0 2,6–499,0	0
11	Нейл, 1967, 51	0,9	0,03–0,61	0,001–0,027	(3,4–20,2); 3,4; 5,0; 6,0; 9,0; 20,0	0	1
12	Виллямс, 1970, 177	0,08; 0,15; 0,30; 0,61 1,19	0,03–0,22	0,0006–0,036	1,3	7,8–34575,0	3,4; 5,7
13	Пейнтел, 1971, 96	0,91	0,03–0,20	0,001–0,010	(2,5–22,2) 2,5; 7,9; 22,2	0,001–353,0	0
14	Гиббс и Нейл, 1972, 9	1,22	0,17–0,18	0,003–0,005	4,4	360,4–1777,0	0
15	Нордин, 1976, 16	2,4	0,26–0,63	0,003–0,005	4,4	360,4–1777,0	0
16	Икеда, 1983, 17	4,0	0,08–0,31	0,0007–0,0058	1,1	2,9–2349,9	3
17	Граф и Сушка, 1987, 106	0,60 0,60	0,07–0,24 0,09–0,21	0,0023–0,0099 0,005–0,012– 0,025	12,2 23,5	0,3–1107,0	0 0

\* 0 — русловые формы не фиксировались; 1 — плоское дно, близкое к состоянию начала подвижки частиц; 2 — побочни; 3 — дюны; 4 — смыв форм; 5 — плоское дно; 6 — стоячие волны (гряды); 7 — антидюны

**Таблица 10.2. Гидравлические характеристики потока на реках Западного Закавказья при расходах воды, близких к руслоформирующим**

Река, расстояние от устья $L$ , км	Расход воды $Q$ , м <sup>3</sup> /с	Уклон дна $I$	Средневзвешенный диаметр частиц, м	Скорость течения воды в поперечном сечении $v$ , м/с, сред. / макс.	Глубина воды в поперечном сечении $H$ , м, сред. / макс.	Относительная гладкость $\frac{H}{d}$ , сред. / макс.	Число Фруда $Fr = \frac{v}{\sqrt{gh}}$ сред. / макс.	Неразмывающая скорость $v_0$ , м/с, сред. / макс.	Критерий подвижности наносов $\frac{v}{v_0}$ , сред. / макс.
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Аджарисцкали, 24	405	0,0059	0,11	<u>3,82</u> 7,69	2,04 2,62	18,0 23,0	<u>0,84</u> 1,50	2,70 2,90	<u>1,41</u> 2,65
Аджарисцкали, 65	102	0,0222	0,21	<u>4,15</u> 5,45	<u>1,37</u> 1,76	<u>6,5</u> 8,4	<u>1,12</u> 1,30	<u>2,80</u> 3,00	<u>1,48</u> 1,81
Чорохи, 15	1560	0,0021	0,11	<u>3,44</u> 5,00	<u>3,46</u> 7,60	<u>31,0</u> 69,0	<u>0,57</u> 0,69	<u>3,00</u> 4,00	<u>1,13</u> 1,25
Чорохи, 22	1430	0,0027	0,07	<u>2,37</u> 5,56	<u>4,89</u> 9,80	<u>69,0</u> 140,0	<u>0,34</u> 0,55	<u>3,00</u> 3,60	<u>0,80</u> 1,60
Губазеули, 11	125	0,0100	0,09	<u>2,24</u> 3,28	<u>1,14</u> 1,47	<u>11,5</u> 15,0	<u>0,66</u> 0,91	<u>2,40</u> 2,55	<u>0,93</u> 1,28
Супса, 65	91	0,0137	0,11	<u>2,24</u> 3,08	<u>1,05</u> 1,72	<u>9,5</u> 15,6	<u>0,69</u> 0,74	<u>2,20</u> 2,60	<u>1,00</u> 1,18
Бзыбь, 22	455	0,0086	0,12	<u>2,86</u> 4,46	<u>2,94</u> 4,00	<u>25,0</u> 33,0	<u>0,55</u> 0,70	<u>2,90</u> 3,30	<u>0,98</u> 1,21
Гега, 0,5	122	0,2755	0,15	<u>2,37</u> 4,44	<u>1,98</u> 2,95	<u>12,5</u> 18,7	<u>0,53</u> 0,82	<u>2,60</u> 3,20	<u>0,91</u> 1,38
Гумиста, 7,4	265	0,0065	0,09	<u>2,87</u> 4,42	<u>1,28</u> 2,80	<u>14,0</u> 31,0	<u>0,80</u> 0,83	<u>2,30</u> 2,75	<u>1,24</u> 1,60
Кодори, 6,0	519	0,0045	0,07	<u>3,82</u> 5,00	<u>2,72</u> 4,15	<u>39,0</u> 59,0	<u>0,73</u> 0,78	<u>2,70</u> 3,00	<u>1,41</u> 1,66
Кодори, 50	428	0,0093	0,15	<u>3,22</u> 5,25	<u>3,59</u> 4,50	<u>24,0</u> 30,0	<u>0,53</u> 0,76	<u>3,40</u> 3,70	<u>0,95</u> 1,42
Гвандра, 1,5	147		0,30	<u>3,53</u> 4,73	<u>1,49</u> 2,10	<u>5,00</u> 7,00	<u>0,91</u> 1,02	<u>3,15</u> 3,60	<u>1,12</u> 1,31
Галидзга, 38	91	0,0152	0,14	<u>2,40</u> 3,82	<u>1,31</u> 1,90	<u>9,00</u> 13,0	<u>0,66</u> 0,87	<u>2,55</u> 2,90	<u>0,93</u> 1,31
Ингури, 16	768		0,04	<u>2,16</u> 2,63	<u>2,91</u> 3,60	<u>65,0</u> 80,0	<u>0,40</u> 0,44	<u>2,10</u> 2,30	<u>1,00</u> 1,14
Риони, 172	680		0,12	<u>3,43</u> 5,06	<u>2,77</u> 4,25	<u>23,0</u> 35,0	<u>0,65</u> 0,77	<u>2,90</u> 3,40	<u>1,18</u> 1,49
Шаора, 3,0	14	0,0034	0,00	<u>0,90</u> 1,19	<u>1,13</u> 1,41	<u>226,0</u> 282,0	<u>0,27</u> 0,31	<u>0,80</u> 0,85	<u>1,12</u> 1,40

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Ладжану-ри, 10	38	0,0075	0,06	2,38 3,70	1,04 1,41	17,0 23,5	0,74 0,98	2,00 2,20	1,16 1,68
Квирила, 42	625	0,0068	0,05	3,13 4,36	2,94 3,33	58,0 67,0	0,58 0,77	2,30 2,35	1,35 1,85
Квирила, 95	156	0,0053	0,04	2,73 4,76	0,78 3,42	19,5 85,0	0,81 0,94	1,70 2,20	1,60 2,16
Цхенисц-кали, 47	416		0,11	3,30 5,22	3,11 4,22	28,3 38,0	0,59 0,80	2,90 3,20	1,13 1,63
Сацискви-ло, 6,0	35	0,0120	0,04	1,61 2,58	0,99 1,65	21,3 35,9	0,49 0,64	0,80 0,85	2,00 3,03
Сочи, 1,1	298	0,0055	0,04	3,28 4,17	1,99 2,78	43,2 60,4	0,74 0,80	2,05 2,15	1,60 1,94
Псезуапсе, 11	258	0,0100	0,07	3,27 3,96	1,41 2,80	20,1 40,0	0,75 0,88	2,20 2,50	1,18 1,48
Аше, 0,8	173	0,0070	0,06	2,15 4,09	1,46 2,70	24,3 45,0	0,54 0,80	2,15 2,35	1,00 1,69

Таблица 10.3. Характеристики материалов, использованных в опытах

№ п/п	Род материалов	Диапазон изменения частной фракции в пробе $d_p$ , мм	Средне-взвешенный диаметр, мм $d_{с.в.} = \sum_{i=1}^n \frac{n_i d_i}{100}$	Коэффициент неоднородности		Удельный вес, г/см <sup>3</sup>	Гидравлическая крупность, см/с
				$\epsilon_1 = \frac{d_{95}}{d_{с.в.}}$	$\epsilon_2 = \frac{d_{95}}{d_5}$		
1	Гравий	7–17	12,80	1,17	2,00	2,65	47,00
2	Керамзит	1–21	8,50	2,23	5,71	1,28	15,40
3	Керамзит	4–10	7,40	1,15	1,63	1,28	15,00
4	Керамзит	1–3	2,00	1,40	2,33	1,60	7,10
5	Гравий	3–12	6,50	1,54	1,92	2,68	34,50

става смеси, ширины лотка и формы частиц. Поэтому экспериментально полученная кривая более точна, чем значения, определенные по любым из существующих рекомендаций. Эти кривые даны на рис. 10.4. При их получении использовалась общепринятая методика. Устанавливался равномерный режим при разных  $Q$  и  $H$ , и фиксировался момент начала подвижки частиц.

В опытах с крупным керамзитом получились перекошенные гряды, и в двух опытах была получена плоская гряда. На фотографии (рис. 10.5) иллюстрируется один из опытов, в котором были зафиксированы перекошенные гряды. Снимок сделан после спуска воды, и обсохшие части перекошенных гряд представляют собой побочни меженного русла.

Таблица 10.4. Результаты пятой серии экспериментов З.Д. Копалиани с гравием крупностью  $d_{с.в.} = 6,5$  мм,  $\omega = 0,36$  м/с

№ опыта	$Q$ , л/с	$I$	$H$ , см	$\bar{v}$ , м/с	$\frac{\sqrt{\psi_{80}}}{v} = F_{\psi}$	$\frac{H}{d}$	$\frac{\bar{v}}{v_0}$	$h_{г}$ , см	$l_{г}$ , см	$\frac{h_{г}}{H}$	$\frac{h_{г}}{d}$	$C_{г}$ , см/с	$\frac{\bar{v}}{C_{г}}$	$\sqrt{\frac{H \delta}{\omega}} = \lambda_{*2}$	$\frac{v_*}{\omega}$	Концентрация наносов, г/л	Форма гряды
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1	80	0,0070	15,0	1,07	0,88	23,1	1,53	3,0	79,9	0,20	4,61	1,1	97,27	0,10	0,28	1,79	плоские
2	128	0,0070	23,0	1,14	0,76	38,4	1,50	5,0	100	0,217	7,69	0,8	142,50	0,13	0,35	1,76	плоские
3	128	0,0070	20,0	1,28	0,91	30,7	1,73	4,5	80,0	0,25	6,92	1,17	109,40	0,12	0,33	1,56	“
4	76	0,0070	13,5			20,7		2,2	60,0	0,19	3,39	1,15					“
5	150	0,0200	18,0	1,61	1,21	28,1	2,20	3,8	80,0	0,21	5,92	6,6	24,39	0,19	0,52	7,81	“
6	150	0,0300	19,0	1,57	1,15	29,2	2,09	-	-	-	-	-	-	0,24	0,66	12,00	гладкая фаза
7	100	0,0300	11,0	1,81	1,74	16,9	3,07	1,5	52,0	0,14	-	6,7	27,01	0,18	0,50	13,00	симметрич.
8	78	0,0200	9,0	1,73	1,70	13,8	2,88	2,0	50,0	0,22	6,15	4,0	43,25	0,13	0,37	9,00	
9	75	0,0200	7,0	1,85	2,23	10,8	3,49	1,5	53,0	0,21	6,15	5,0	37,00	0,12	0,33	9,20	симметрич.
10	75	0,0200	6,0	2,50	3,28	9,2	4,90	2,0	50,0	0,33	2,30	5,27	47,44	0,11	0,30	8,25	
11	48	0,0200	6,0	1,60	2,10	9,2	3,14	-	-	-	3,08	-	-	0,11	0,30	-	
12	100	0,0300	7,0	2,90	3,40	10,8	5,37	2,0	40,0	0,28	-	4,37	67,96	0,14	0,40	18,23	симметрич.
13	75	0,0300	7,5	2,00	2,41	11,5	3,63	1,0	45,0	0,13	6,15	4,44	45,05	0,15	0,41	14,69	“
14	47	0,0300	5,5	1,74	2,38	8,4	3,48	0,65	37	0,09	1,53	5,0	34,80	0,13	0,35	15,32	“
15	40	0,0300	5,0	1,60	2,28	7,7	3,34	-	-		1,00	-		0,12	0,34	12,05	гладкая фаза
16	47	0,0300	7,5	4,27	1,58	11,5	2,30	0,65			-			0,15	0,41	15,32	
17	48	0,0100	9,0	1,06	1,12	13,8	1,76	1,0	52	0,11	1,53	1,9	55,79	0,09	0,26	4,16	плоские

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
18	51	0,0100	8,5	1,21	1,33	13,0	2,08	0,7	45	0,082	1,07	2,72	44,49	0,09	0,25	2,80	симме- трич.
19	32	0,0100	7,5	0,85	0,98	11,5	1,49	0,5	37	0,066	0,77	-	-	0,09	0,24	4,12	“
20	22	0,0100	5,5	0,80	1,09	8,4	1,60	-	-	-	-	-	-	0,07	0,20	4,77	гладкая фаза
21	70	0,0100	11,0	1,27	1,22	16,9	2,01	3,0	50	0,27	4,61	1,53	83,01	0,10	0,29	2,85	переко- шен.
22	99	0,0100	14,0	1,47	1,20	21,5	2,07	3,0	69	0,21	4,61	2,50	58,80	0,12	0,33	4,09	плоские
23	145	0,0100	19,5	1,45	1,03	30,0	1,93	4,2	90	0,21	6,46	3,07	47,23	0,14	0,38	4,00	“
24	150	0,0050	21,0	1,43	0,99	32,3	1,98	4,0	90	0,19	6,15	2,35	60,85	0,10	0,28	2,76	“
25	40	0,0050	9,0	0,88	0,94	13,8	1,44	-	-	-	-	-	-	0,07	0,18	2,07	гладкая фаза
26	75	0,0050	13,0	1,15	1,01	20,0	1,72	1,5	60	0,12	2,30	1,93	59,59	0,08	0,22	2,23	плоские
27	110	0,0050	16,5	1,34	1,05	25,4	1,91	4,0	80	0,24	6,15	1,96	68,37	0,09	0,25	3,27	“
28	32	0,0030	9,0	0,71	0,75	13,8	1,18	-	-	-	-	-	-	0,05	0,14	0,94	гладкая фаза
29	65	0,0030	13,0	1,00	0,88	20,0	1,46	2,0	60	0,15	3,08	0,90	111,11	0,06	0,17	1,23	плоские
30	87	0,0030	17,0	1,16	0,89	26,2	1,64	1,5	72,5	-	2,30	-	-	0,07	0,20	-	гладкая фаза
31	150	0,0030	24,0	1,25	0,83	36,9	1,64	4,0	95	0,088	6,15	2,30	54,35	0,08	0,23	3,00	плоские
32	150	0,0038	22,0	1,36	0,94	33,8	1,79	4,5	90	0,17	6,93	2,11	64,45	0,09	0,25	2,85	“
33	95	0,0041	17,5	1,08	0,82	26,9	1,59	1,5	67	0,24	2,30	1,27	85,04	0,08	0,23	-	“
34	138	0,0050	23,0	1,20	0,80	35,4	1,58	4,5	82,5	0,085	6,93	2,00	60,00	0,11	0,29	2,82	“
35	138	-	30,0	0,92	0,53	46,1	1,18	5,0	105	0,19	7,69	-	-	-	-	-	“
36	142	0,0041	22,7	1,18	0,55	35,6	1,55	3,5	90	0,17	5,38	1,67	70,66	0,10	0,27	1,83	“
37	142	0,0028	26,5	1,07	1,39	40,8	1,39	4,0	105	0,15	6,15	0,81	132,10	0,09	0,24	0,74	“
38	138	0,0030	17,6	1,56	1,19	27,1	2,14	4,6	83	0,25	7,08	2,00	78,00	0,07	0,20	3,00	“
39	138	-	25,0	1,10	0,76	38,4	1,46	5,0	97	0,20	7,69	-	-	-	-	0,93	“

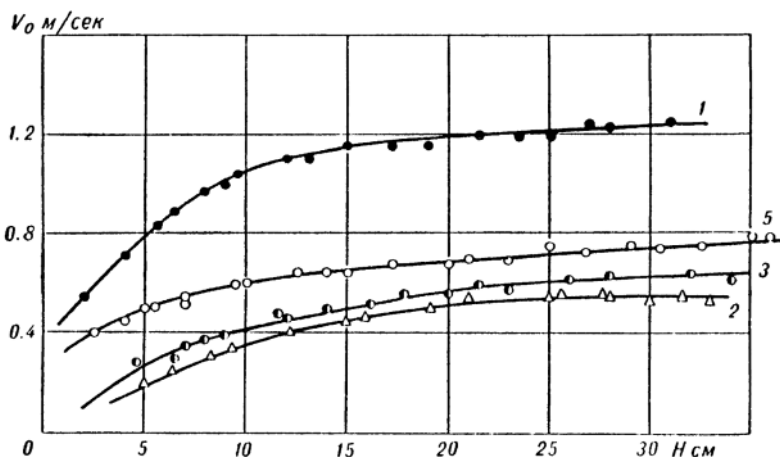


Рис. 10.4. Экспериментальные кривые неразмывающих скоростей. Номера кривых соответствуют номерам первого столбца табл. 10.3



Рис. 10.5 Опыт с керамзитом. Перекошенные гряды (побочки)

Движение гравия в лотке происходило как в форме гряд асимметричной формы с развитым подвалем и переносом частиц целиком в теле одной гряды (рис. 10.6), так и в форме симметричных гряд-волн (табл. 10.4). Последние получают-ся в опытах с большими значениями уклонов и числом Фруда при  $\frac{H}{d} < 17$ , а по форме напоминают антидюны. Качественным отличием гряд-волн от обычных гряд является безотрывное обтекание потоком гряды и совпадение кривых свободной поверхности по фазе с формой гряд. По-видимому, нельзя их причислять к антидюнам, т. к. и транспорт наносов, и движение в условиях гряд-волн



Рис. 10.6. Плоские гряды в экспериментах пятой серии

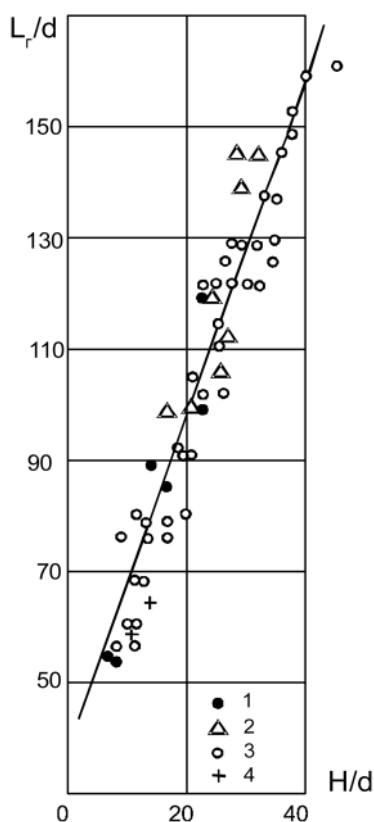


Рис. 10.7. Зависимость безразмерной длины гряд от относительной гладкости потока:

1. гравий –  $d_{с.в.} = 12,80$  мм;
2. керамзит –  $d_{с.в.} = 8,50$  мм;
3. гравий –  $d_{с.в.} = 6,5$  мм;
4. щебень –  $d_{с.в.} = 19,85$  мм

осуществляется вниз по течению. По результатам экспериментов можно провести количественный анализ параметров гряд, сложенных из крупных наносов: длины гряды, высоты, крутизны и скорости смещения  $C_r$ . В опытах наблюдалось увеличение длины гряды с увеличением глубины потока.

На рис. 10.7 представлена зависимость безразмерной длины гряды от относительной гладкости потока. Методом наименьших квадратов найдена связь между искомыми величинами:

$$\frac{L_r}{d} = 2,9 \frac{H}{d} + 37,8 \text{ при } 8 \leq \frac{H}{d} \leq 45. \quad (10.1)$$

На рис. 10.8 представлен график  $C_r$  Ялина [136], построенный в тех же координатах, что и рис. 10.7. Этот график интересен прежде всего тем, что значения  $\frac{H}{d}$  и  $\frac{L_r}{d}$  ограничены снизу значениями, которые для наших опытов имеют верх-



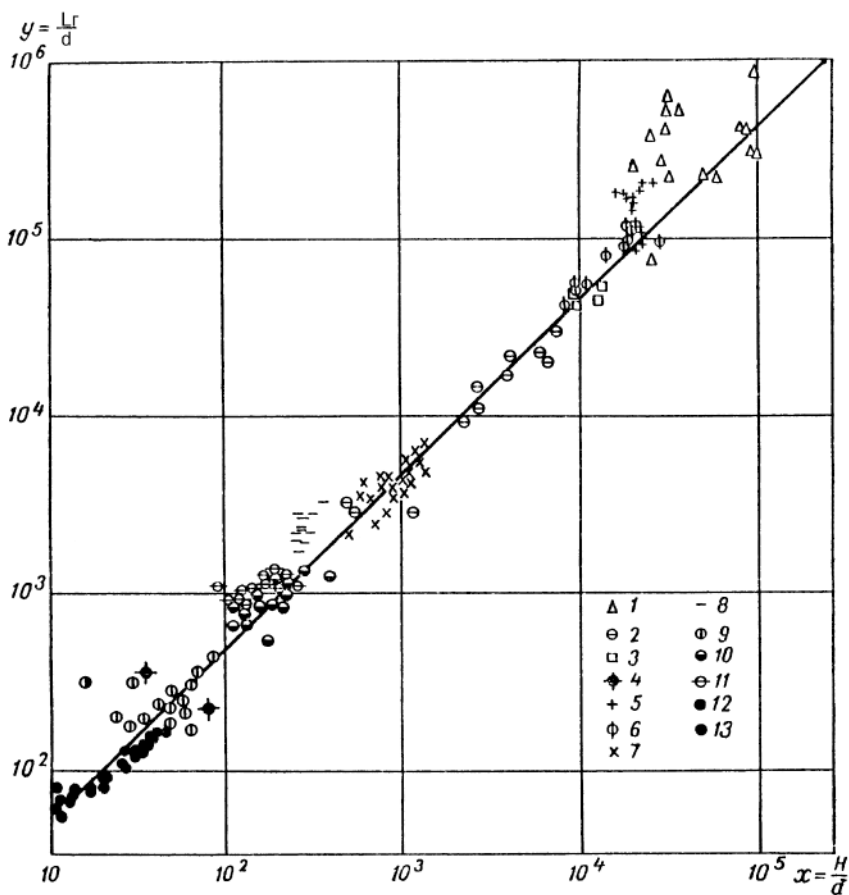


Рис. 10.8. Зависимость безразмерной длины гряды  $L$ , от относительной гладкости потока  $\frac{H}{d}$  (по данным зарубежных авторов и ГГИ).

Натурные данные: 1 – р. Миссисипи (В. Иден, В. Лейн); 2 – р. Рио-Гранде (Ф. Нордин); 3 – р. Волга (М.А. Великанов, Г.В. Лопатин); 4 – р. Северный Саскочеван (В. Гелей); 5 – р. Волга (Б.Ф. Сنيщенко); 6 – р. Днепр (Н.М. Кулемина); 7 – р. Полометь (Ю.М. Корчоха); 8 – р. Полометь (Б.Ф. Сنيщенко)/  
Лабораторные данные: 9 – полистирол  $d = 1/35$  мм (С. Ялин, А. Сей); 10 – песок  $d = 1,25$  мм,  $1,46$  мм (К. Синохара, Т. Цубаки); 11 – песок  $d = 0,80$  мм (Н.С. Знаменская); 12 – гравий  $d = 6,50$  мм (З.Д. Копалиани); 13 – керамзит  $d = 7,4$  мм,  $8,5$  мм (З.Д. Копалиани)

ние пределы. Кроме того, на этот график В. Гелей [136, 344] нанес данные натуральных измерений параметров гряд, полученных эхолотированием в паводок на канадской горной реке Северный Саскочеван, совпадающие с графиком Ялина.

При построении графика Ялин использовал экспериментальные данные Бартонa и свои (с полистиролом), а также натурные данные, полученные на реках Миссисипи и Рио-Гранде. Данные отечественных исследователей (натурные данные Б.Ф. Снищенко на реках Полометь и Волга, Н.М. Кулеминой на Днепре, Ю.М. Корчохи на Поломети и экспериментальные точки

Н.С. Знаменской), которыми не располагал Ялин, показывают их близкое соответствие. Нанесение наших экспериментальных точек позволяет экстраполировать кривую в нижней части, в области малых значений относительной гладкости потока  $\frac{H}{d}$ .

Высота гряды  $h_g$  является важной характеристикой, т. к. она входит в формулу расхода донных наносов, вычисляемого по смещению гряд.

Поскольку при грядовом транспорте наносов высота гряды выражает активный слой наносов, интересно этот слой представить в виде  $\frac{h_T}{d}$ . Это отношение для

наших опытов, как следует из табл. 10.4, изменяется от 2 до 8. Такие же значения дает Гелей [344] по натурным данным на р. Северный Саскачеван. Если эти величины отложить на графике, получим возрастание  $\frac{H}{d}$  с возрастанием  $\frac{h_T}{d}$ . От этой

величины зависит и скорость гряд  $C_g$ , но с ростом  $\frac{h_T}{d}$  значение  $C_g$  уменьшается.

На фотографии (рис. 10.9) в качестве примера, иллюстрируется скорость смещения асимметричной гряды, зафиксированная в опыте № 38 пятой серии (табл. 10.4). Такой же материал получен по всем опытам, в которых наблюдался грядовый транспорт донных наносов.

Основным выводом по результатам описанных опытов следует считать принципиальную возможность структурного (грядового) транспорта крупных наносов в лотке при условиях, имитирующих, на наш взгляд, с достаточным приближением удельные условия транспорта донных наносов в паводочном русле горной реки. Это позволяет считать, что во время паводков в горных реках при значениях определяющих критериев, представленных в табл. 10.4, возможно движение донных наносов в форме гряд.

Впоследствии данные описанных экспериментов наряду с другими данными были использованы для получения расчетной зависимости скорости движения гряд в лабораторных и натуральных условиях [248] в широком диапазоне их существования.

Полученная зависимость имеет вид:

$$C_g = 0,019vFr^{2,9}. \quad (10.2)$$

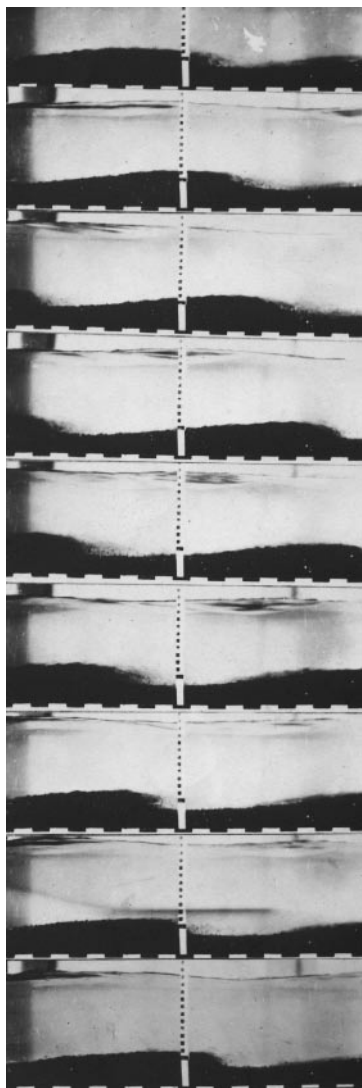


Рис. 10.9. Опыт № 38. Интервал времени между кадрами 5 с

Соответственно, для расхода донных наносов, перемещающихся в форме гряд установившегося профиля, было получено выражение:

$$q_T = 0,011 v h_T Fr^{2,9}. \quad (10.3)$$

Позже в ГГИ Д.В. Носелидзе для высоты гряд  $h_T$ , сложенных из крупных частиц в диапазоне значений  $15 < \frac{H}{d_{50}} < 200$ , была получена зависимость [200]:

$$h_T = \left( 0,07 + \frac{v}{v_0} + 0,02 \right) H. \quad (10.4)$$

Здесь неразмывающую скорость  $v_0$  рекомендуется определять по формуле В.Ф. Талмазы [259]:

$$v_0 = 2 \frac{m-1,5}{m+1} \left( \frac{H}{d} \right)^{\frac{1}{m}} \sqrt{\frac{\gamma_H - \gamma}{\gamma}} gd, \quad (10.5)$$

$m$  — показатель степени в показательной формуле распределения скоростей потока по вертикали.

После описанных выше опытов вопрос о принципиальной возможности структурного движения донных наносов в реках горно-предгорной зоны следует считать окончательно решенным положительно при следующих оговорках.

Нижний предел существования гряд при  $\frac{H}{d} > 15$  в этих экспериментах получен для относительно однородного состава наносов (табл. 10.4). При неоднородном составе крупных частиц, по-видимому, следует в этом выражении вместо  $d$  принять диаметр наиболее крупных частиц смеси, т. е.  $d_{90}$ , и считать предельным условием образования гряд  $\frac{H}{d_{90}} > 15$ , т. е. условие, соответствующее движению всей смеси донных частиц при неоднородном составе наносов руслового материала.

При условии  $\frac{H}{d_{90}} < 15$  гряды асимметричного профиля не могут существовать, поскольку гряда, имея высоту 0,20–0,25 глубины потока, сама для геометрической определенности должна состоять хотя бы из 2–3 частиц. Если допустить, что высота гряды составляет  $h_T = 3d$ , то при ее относительной высоте  $\frac{h_T}{H} = (0,20-0,25)H$  имеем  $\frac{H}{d} = 12-15$  — предельные условия образования гряд.

Малое значение  $\frac{h_T}{d}$  является основной причиной, почему гряды на горных реках не сохраняются после паводка. Они легко разрушаются на спаде волны паводка. Это явление наблюдалось в опытах при медленном спуске воды (уменьшении расхода воды) с лотка, соответствующем интервалу времени, при котором в натуральных условиях все еще сохраняется подвижность донных частиц,



Рис. 10.10. Ухвостье русловой формы на Нижней Тунгуске  
(фото Е.В. Зыкова, Ленгипроречтранс)

уменьшаясь от максимального значения во время пика паводка, до нуля, при некотором расходе воды (десятки минут в натуре, единицы минут в лабораторных условиях).

В качестве одного из важнейших выводов, вытекающих из выполненных экспериментов и анализа фактического натурального материала по рекам, сложенным из крупного аллювия, следует, что абсолютная величина крупности донных отложений сама по себе не является фактором, лимитирующим образование русловых микро- и мезоформ. Структурные формы на реках горно-предгорной зоны могут возникать из материала практически любой крупности, если при этом обеспечиваются условия  $\frac{v}{v_0} > 1$  и  $\frac{H}{d_{90}} > 15$ . В качестве примера на рис. 10.10

представлен случай наличия в русле Нижней Тунгуски гряд при крупности частиц 30–80 см.

### **10.3. Гидравлическое моделирование руслового процесса и транспорта донных наносов в реках, сложенных из крупного аллювия**

#### **10.3.1. О предшествующих исследованиях**

Гидравлические, физические модели для изучения руслового процесса и транспорта донных наносов на реках горно-предгорной зоны в естественных и проектных условиях стали использоваться с 20–30-х годов прошлого столетия. И.В. Егиазаров применил этот метод при изучении деформаций русла р. Чир-

чик [84, 86] и позднее при изучении русел рек Гедар, Вохчаберт и ряда других рек Армении.

Интересная информация об использовании гидравлических размываемых моделей в 30–40-е годы в САНИИРИ для решения задач регулирования русел предгорных рек при водозаборе содержится в монографии С.Т. Алтунина [6].

А.М. Мухамедов в период с 1950 по 1963 гг. выполнил большой комплекс модельных исследований предгорных участков ряда среднеазиатских рек в связи со строительством и эксплуатацией гидроузлов на этих реках [194, 195]. На неискаженной деформируемой модели р. Чирчик в масштабе 1:100 [масштаб крупности донных наносов 1:(30–36)] изучались русловой процесс, условия водозабора и работы инженерных сооружений Чирчикского гидроузла. На искаженной деформируемой модели р. Зеравшан, выполненной в горизонтальном масштабе 1:1000 и вертикальном масштабе 1:33, изучался русловой процесс в верхнем и нижнем бьефах с целью его учета при реконструкции Первомайской плотины. На неискаженной деформируемой модели предгорного участка р. Кафирниган, в масштабе 1:80 исследовались: русловой процесс и транспорт наносов в верхнем и нижнем бьефах плотины, условия водозабора и водозаборные сооружения, а также режим эксплуатации Бешкентинского гидроузла.

А.К. Ананян, А.Г. Назарян и М.И. Тер-Аствацатрян на размываемой модели с крупностью донных наносов 1 мм ( $d_{\max}=3,4$  мм) в горизонтальном масштабе 1:84 и 1:65 (вертикальный масштаб  $\alpha_H=1:21$ ) решали задачу прогнозирования продольного профиля горного притока оз. Севан, р. Аргичи в условиях непрерывного искусственного понижения уровня воды этого озера на 17 м [12].

Л.А. Морозов на геометрически неискаженных моделях предгорных участков рек Черноморского побережья Кавказа (Сочи, Хоста, Дагомыс, Мацеста) в 60-х–70-х годах XX века исследовал русловой процесс в естественном состоянии и при наличии руслорегулирующих сооружений.

К.Ф. Артамоновым, А.Н. Крошкиным и Г.И. Калиниченко [18] были выполнены лабораторные исследования регулирования рек горно-предгорной зоны на неискаженных моделях масштаба 1:20–1:40 с соблюдением требований динамического подобия. Опыты проводились при четырех значениях неоднородности фракционного состава наносов. Относительная гладкость потока, уклон дна и число  $Fr$  соответственно изменялись в диапазоне  $\frac{H}{d}=2,0-7,7$ ;  $I=0,009-0,045$ ;  $Fr=0,93-1,88$ .

В.Ф. Талмаза на модели излучины с деформируемым дном и жесткими стенками исследовал транспорт наносов и русловой процесс при  $I=0,001$ ;  $Fr=0,94-1,02$ ;  $\frac{H}{d}<11$  [259].

В.И. Дейнека на неискаженной гидравлической деформируемой модели предгорного участка р. Ломница изучал русловой процесс этой реки при  $I=0,009$ ,  $d=125$  мм в масштабе 1:60 [78].

Лабораторные исследования руслового процесса р. Стрый в масштабе 1:80 были выполнены В.А. Базилевичем и В.Н. Гайдученко в 1971–1973 гг. [20].

Г.И. Херхеулидзе на неискаженных размываемых гидравлических моделях в геометрических масштабах 1:100 и 1:50 выполнил исследования руслового процесса, канала переброски и регуляционных сооружений для проекта переброски стока правого, горного, притока р. Алазани в бассейн соседней горной реки. В результате опытов были обоснованы оптимальные проектные условия и режимы функционирования естественных русел, канала переброски и комплекса инженерных сооружений (транспортирующая способность канала, уклоны дна и условия их сопряжения, габариты, высота и очертания в плане канала и струенаправляющих и берегозащитных сооружений и др.) [279].

Лабораторные опыты в гидравлических лотках и на пространственных установках с целью моделирования транспорта крупных наносов в конкретных реках были выполнены также рядом зарубежных исследователей.

Д. Паркер и др. в двух гидравлических лотках размерами 12,0×0,53 м и 6,1×0,46 м исследовали транспорт донных наносов в реках Елбоу и Оук Крик в вертикальном масштабе 1:10 [415].

П. Ашмор на лабораторных установках 9×1,3 м и 10×2,3 м изучал морфологию русла и транспорт наносов блуждающего русла р. Санванты в Канаде [309].

Т. Дэвис и А. Ли на пространственной модели р. Сев. Ашбартон (Н. Зеландия) с гравийным руслом, построенной в масштабе 1:50, изучали влияние уменьшения ширины русла на уровень воды [331]. Транспорт донных наносов на этой же реке изучался В. Янгом и Т. Дэвисом в лотке 20×3 м в масштабе 1:50 [496].

Т. Хой и А. Сатерленд на лабораторной установке 14,2×3 м в масштабе 1:30–1:50 исследовали блуждающие гравийные русла рек Н. Зеландии [366].

Д. Ледди и др. на экспериментальной установке 5,5×3,5 м, в масштабе 1:20 исследовали механизм переформирования разветвленного русла р. Санванты в Канаде [394].

Д. Варбатон и Т. Дэвис в лотке 20×3 м в масштабе 1:50 изучали транспорт наносов и морфологию блуждающего русла р. Ешли в Н. Зеландии [477].

Во всех перечисленных выше случаях отечественными и зарубежными исследователями изучался исключительно бесструктурный (безгрядовый) транспорт донных наносов.

### **10.3.2. Методика гидравлического моделирования руслового процесса рек горно-предгорной зоны при структурной и бесструктурной формах транспорта донных наносов**

Как известно, при моделировании на неискаженных гидравлических моделях речных русел для обеспечения гидромеханического подобия необходимо соблюдение трех видов подобия: геометрического, динамического и кинематического. Соблюдение геометрического и динамического подобия автоматически влечет за собой выполнение кинематического подобия.

Геометрическое подобие на неискаженной модели подразумевает равенство всех линейных масштабов (длины, ширины и глубины):

$$\alpha_L = \alpha_B = \alpha_H. \quad (10.6)$$

Поэтому масштабы продольного и поперечного уклона водной поверхности:

$$\alpha_{I_L} = \alpha_{I_B} = 1. \quad (10.7)$$

В условии геометрического подобия при неискаженном моделировании включается подобие выступов геометрической шероховатости на жесткой модели или геометрическое подобие донных наносов на деформируемой модели:

$$\alpha_d = \alpha_H; \alpha_{H/d} = 1. \quad (10.8)$$

Подобие выступов геометрической шероховатости на неискаженной жесткой модели обеспечивает выполнение автомодельности гидравлических сопротивлений русла.

На динамически подобной размываемой модели из геометрического подобия донных наносов, кроме того, следует подобие форм транспорта наносов (грядовая, безгрядовая).

И в том, и в другом случае значение числа Рейнольдса  $Re = \frac{vH}{\nu}$  на модели должно превышать его критическое значение:

$$Re_{\text{мод}} > Re_{\text{кр}}. \quad (10.9)$$

Этим условием обеспечивается автомодельность явления по гидравлическим сопротивлениям. Как известно, в автомодельной зоне гидравлические сопротивления не зависят от числа Рейнольдса.

Для обеспечения динамического подобия необходимо соблюдение равенства числа Фруда на модели и в натуре:

$$Fr = \frac{v}{\sqrt{gH}} = \text{idem}, \quad (10.10)$$

откуда для масштаба скоростей потока имеем:

$$\alpha_v = \alpha_H^{1/2}. \quad (10.11)$$

Для масштаба расходов воды  $Q = BHv$  будем иметь:

$$\alpha_Q = \alpha_H^{5/2}. \quad (10.12)$$

Для обеспечения подобия деформируемых границ на размываемых моделях, кроме уменьшения размеров подвижного материала — донных наносов в принятом на модели линейном масштабе, требуется обеспечение подобия транспорта наносов и прежде всего критерия их подвижности, представляющего собой отношение скорости потока к некоторой критической неразмывающей скорости или отношения различных характерных скоростей потока, имеющих размерность скорости: неразмывающей скорости  $v_0$ , динамической скорости  $v_* = \sqrt{gHI}$ , гидравлической крупности  $w$ .

Состояние движения донных наносов в виде их влечения по дну выражается условием:

$$1 < \frac{v}{v_0} < \xi_{\text{изм}}, \quad (10.13)$$

где  $\xi_{изм}$  соответствует такому значению критерия подвижности по неразмывающей скорости  $\frac{v}{v_0}$ , когда частицы, находящиеся во влекомом состоянии, переходят во взвешенное состояние.

Поскольку масштабы всех характерных скоростей потока  $v_0, v_*, w$ , имеющих размерность скорости, на модели будут равны масштабу скорости  $\alpha_{v_0} = \alpha_{v_*} = \alpha_w = \alpha_v$ , то и для всех безразмерных критериев подвижности наносов на деформируемой неискаженной модели, представляющих собой отношения этих скоростей, при условии моделирования крупности и состава донных наносов, также автоматически будут соблюдаться равенства:

$$\alpha_{\frac{v}{v_0}} = \alpha_{\frac{v_*}{w}} = \alpha_{\frac{v}{w}} = \alpha_{\frac{Hl}{d}} = 1. \quad (10.14)$$

Отсюда следует, что режимы транспорта наносов в природе и на модели подобны друг другу, когда характерные скорости потока, определяющие транспорт наносов, находятся в одинаковом соотношении, т. е. соответствующие критерии подвижности наносов на модели и в природе равны.

Сохранение на модели критерия подвижности наносов, числа Фруда, уклона дна и значения относительной гладкости потока  $\frac{H}{d}$  повлечет за собой подобие формы транспорта наносов, выражающегося при структурном (грядовом) движении в подобии относительной высоты и длины русловых микроформ  $\frac{H}{h_T}, \frac{H}{L_T}$ . Это означает, что:

$$\alpha_{\frac{H}{h_T}} = \alpha_{\frac{H}{L_T}} = 1 \quad (10.15)$$

и

$$\alpha_{h_T} = \alpha_H; \alpha_{L_T} = \alpha_L = \alpha_H. \quad (10.16)$$

Подобие геометрических границ русла, уклона дна, зернистой шероховатости и формы транспорта наносов при условии приведет к равенству значений коэффициентов Шези и коэффициентов гидравлического сопротивления русла на модели и в природе:

$$C_{мод} = C_{нат}; \lambda_{мод} = \lambda_{нат}. \quad (10.17)$$

При структурном (грядовом) движении донных наносов, имеющем место при условии  $\frac{H}{d_{90}} \geq 15$ , с помощью зависимости для скорости движения гряд (10.2):

$$C_T = 0,019vFr^3$$

для масштаба скорости движения гряд получаем:

$$\alpha_{C_T} = \alpha_v = \alpha_H^{1/2}. \quad (10.18)$$

Для масштаба удельного расхода донных наносов в объемном выражении из зависимости (10.3):

$$q_T = 0,011h_TvFr^3$$



при  $\alpha_{H_T} = \alpha_H$  имеем:

$$\alpha_{q_T} = \alpha_H^{3/2}. \quad (10.19)$$

Для масштаба полного расхода донных наносов соответственно будем иметь:

$$\alpha_{Q_T} = \alpha_B \alpha_{q_T} = \alpha_H^{5/2}. \quad (10.20)$$

Выражение для масштабного множителя времени гидравлических процессов может быть получено из формулы скорости потока или числа Фруда:

$$\alpha_t = \frac{\alpha_L}{\alpha_v} = \alpha_H^{1/2}. \quad (10.21)$$

Соответственно, масштабный множитель времени, характеризующий движение твердой фазы в потоке, т. е. масштаб русловых процессов, при структурной форме движения наносов может быть получен из соотношения для периода движения гряд:

$$\tau = \frac{L_T}{C_T}. \quad (10.22)$$

Отсюда

$$\alpha_\tau = \alpha_H^{1/2}. \quad (10.23)$$

Таким образом, при гидравлическом моделировании на неискаженных деформируемых моделях и моделировании крупности наносов в линейном масштабе глубины потока, масштабы времени гидравлических и русловых процессов равны.

Аналогично, при подстановке в формулу баланса донных наносов формулы расхода донных наносов, при их структурном или бесструктурном транспорте для масштаба времени движения твердой фазы в потоке при безгрядовом движении донных наносов будем также иметь:

$$\alpha_\tau = \alpha_H^{1/2}. \quad (10.24)$$

Для определения масштабных соотношений для полного и удельного расходов донных наносов при их бесструктурном движении используем эмпирические формулы [259]:

$$Q_T = 7000Q \left( \frac{H}{d} \right)^{0.7} I^{2.2} \quad (10.25)$$

и

$$q_T = \left[ \frac{k\gamma_H v \sqrt{d}}{\sqrt{g}} \right] \left( \frac{v}{v_{0H}} \right)^3 (v - v_{0H}) \left( \frac{d}{H} \right)^{1/m}, \quad (10.26)$$

в которых  $v_{0H} = 0,7v_0$  — скорость потока, при которой прекращается движение донных наносов;  $k$  — коэффициент, учитывающий форму частиц;  $m=1,5 \div 0,314C \sqrt{g}$ .

Из этих зависимостей для масштабных множителей будем иметь:

$$\alpha_{Q_T} = \alpha_Q = \alpha_H^{5/2} \quad (10.27)$$

и при

$$k_H = k_M; \left( \frac{v}{v_{0H}} \right)_H = \left( \frac{v}{v_{0H}} \right)_M; \left( \frac{d}{H} \right)_H = \left( \frac{d}{H} \right)_M \quad (10.28)$$

$$\alpha_{q_T} = \alpha_H^{3/2}, \quad (10.29)$$

т. е. те же значения, что и при структурном транспорте донных наносов.

### 10.3.3. Примеры гидравлического моделирования руслового процесса на участках мостовых переходов предгорных рек

Приведенная в предыдущем разделе методика гидравлического моделирования руслового процесса на неискаженных деформируемых моделях с соблюдением геометрического подобия донных частиц была использована на трех гидравлических моделях предгорных участков рек Хара-Мурин, Утулик и Аносовка — южных притоков оз. Байкала [142, 144, 145, 385]. Эти реки стекают с хребта Хамар-Дабан. Задача исследований на этих моделях состояла в научном обосновании оптимальных схем регулирования русла на участках железнодорожных мостовых переходов: изучении гидравлического и руслового режимов в естественном состоянии и при наличии существующих инженерных сооружений на этих участках, проведении сравнительного анализа и оценки эффективности предложенных проектировщиками вариантов регули-



Рис. 10.11. Мостовой переход через р. Утулик после разрушительного паводка 1971 г.

рования русла, а также выборе наиболее надежных и экономически выгодных проектных решений регулирования речного потока и руслового процесса в период паводков.

Научные исследования были выполнены по заказу Восточно-Сибирской железной дороги (ВСЖД). Железнодорожные мосты на реках Хара-Мурин, Утулик и Аносовка были построены в 1904–1914 гг. За период их эксплуатации во время высоких паводков неоднократно имелись случаи разрушения регулиционных сооружений и мостовых строений, которые приводили к перерыву движения поездов (рис. 10.11).

Максимальные расходы воды на этих реках наблюдаются весной и летом. Их величина и продолжительность обусловлены интенсивностью и продолжительностью снеготаяния и дождей на речном водосборе и вероятностью их совпадения во времени. При общей схожести задач, решаемых на моделях рек Хара-Мурин, Утулик и Аносовка, эти реки существенно отличаются друг от друга размерами, типом руслового процесса и другими характеристиками: спецификой гидрологического, гидравлического и руслового режимов, наличием исходной информации и характером проектных предложений, разработанных проектировщиками.

В табл. 10.5 представлены общие сведения об исследуемых реках.

**Таблица 10.5. Общие сведения о реках Хара-Мурин, Утулик и Аносовка**

Река	Тип руслового процесса	Уклон дна на участке	Крупность донных отложений, м	Пл. водосбора, км <sup>2</sup> / Длина реки, км	Расчетный максимальный расход воды, м <sup>3</sup> /с обеспеченностью, %	
					0,33	1,0
Хара-Мурин	Меандрирование	0,0056	0,03–0,45	$\frac{1358}{101,0}$	2517	1749
Утулик	Осередковый и побочный тип	0,0054	0,03–0,44	$\frac{958}{86,0}$	2232	1760
Аносовка	Горная русловая многорукавность, долинное блуждание	0,0069	0,03–0,29	$\frac{100,4}{28,7}$	371	295

В табл. 10.6 приведены результаты расчета гидравлических характеристик деформируемых моделей рек Хара-Мурин, Утулик и Аносовка на основе методики моделирования, изложенной в предыдущем разделе.

Полученные числовые значения масштабных множителей позволяют, основываясь на данных натурных исследований, адекватно воспроизводить на деформируемых гидравлических моделях гидравлический и русловой режимы исследуемых участков рек и количественно описать и пересчитать на натурные условия все характеристики взаимодействия потока и русла при различных проектных решениях расположения и конструкции инженерных сооружений в руслах рек Хара-Мурин, Утулик и Аносовка при различных,

Таблица 10.6. Численные значения масштабных множителей моделирования

	Расчетная зависимость	Численные значения масштабных коэффициентов		
		р. Хара-Мурин	р. Утулик	р. Аносовка
Длина модели, м	назначается	54,0	43,4	46,4
Линейные масштабы модели (длины $\alpha_L$ , ширины $\alpha_B$ , глубины $\alpha_H$ )	(10.6)	75,0	60,0	50,0
Уклон продольный $\alpha_{ll}$ , поперечный $\alpha_{lv}$	(10.7)	1	1	1
Число Фруда $\alpha_{Fr}$	(10.10)	1	1	1
Крупность донных отложений $\alpha_d$	(10.8)	75,0	60,0	50,0
Скорость потока $\alpha_v$	(10.11)	8,66	7,75	7,07
Расход воды $\alpha_Q$	(10.12)	48712	27900	17675
Характерные скорости потока: неразмывающая $\alpha_{v0}$ , динамическая $\alpha_{v*}$ , гидравлическая крупность $\alpha_W$	(10.11)	8,66	7,75	7,07
Критерии подвижности наносов: $\alpha_{v/v0}$ ; $\alpha_{v/W}$ ; $\alpha_{H/d}$	(10.14)	1	1	1
Размеры гряд: высота $h_T$ , длина $L_T$	(10.16)	75,0	60,0	50,0
Коэффициент Шези $\alpha_C$ и гидравлического сопротивления $\alpha_\lambda$	(10.17)	1	1	1
Скорость движения гряд $\alpha_{Cr}$	(10.18)	8,66	7,75	7,07
Удельный расход донных наносов $\alpha_{q_T}$	(10.19); (10.29)	649,5	465,0	353,5
Полный расход донных наносов $\alpha_{Q_T}$	(10.20); (10.27)	48712	27900	17675
Время гидравлических процессов $\alpha_t$	(10.21)	8,66	7,75	7,07
Время русловых (морфологических) процессов $\alpha_\tau$	(10.24)	8,66	7,75	7,07

постоянных или переменных расходах воды, различной их продолжительности и интенсивности, а также при любых сочетаниях и последовательности годовых гидрографов стока воды.

### 10.3.3.1. Гидравлическая модель р. Хара-Мурин

Железнодорожный мостовой переход через р. Хара-Мурин расположен на устьевом участке реки, в 1,5 км от ее впадения в оз. Байкал. Длина реки 101 км. Ее бассейн занимает северный склон хребта Хамар-Дабан. Средний уклон русла составляет 0,014, а уклон на исследуемом участке реки — 0,0056. Максимальные расходы воды в реке наблюдаются весной и летом. Подъем уровня воды во

**Таблица 10.7. Расчетные максимальные расходы и уровни воды  
р. Хара-Мурин заданной обеспеченности**

Вероятность превышения максимальных расходов и уровней воды $P$ , %	Максимальный расход воды заданной вероятности превышения $Q$ , м <sup>3</sup> /с	Отметка максимального уровня воды заданной обеспеченности в створе гидрометрического поста у ст. Мурино, м абс.	Отметка максимального уровня воды заданной обеспеченности в створе ж/д моста, м абс.
0,33	2517,2	482,9	469,20
1,0	1749,0	481,5	467,92
2,0	1410,5	480,9	467,40
3,0	1267,3	480,6	467,12
5,0	1067,6	480,2	466,78

время паводков обычно происходит в течение 8–10 ч, пик высоких паводков держится 4–6 ч, спад длится сутки и более.

В табл. 10.7 приведены результаты расчета максимальных расходов и уровней воды различной обеспеченности, полученные на основе данных гидрологического поста, расположенного на исследуемом участке реки. Регулярные гидрометрические наблюдения на реке ведутся с 1939 г.

За время эксплуатации мостового перехода через р. Хара-Мурин в период паводков неоднократно имелись случаи разрушения регуляционных сооружений, восстановление которых требовало проведения дорогостоящих строительно-ремонтных работ. Высокие паводки 1932 и 1934 гг. сопровождалась большими разрушениями на переходе, которые привели к перерыву движения поездов. Паводки 1962 и 1971 гг. также вызвали разрушение укрепительных сооружений. Во всех отмеченных случаях причины разрушений были одни и те же: активизация пойменных течений, в результате чего размывалась правобережная подпорная стена, железнодорожная насыпь у правой опоры моста и плановые деформации вогнутых берегов излучин, в результате которых разрушались берегоукрепительные сооружения и водозабор.

Существующая к моменту начала настоящих исследований система регуляционных сооружений была признана неэффективной, не обеспечивающей безопасный пропуск расхода воды больших паводков. Проектировщиками были разработаны два основных варианта проектных решений для регулирования русла на мостовом переходе (рис. 10.12).

Первый вариант подразумевает возведение комплекса сооружений для укрепления русла при существующем его положении на участке, включающем верхнюю излучину в районе водозабора.

Второй вариант предусматривает спрямление русла на участке от автодорожного моста до железнодорожного.

В первом варианте рекомендуется также укрепление берегов излучин сползающими бетонными массивами, дополненное ныряющими шпорами длиной 30–40 м, располагаемыми под углом 45° к берегу, возведение новой правобережной

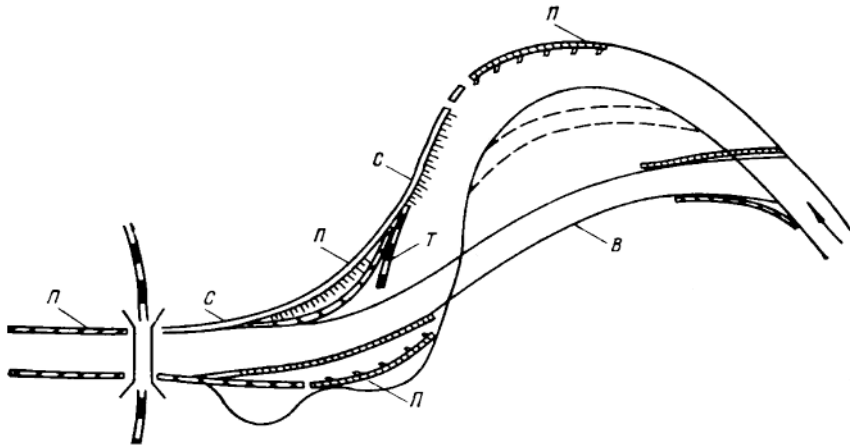


Рис. 10.12. Схема размещения проектируемых защитных сооружений на участке мостового перехода через р. Хара-Мурин; В – вариант спрямления русла; С – существующие сооружения; П – проектируемые сооружения; Т – существующий траверс

дамбы с меньшим радиусом кривизны и строительство струеотводящих дамб длиной 400 м, расположенных ниже моста. Предлагается также частично или полностью разобрать существующий траверс, отклоняющий поток в сторону предмостовой излучины (рис. 10.12).

Гидравлическая, неискаженная деформируемая модель р. Хара-Мурин длиной 53,3 м была построена в линейном масштабе 1:75 (рис. 10.13) (табл. 10.6). Строительство и тарировка модели осуществлялись на основе



Рис. 10.13. Гидравлическая модель р. Хара-Мурин

имеющихся топографических, геологических, режимных гидрологических материалов и данных о гранулометрическом составе донных отложений и гидравлических характеристиках потока, полученных во время натурных исследований ГГИ 1978–1980 гг. Особое внимание было уделено изучению гранулометрического состава донных наносов. В соответствии с материалами обработки проб донных наносов в 43 точках русла фотографическим методом, средняя крупность донных наносов в натуре составляла 18,7 см (2,5 мм на модели) при диапазоне крайних фракций 3,0–45,0 см. Отдельные включения достигали 50–70 см.

Основными тарировочными режимами были приняты наблюдаемые расходы воды 1 и 5 %-ной обеспеченности.

Всего на модели было выполнено 32 опыта, разделенных на три серии. Опыты серии I (8 опытов) выполнялись на жесткой модели, опыты серии II, в которых изучался вариант спрямления русла (4 опыта), выполнялись на жесткой и деформируемой модели, а опыты серии III (20 опытов) — на деформируемой модели.

В экспериментах с помощью девяти уровнемеров, установленных в различных точках модели, измерялись отметки и уклоны водной поверхности. Поле поверхностных скоростей потока снималось методом фотосъемки светящихся поплавков. В опытах на размываемой модели фиксировались геометрические и динамические параметры русловых микроформ и мезоформ (табл. 10.8), а после каждого опыта производилась топографическая съемка рельефа дна с подробным освещением характеристик местных размывов дна вдоль вогнутых берегов излучин, у оголовков сооружений и опор моста. На размываемой модели производилась подача наносов в начале экспериментальной установки в количестве, необходимом для сохранения отметок дна на начальном участке модели. Этим обеспечивалось сохранение продольного профиля дна в состоянии динамического равновесия.

Количество подаваемого в единицу времени твердого материала для расхода воды 1%-ной обеспеченности составляло на модели 29 г/с, или 0,82 г/л, что соответствует в натуре расходу донных наносов 1,4 т/с (в объемном выражении 2520 м<sup>3</sup>/ч). Расход донных наносов при расходе воды 0,33%-ной обеспеченности соответственно для модели и природы составил 0,83 г/л и 3744 м<sup>3</sup>/ч. При этом любопытно отметить, что за время опыта продолжительностью 1 ч (8,66 ч. в натуре — примерная продолжительность дождевого паводка) частицы наносов, поданные в начале модели, успевали пройти всю ее длину, что свидетельствует об исключительно высоких темпах руслоформирования р. Хара-Мурин и вообще русел рек, сложенных из крупного аллювия во время высоких паводков.

Результаты выполненных исследований состоят в следующем.

- Деформируемая модель русла горной р. Хара-Мурин на участке расположения железнодорожного мостового перехода, удовлетворяя всем условиям гидромеханического подобия (геометрическому, динамическому, кинематическому), а также условиям однозначности (граничные и начальные условия), адекватно отражала реальный объект. Это дало возможность исследовать и однозначно пересчитать для условий природы

**Таблица 10.8. Геометрические и динамические характеристики гряд на деформируемой модели р. Хара-Мурин**

№ п/п	№ опыта	Обеспеченность расхода воды, %	Глубина потока на модели, см	Средняя скорость потока на вертикали: на модели, см/с в натуре, м/с	Число Фруда $Fr = \frac{v}{\sqrt{gh}}$	Скорость пере-мещения гряд: на модели, см/с в натуре, м/ч.	Высота гряд, см: на модели в натуре
1	2	3	4	5	6	7	8
<b>Микроформы</b>							
1	10	1	4,5	<u>35,1</u> 2,9	0,47	<u>0,25</u> 77,8	<u>0,9</u> 67,5
2			3,0	<u>63,0</u> 5,2	1,16	<u>0,67</u> 208,8	<u>0,5</u> 37,5
3	11	0,33	6,0	<u>53,6</u> 4,6	0,70	<u>0,66</u> 205,8	<u>1,0</u> 75,0
4			5,0	<u>67,5</u> 5,8	0,96	<u>0,80</u> 249,4	<u>1,0</u> 75,0
5			5,0	<u>57,7</u> 5,0	0,82	<u>1,00</u> 311,8	<u>1,0</u> 75,0
6	26		5,5	<u>57,7</u> 5,0	0,77	<u>0,40</u> 124,7	<u>0,5</u> 37,5
7			6,7	<u>61,4</u> 5,3	0,76	<u>0,57</u> 177,2	<u>1,7</u> 127,5
8			7,0	<u>61,4</u> 5,3	0,74	<u>0,57</u> 177,2	<u>1,5</u> 112,5
9			5,5	<u>57,3</u> 5,0	0,78	<u>0,78</u>	<u>1,0</u> 75,0
10			4,5	<u>50,7</u> 4,4	0,76	<u>0,40</u> 124,7	<u>1,1</u> 82,5
11			4,0	<u>47,7</u> 4,1	0,75	<u>0,33</u> 102,9	<u>2,0</u> 150,0
12	27	Гидрограф стока	4,5	<u>53,7</u> 4,6	0,82	<u>0,50</u> 155,9	<u>0,5</u> 37,5
13			3,0	<u>61,4</u> 5,3	1,14	<u>0,77</u> 150,0	<u>0,5</u> 37,5
14			3,8	<u>61,4</u> 5,3	1,00	<u>0,95</u> 296,2	<u>0,5</u> 37,5
15	28	0,33	6,0	<u>61,4</u> 5,3	0,80	<u>0,57</u> 177,2	<u>0,8</u> 60,0
16			4,5	<u>66,2</u> 5,7	0,99	<u>0,66</u> 205,8	<u>0,7</u> 52,5
17			6,0	<u>43,0</u> 3,7	0,56	<u>0,31</u> 96,6	<u>1,2</u> 90,0



1	2	3	4	5	6	7	8
18			6,0	<u>53,8</u> 4,7	0,70	<u>0,77</u> 150,0	<u>0,9</u> 67,5
19			6,0	<u>66,2</u> 5,7	0,86	<u>0,55</u> 171,4	<u>1,0</u> 75,0
20			3,5	<u>68,8</u> 6,0	1,17	<u>0,53</u> 155,2	<u>0,5</u> 37,5
21			4,3	<u>63,6</u> <u>5,5</u>	0,91	<u>0,91</u> 283,6	<u>0,6</u> 45,0
22			4,5	<u>63,6</u> 5,5	0,94	<u>0,71</u> 221,3	<u>0,6</u> 45,0
23			6,0	<u>66,2</u> 5,7	0,86	<u>0,59</u> 183,9	<u>0,8</u> 60,0
24	29	0,33	4,5	<u>64,5</u> 5,6	0,97	<u>1,00</u> 311,8	<u>0,5</u> 37,5
Мезоформы							
25	10	1	3,0	<u>56,0</u> 4,6	1,00	<u>0,17</u> 53,0	<u>2,6</u> 187,5
26			4,0	<u>63,0</u> 5,2	1,00	<u>0,18</u> 56,1	<u>2,6</u> 187,5
27	11	0,33	6,0	<u>37,0</u> 3,2	0,49	<u>0,15</u> 46,8	<u>3,0</u> 225,0
28			5,0	<u>60,2</u> 5,2	0,86	<u>0,06</u> 18,7	<u>3,0</u> 225,0
29			5,0	<u>60,2</u> 5,2	0,86	<u>0,05</u> 15,6	<u>4,0</u> 300,0
30	17	12,8	2,0	<u>46,4</u> 4,0	1,00	<u>0,08</u> 24,9	<u>2,0</u> 150,0
31	19	0,33	6,5	<u>64,5</u> 5,5	0,80	<u>0,08</u> 24,9	<u>3,5</u> 262,5
32	23	1	2,0	<u>51,6</u> 4,5	1,16	<u>0,08</u> 24,9	<u>1,5</u> 112,5
33	26	0,33	1,5	<u>67,9</u> 5,9	0,80	<u>0,25</u> 77,8	<u>3,0</u> 225,0
34	27	Гидрограф стока	3,0	<u>47,5</u> 4,1	0,87	<u>0,04</u> 12,5	<u>2,0</u> 150
35			2,5	<u>50,7</u> 4,4	1,00	<u>1,02</u> 6,2	<u>3,8</u> 275,5

все аспекты исследуемого явления в бытовых и различных проектных условиях: характер и параметры общих и местных деформаций русла, кинематическую структуру потока, формы транспорта наносов и их количество, отметки и уклоны водной поверхности, последствия тех или иных инженерных мероприятий и способы защиты от нежелательных проявлений русловых деформаций.

- Русловой процесс р. Хара-Мурын на исследуемом участке осуществляется по схеме меандрирования, выражающегося в смещении берегов излучин в результате развития плесовых ям у вогнутых берегов.
- Внутрирусловые деформации проявляются в виде смещения микро- и мезоформ руслового рельефа и определяют обратимые деформации дна.
- Высота микроформ на исследуемом участке русла р. Хара-Мурын при расходах воды 1 и 0,33%-ной обеспеченности составляет 37,5–150,0 см, а скорость их перемещения — 77,8–311,8 м/ч. Высота мезоформ при тех же расходах воды достигает 285 см, а скорость их перемещения составляет 6,2–77,8 м/ч (табл. 10.8).



а)



б)

Рис. 10.14. Ныряющие шпоры вдоль вогнутого берега в межень:  
а – в лабораторных условиях; б – в натуральных условиях



Рис. 10.15. Разрушение ныряющих шпор выше водозабора после прохождения паводка 0,33 %-ной обеспеченности

- Первая подвижка наносов в русле р. Хара-Мурин начинается при расходе воды  $614 \text{ м}^3/\text{с}$ , соответствующем 15,7 %-ной обеспеченности максимальных расходов.
- Местные размывы дна у оголовков существующих ныряющих шпор выше водозабора и проектируемых шпор в предмостовой излучине начинаются уже при расходе воды  $409 \text{ м}^3/\text{с}$ , соответствующем среднему многолетнему максимальному расходу воды, и вызывают их оседание и деформацию (рис. 10.14).
- Предусмотренная в проекте защита вогнутого берега излучины выше водозабора ныряющими шпорами с креплением берега сползающими бетонными массивами является неэффективной (рис. 10.15).
- Предусмотренное в одном из проектных решений местное спрямление русла выше водозабора нецелесообразно.
- Общее спрямление русла р. Хара-Мурин от автодорожного моста практически не осуществимо ввиду его чрезвычайной плановой и высотной неустойчивости без полного капитального крепления его дна и берегов, что является экономически невыгодным.
- В результате опытов на деформируемой модели установлены зоны размыва вогнутых берегов излучин (развития плесов), испытан и предложен метод их защиты от размыва глухими незатопляемыми шпорами с креплением дна засыпкой камня у их оголовков по контуру размыва, установленному в опытах. Крупность отсыпаемого у оголовков шпор камня составляет  $75,0\text{--}97,5 \text{ см}$ . Для отсыпки целесообразно использование тетраподов той же массы. На рис. 10,16–10,18 представлены результаты опытов, демонстрирующие эффективность описанного ме-



Рис. 10.16. Характер местных размывов оголовков незатопляемых шпор после опыта при расходе воды 0,33 %-ной обеспеченности



Рис. 10.17. Засыпка крупным камнем контура размыва у оголовков шпор



Рис. 10.18. Оголовки шпор по окончании опыта после пропуска на модели расхода воды 0,33 %-ной обеспеченности

тогда защиты берега от размыва глухими шпорами с отсыпкой камня у оголовков.

- Наличие или отсутствие правобережного траверса существенно влияет на кинематическую структуру потока и характер местного размыва у вогнутого берега предмостовой излучины.
- Строительство струеотводящих дамб за мостом при расходе воды 0,33 %-ной обеспеченности повышает уровень воды в створе моста на 80 см по сравнению с условиями естественного растекания потока за мостом, что вызывает нежелательное затопление правобережной подпорной стены. Отсюда следует вывод о нецелесообразности строительства струеотводящих дамб ниже моста.
- Выполненное исследование руслового процесса р. Хара-Мурин позволяет в качестве наиболее рациональной схемы регулирования ее русла рекомендовать вариант 1.
- При этом представляется возможным отказаться от крепления берега сползающими бетонными массивами и ныряющими шпорами. Для защиты этого берега рекомендуется использовать метод, предложенный в настоящем исследовании, с помощью незатопляемых шпор и защиты их оголовков каменной отсыпкой. Выше водозабора на коротком участке выхода воды на пойму при расходах воды 1 и 0,33 %-ной обеспеченности необходимо предусмотреть досыпку бровки берега до незатопляемых отметок.
- Строительство правобережной дамбы нового очертания в плане, взамен существующей, представляется необязательным и поэтому нерациональным, так как в отличие от результатов расчета, выполненных проектировщиками, опытами на модели было показано, что существующая дамба не затопливается.
- Защита левого берега предмостовой излучины рекомендуется в зависимости от наличия или отсутствия правобережного траверса тем же методом, что и правобережной излучины, с помощью отсыпки крупного камня у оголовков шпор. Крепление берега сползающими бетонными массивами и в таком случае здесь оказывается нецелесообразным.
- Не следует опасаться существования аккумулятивных зон скопления наносов в русле, в том числе выше и ниже моста, т. к. они отражают условие динамического равновесия гидравлических характеристик паводочного расхода воды и морфологии русла при руслоформирующих расходах воды 0,33 и 1 %-ной обеспеченности. По этой же причине не следует предусматривать в проекте и осуществлять в ходе эксплуатации мостового перехода расчистку дна реки. Малые расходы воды (менее 600 м<sup>3</sup>/с) не являются руслоформирующими. Увеличение расходов воды сопровождается повышением уровня воды и затоплением русловых форм, что вызывает выравнивание гидравлических характеристик потока по ширине русла, в результате которого исключается возможность сосредоточения всего паводочного потока в отдельных рукавах меженного русла, чего опасались проектировщики.

### 10.3.3.2. Гидравлическая модель р. Утулик

Система регуляционных сооружений на участке железнодорожных мостовых переходов через р. Утулик, расположенных на расстоянии 24 м друг от друга, неоднократно подвергалась повреждению и разрушению во время паводков. Наиболее существенные разрушения на этих мостовых переходах произошли во время паводка в июле 1971 г., в результате которого были размыты правобережная дамба и правобережный подход железнодорожной насыпи к мосту. Был подмыт и опрокинут правобережный устой верхнего по течению моста, и обрушилось металлическое пролетное строение (рис. 10.11).

После паводка 1971 г. на участке мостового перехода через р. Утулик были выполнены капитальные восстановительные работы и сооружена новая система регуляционных сооружений. Проектирование и строительство новой системы регуляционных сооружений были выполнены без надлежащего научного обоснования.

Водный режим р. Утулик определяется преобладанием роли дождевых паводков и снеготаяния среди других источников водного питания реки.

Наносы в русло р. Утулик поступают из бассейна и притоков (в большей части селевых) в основном в крупнообломочной форме, что и определяет преимущественный их транзит вниз по гидрографической сети в виде влечения по дну или сальтации в придонном слое потока.

В результате расчетов, выполненных в 1972 г. в Ленгипротрансе, в соответствии СН 435–72 были получены следующие расчетные значения максимальных расходов воды:  $Q_{1\%} = 1760 \text{ м}^3/\text{с}$ ;  $Q_{0,3\%} = 2232 \text{ м}^3/\text{с}$ , которые были приняты в качестве основных в настоящих исследованиях.

По имеющимся картографическим и топографическим материалам установлено, что русловой процесс на исследуемом участке русла р. Утулик от выхода из гор до железнодорожных мостов в естественном состоянии протекал по схеме побочного и осередкового типа. Это выражалось в движении мезоформ речного русла, их периодическом отторжении от берега и приращении к нему.

Ниже этих мостов русло раздваивается, и далее, дробясь на рукава дельты, река впадает в оз. Байкал.

Задачей настоящих исследований было изучение руслового процесса р. Утулик на участке ж/д мостовых переходов в целях оценки надежности существующей системы регуляционных сооружений и разработки рекомендаций по их усилению.

Рассматривались следующие характеристики потока и русла:

- пропускная способность подмостового русла и уровни водной поверхности по всей длине участка регулирования в условиях проектных расходов воды 0,33 и 1%-ной обеспеченности;
- русловые деформации и транспорт наносов (характер обратимых деформаций, толщина слоя движущихся наносов, участки скопления наносов и размывов русла, пространственно-временные параметры этих деформаций);
- скоростная структура потока;

- способы защиты от разрушения существующих регуляционных сооружений;
- рациональные схемы и конструкции по укреплению существующих регуляционных сооружений.

Деформируемая, неискаженная гидравлическая модель р. Утулик была построена в масштабе 1:60. На модели воспроизводилась также пойма в жестком варианте (рис. 10.19). Численные значения масштабных множителей, рассчитанные по описанной выше методике, были представлены выше в табл. 10.6.

Исходя из специфики объекта и решаемой задачи, на модели воспроизводилось три положения русла и расположения систем регуляционных сооружений:

- состояние русла и регуляционных сооружений 1904–1945 гг., когда регуляционные сооружения состояли только из земляной дамбы, перекрывающей протоку выше железнодорожного моста и струнаправляющих сооружений у моста (рис. 10.20);
- состояние русла и регуляционных сооружений с 1945 по 1964 г. и с 1964 по 1971 г., различающееся незначительно — наличием после 1964 г. струнаправляющей дамбы у автодорожного моста, что и учитывалось на модели при пропуске паводка 1971 г. (рис. 10.20);
- современное состояние русла и систем регуляционных сооружений (рис. 10.21).

В соответствии с отмеченным, полный цикл экспериментов, выполненных на деформируемой модели р. Утулик, состоял из тарировочной серии и трех серий экспериментов, каждая из которых соответствовала определенному положению русла и систем регуляционных сооружений.



Рис. 10.19. Гидравлическая модель р. Утулик

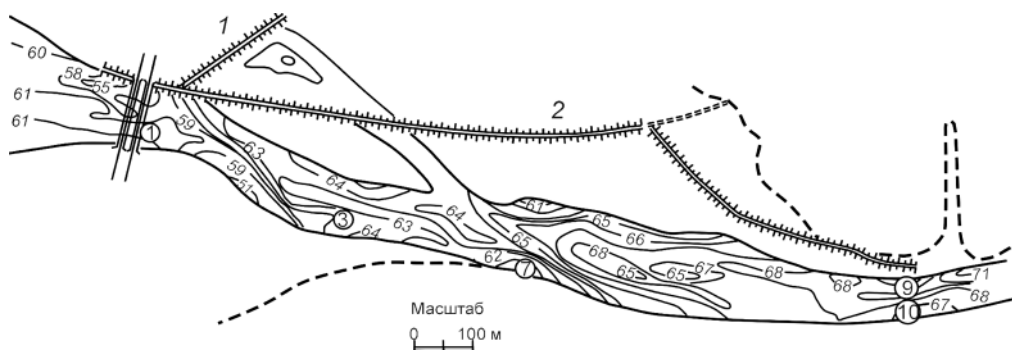


Рис. 10.20. Схема участка русла и регуляционных сооружений на р. Утулик: 1 – с 1904 до 1945 г.; 2 – с 1945 по 1971 г. Цифры в кружках – номера водомерных игл

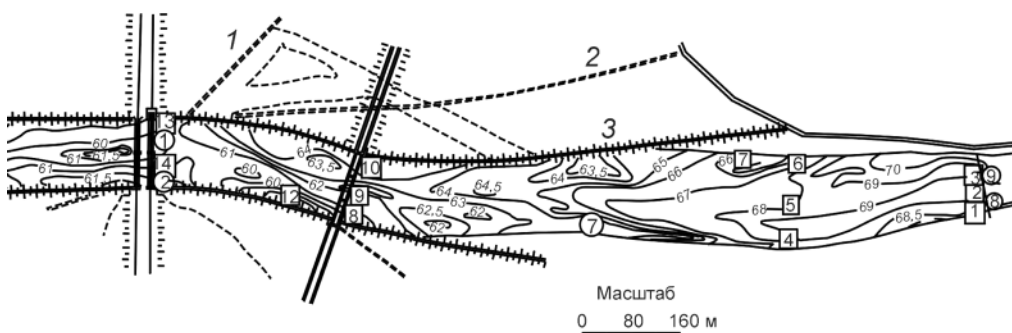


Рис. 10.21. Схема современного состояния русла и системы регуляционных сооружений на участке мостовых переходов через р. Утулик. Цифры в квадратах – местоположение отбора проб

Первая серия экспериментов (состояние с 1904 по 1945 г.) включала 8 опытов, вторая (состояние с 1945 по 1971 г.) — 6 опытов и третья серия (современное состояние) — 22 опыта.

На модели было установлено 10 мерных игл для фиксации в опытах уровней водной поверхности.

В ходе экспериментов измерялись уровни воды и уклоны водной поверхности, скоростное поле потока, геометрические и динамические характеристики микро- и мезоформ руслового рельефа, распределение гранулометрического состава наносов на модели, расход донных наносов, а после каждого опыта выполнялась топографическая съемка рельефа дна. В опытах испытывались различные варианты и подварианты регулирования русла и оценивалась эффективность различных защитных инженерных мероприятий.

Сначала на модель подавались наносы, крупность которых была смоделирована в линейном масштабе, а их количество определялось из условия сохранения в процессе опыта постоянного уклона дна, соответствующего состоянию динамического равновесия, при котором расход наносов отвечает транспортирующей способности потока.



Скоростное поле потока на модели измерялось методом фотосъемки светящихся поплавков. гранулометрический состав наносов определялся ситовым методом, динамика микро- и мезоформ русла изучалась с помощью специальных масштабных скоб и секундомера.

Тарировка деформируемой модели р. Утулик и постановка лабораторных экспериментов производились на основе подробных данных натуральных наблюдений, выполненных в 1981 и в 1982 гг.

Поскольку за время эксплуатации мостового перехода состояние русла и системы регуляционных сооружений многократно менялись, для тарировки модели в основном были использованы данные многочисленных гидрометрических измерений в гидрометрическом створе. Влияние регуляционных сооружений из-за большого уклона дна реки (5,4 м на километр) и достаточной удаленности (в 1,37 км выше железнодорожного моста) на гидравлические характеристики потока в створе гидрометрических измерений не сказывалось.

В тарировочной серии было проведено 5 экспериментов, в которых измерялись уровни воды, уклоны водной поверхности, скоростное поле потока и уклон дна. В этой серии опытов определялись расход донных наносов и их фракционный состав. Для этого в натуральных условиях в различных частях русла, свободного во время межени от воды, брались пробы донных отложений фотографическим методом. Всего на различных фрагментах русла на его поверхности и под слоем самоотмостки было взято 132 пробы. Средневзвешенный диаметр донных отложений в натуральных условиях колеблется в широких пределах от 3,1 до 44,1 см, составляя в среднем 20,3 см (54 пробы). В лабораторных условиях эта же характеристика в пересчете на натуру в различных точках модели, в различных опытах менялась в пределах 4,3–41,9 см, в среднем составляя 19,5 см, что весьма близко к натурным значениям.

Тарировочная серия экспериментов начиналась с гладкого дна русла модели, постепенно увеличивался расход воды, а затем в обратном порядке уменьшался. При этом определялись структура потока, уклоны дна и водной поверхности, расход донных наносов.

При расходе воды 1%-ной обеспеченности расход наносов, соответствующий состоянию динамического равновесия потока и русла на модели, составил 62,1 см<sup>3</sup>/с, а при расходе воды 0,33%-ной обеспеченности — 121,2 см<sup>3</sup>/с.

Первая подвижка самых мелких наносов на модели наблюдалась при расходе воды 23,0 л/с, соответствующем в натуральных условиях расходу 643 м<sup>3</sup>/с, а заметное движение мелкой составляющей смеси отмечалось при расходе 28,7 л/с (800 м<sup>3</sup>/с, натура), соответствующем 5%-ной обеспеченности максимальных расходов воды.

Зависимость  $v=f(Q)$  (рис. 10.22) получена в гидрометрическом створе для средних и максимальных скоростей потока в тарировочной серии опытов. Нанесенные на график точки, которые получены в натуральных и в лабораторных условиях, свидетельствуют об их удовлетворительном соответствии. По данным тарировки, для кривой связи соответственных уровней воды на водомерном посту и в створе мостового перехода также наблюдается хорошее соответствие лабораторных данных натурным.

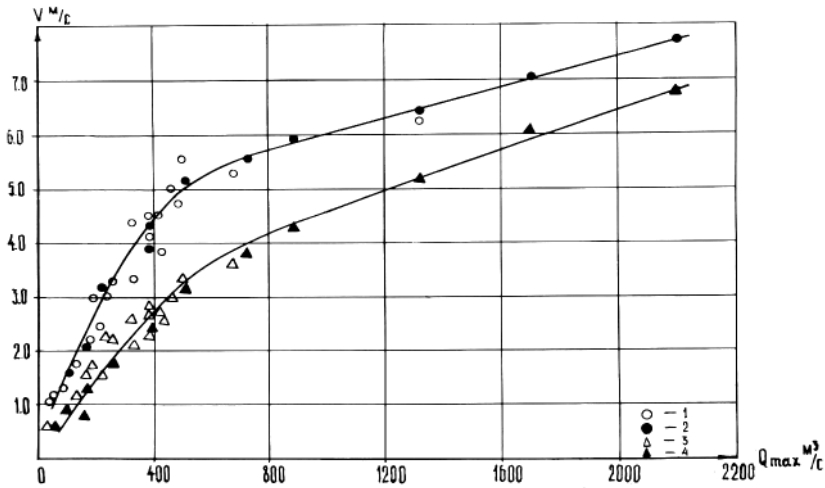


Рис. 10.22. Зависимость  $v=f(Q)$ , полученная для р. Утулик в гидрометрическом створе на основе натуральных и лабораторных данных; 1 –  $v_{\max}$  в натуральных условиях; 2 – то же на модели; 3 –  $v_{cp}$  в натуральных условиях; 4 – то же на модели

Целью экспериментов при системе регуляционных сооружений 1904–1945 гг. (рис. 10.20) было воссоздать русловой и гидравлический режим на участке при наименьшем, по сравнению с более поздним периодом, вмешательстве в естественный ход развития русловых деформаций, исследовать причины разрушений при паводках этого периода и получить данные о гидравлических параметрах и русловом режиме для сравнения с последующим состоянием русла и системами регуляционных сооружений. Кроме расчетных расходов воды 0,33 %-ной обеспеченности  $2232 \text{ м}^3/\text{с}$  ( $80,0 \text{ л/с}$  на модели), в этой серии опыты выполнялись также при расходах воды  $391 \text{ м}^3/\text{с}$  ( $14,0 \text{ л/с}$ ),  $670 \text{ м}^3/\text{с}$  ( $24,0 \text{ л/с}$ ) и  $865 \text{ м}^3/\text{с}$  ( $31,0 \text{ л/с}$ ).

Отмеченное делалось с целью освещения гидравлического и руслового режимов во всем диапазоне максимальных расходов воды и использования этих данных при построении связей соответственных уровней воды в створах мостового перехода и водомерного поста  $H_{\text{мост}}$  от  $H_{\text{вмн}}$  и кривой  $H_{\text{мост}}=f(Q)$  для обнаружения эффектов влияния систем регуляционных сооружений на гидрологический, гидравлический и русловой режимы реки.

Движение наносов в опытах этой серии наблюдалось при расходе воды  $670 \text{ м}^3/\text{с}$  (первая подвижка мелких фракций  $d=3-5 \text{ см}$  в пересчете на натуру). При расходе воды  $865 \text{ м}^3/\text{с}$  и выше уже отмечалось заметное движение фракций диаметром до  $12 \text{ см}$ . Движение наносов при расходах воды  $865 \text{ м}^3/\text{с}$  и выше наблюдалось в виде микроформ речного русла, ленточных гряд и мезоформ. В табл. 10.9 представлены характеристики потока и структурных форм перемещения донных наносов на модели. Рельеф дна, полученный в опыте при расходе воды 0,33 %-ной обеспеченности, представлен на рис. 10.20.

Рассмотрение этого рисунка показывает, что в естественном состоянии русла выше протоки, в расширении русла, образуется осередок высотой  $4 \text{ м}$ .

Морфология русла, полученная в опыте, в целом и в основных деталях идентична морфологии, представленной на топоснимках русла соответствующего периода. По бокам ухвостья этого осередка (по данным опыта) образуются плесовые ямы с минимальной отметкой 61,0 м. Обращает также внимание наличие местной ямы размыва у левого берега, выше ж/д моста на 200 м с минимальной отметкой 55 м. В створе ж/д моста отметки дна составляют в правом пролете у правого устоя 57,7 м, а в левом пролете — 61,0 м, т.е. на 3,5 м выше. Минимальные отметки мостовых размывов у промежуточных опор моста составляют 59,3 и 58,5 м.

Как следует из данных опытов, поверхностные скорости потока при расходе воды 1%-ной обеспеченности на участке распределены неравномерно, их значения вдоль левого берега достигают 7,6 м/с.

Скорости потока в протоке вдоль земляной дамбы и на участке выхода потока из протоки выше ж/д мостового перехода при расходе воды 0,33 %-ной обеспеченности вполне достаточны для размыва необлицованной дамбы, подмыва правобережной струенаправляющей дамбы и устоя моста, что и наблюдалось во время паводков 1915, 1927, 1928, 1932 и 1934 гг. При этом, на модели у правого устоя моста отмечалась местная яма размыва глубиной 4 м с наинизшей отметкой 56,0 м, которая является также наинизшей на всем подмостовом участке русла. По-видимому, все это и было причиной разрушений регуляционных сооружений на участке в 1904–1934 гг.

Из табл. 10.9 следует, что при расходе воды 0,33 %-ной обеспеченности в первой серии опытов наибольшую из всех форм высоту (126 см) имела мезоформа в 1060 м выше ж/д моста, которая перемещалась со скоростью 92 м/ч (опыт 7).

Вторая серия экспериментов состояла из трех опытов (табл. 10.9, опыты 11–13), которые были выполнены при расходе воды 1 %-ной обеспеченности и системе регуляционных сооружений 1945–1971 гг. (рис. 10.20). Общая морфология русла, по сравнению с опытами предыдущей серии, в ходе второй серии экспериментов не претерпела существенных изменений. Выше протоки в расширении русла остался осередок с теми же размерами, но он несколько сместился вниз по течению. Яма размыва у левого берега на расстоянии 300 м выше ж/д моста также не изменила своего положения. Распределение глубин в подмостовой части русла в этой серии экспериментов приобрело более равномерный характер. Отметки дна под левым пролетом моста всего на 1 м превышали отметки под правым пролетом, тогда как в первой серии экспериментов эта разница составляла 3,5 м (рис. 10.20).

В опыте 12, также как в опыте 9 предыдущей серии, наблюдается четкая дифференциация наносов на различных фрагментах русла. Пробы, взятые вдоль левого берега, имеют значительно более крупный состав по сравнению с пробами, взятыми вдоль правого берега.

Третья серия экспериментов включала 22 опыта. В этой серии на модели была воспроизведена система регуляционных сооружений, построенная на р. Утулик после паводка 1971 г. (рис. 10.21).

Уровень воды под ж/д мостом в опыте 15 при расходе воды 0,33 %-ной обеспеченности на 1 м ниже отметки низа конструкции.

Таблица 10.9. Характеристики потока и структурных форм перемещения донных наносов по данным экспериментов на модели р. Утулик

№ опыта	Обеспеченность расхода воды, % и значения расходов в опытах: 7, 24', 24", на модели, л/с в натуре, м <sup>3</sup> /с	Глубина потока на модели, см	Средняя скорость потока на вертикали: на модели, см/с в натуре, м/с	Число Фруда $Fr = \frac{v}{\sqrt{gh}}$	Скорость перемещения гряд: на модели, см/с в натуре, м/ч	Высота гряд, см: на модели в натуре	Характер форм
1	2	3	4	5	6	7	8
6	0,33	5,0	$\frac{68,2}{5,3}$	0,97	$\frac{0,86}{240}$	$\frac{0,8}{48}$	М
6	0,33	4,5	$\frac{43,5}{3,4}$	0,65	$\frac{0,24}{67}$	$\frac{2,0}{120}$	Л
7	$\frac{31 \text{ л/с}}{865 \text{ м}^3/\text{с}}$	3,5	$\frac{60,0}{4,6}$	1,02	$\frac{0,33}{92}$	$\frac{2,1}{126}$	Меэ
9	0,33	6,5	$\frac{45,4}{3,6}$	0,57	$\frac{0,37}{103}$	$\frac{1,5-2,0}{120}$	Л
9	0,33	4,0–4,5	$\frac{50,0}{3,9}$	0,77	$\frac{0,33}{93}$	$\frac{1,0}{68}$	М
9	0,33	4,5	$\frac{50,0}{3,9}$	0,75	$\frac{0,33}{93}$	$\frac{1,5}{90}$	Л
10	0,33	3,0	$\frac{50,0}{3,9}$	0,92	$\frac{0,17}{47}$	$\frac{3,0}{180}$	Меэ
11	1	4,0	$\frac{60,0}{4,6}$	0,95	$\frac{0,33}{92}$	$\frac{1,1}{66}$	Л
12	1	3,0	$\frac{77,3}{6,0}$	1,43	$\frac{0,67}{187}$	$\frac{1,5}{90}$	Меэ
12	1	3,0	$\frac{50,0}{3,9}$	0,92	$\frac{0,07}{19}$	$\frac{3,0}{180}$	Меэ
12	1	3,5	$\frac{38,5}{3,0}$	0,66	$\frac{0,20}{55}$	$\frac{3,0}{180}$	Л
13	1	3,7	$\frac{63,5}{3,4}$	0,99	$\frac{1,05}{294}$	$\frac{0,3-0,5}{30}$	М
13	1	3,0	$\frac{46,7}{3,6}$	0,86	$\frac{0,44}{123}$	$\frac{0,5-1,0}{60}$	М
13	1	3,5	$\frac{56,0}{4,3}$	0,96	$\frac{0,29}{81}$	$\frac{1,5-2,0}{120}$	Меэ
15	0,33	4,0	$\frac{62,5}{4,8}$	0,99	$\frac{0,95}{265}$	$\frac{0,3-0,2}{1}$	Л
15	0,33	3,0	$\frac{50,0}{3,9}$	0,92	$\frac{0,46}{126}$	$\frac{3,0}{180}$	Л

1	2	3	4	5	6	7	8
15	0,33	3,5	$\frac{50,0}{3,9}$	0,85	$\frac{0,95}{265,1}$	$\frac{1,5}{90}$	М
17	0,33	5,0	$\frac{66,7}{5,2}$	0,96	$\frac{0,49}{56}$	$\frac{2,5}{150}$	Ме3
17	0,33	5,0	$\frac{66,7}{5,2}$	0,95	$\frac{0,49}{136}$	$\frac{1,0}{60}$	Л
17	0,33	5,0	$\frac{55,6}{4,3}$	0,79	$\frac{0,64}{178}$	$\frac{0,5}{30}$	М
17	0,33	5,0	$\frac{62,5}{4,8}$	0,89	$\frac{0,74}{206}$	$\frac{1,0}{60}$	М
17	0,33	6,0	$\frac{62,5}{4,8}$	0,81	$\frac{1,33}{372}$	$\frac{1,1}{66}$	М
18	1	5,5	$\frac{66,7}{5,17}$	0,90	$\frac{0,4}{111}$	$\frac{2,0}{120}$	Ме3
19	0,33	4,5	$\frac{62,5}{4,8}$	0,94	$\frac{0,36}{100}$	$\frac{1,5}{90}$	Ме3
22	1	5,5	$\frac{66,7}{5,2}$	0,90	$\frac{0,31}{87}$	$\frac{1,5}{90}$	Ме3
22	1	3,5	$\frac{62,5}{4,8}$	1,07	$\frac{0,08}{22}$	$\frac{3,0}{180}$	Ме3
23	0,33	5,0	$\frac{76,9}{5,9}$	1,1	$\frac{0,26}{72}$	$\frac{2,5}{150}$	Ме3
23	0,33	4,0	$\frac{76,9}{5,9}$	1,2	$\frac{0,05}{13}$	$\frac{4,0}{240}$	Ме3
23	0,33	3,5	$\frac{66,7}{5,2}$	1,14	$\frac{0,05}{13}$	$\frac{4,5}{270}$	Ме3
24'	$\frac{38,5 \text{ л/с}}{1074 \text{ м}^3/\text{с}}$	4,0	$\frac{55,6}{4,3}$	0,89	$\frac{0,084}{23}$	$\frac{2,0}{120}$	Л
24"	$\frac{44 \text{ л/с}}{1227 \text{ м}^3/\text{с}}$	5,0	$\frac{55,6}{4,3}$	0,79	$\frac{0,133}{37}$	$\frac{1,5}{90}$	Ме3
24	1	5,0	$\frac{58,8}{4,5}$	0,84	$\frac{0,13}{36}$	$\frac{2,0}{120}$	Л
27	1	4,5	$\frac{52,6}{4,1}$	0,79	$\frac{0,25}{69}$	$\frac{1,5}{90}$	М
28	1	5,0	$\frac{66,7}{5,2}$	0,95	$\frac{0,06}{16}$	$\frac{2,0}{120}$	Ме3
28	1	4,5	$\frac{62,5}{4,8}$	0,94	$\frac{0,61}{170}$	$\frac{1,5}{90}$	Л
35	0,33	3,0	$\frac{66,6}{5,2}$	1,2	$\frac{0,03}{9}$	$\frac{2,0}{120}$	Ме3
35	0,33	1,5	$\frac{75,0}{5,8}$	1,06	$\frac{0,07}{18}$	$\frac{2,0}{90}$	Ме3

1	2	3	4	5	6	7	8
35	0,33	4,5	$\frac{62,5}{4,8}$	0,94	$\frac{1,54}{401}$	$\frac{0,2}{12}$	Л
35	0,33	5,0	$\frac{66,6}{5,2}$	0,94	$\frac{1,54}{401}$	$\frac{0,2-0,3}{18}$	Л
35	0,33	4,5	$\frac{85,6}{6,6}$	1,24	$\frac{0,28}{80}$	$\frac{1,5}{90}$	Мез
35	0,33	4,5	$\frac{50,0}{3,9}$	0,74	$\frac{0,91}{241}$	$\frac{1,0}{60}$	Л
35	0,33	4,2	$\frac{62,5}{4,8}$	0,99	$\frac{1,0}{300}$	$\frac{1,0}{60}$	Л
35	0,33	4,5	$\frac{50,0}{3,9}$	0,74	$\frac{0,91}{241}$	$\frac{1,0}{60}$	М
35	0,33	4,0	$\frac{61,9}{4,8}$	0,94	$\frac{1,0}{300}$	$\frac{1,0}{60}$	М

Примечание: М — микроформы, Л — ленточные гряды, Мез — мезоформы.

Сравнение этих отметок с отметками в этих же точках в опытах первой серии экспериментов при тех же расходах воды показывает, что уровни воды в условиях наличия новой системы регуляционных сооружений на 0,9 м выше, чем при их отсутствии. Поля поверхностных скоростей потока и рельефа дна, полученные в опыте 15, показали, что поверхностные скорости выше ж/д моста достигают 7,3 м/с. Такие же большие значения поверхностных скоростей потока наблюдаются на всем участке русла выше автодорожного моста.

Из сравнения данных рис. 10.20 и 10.21 видно, что в рельефе русла после зарегулирования современной системой сооружений также произошли некоторые изменения. Осередок выше протоки, сохранив в целом место своего расположения относительно ж/д моста, сместился к левому берегу и, причленившись к нему, приобрел форму побочня. Пляж вдоль правого берега выше ж/д моста при современной системе регуляционных сооружений превратился в побочень (рис. 10.23), скорость перемещения которого составляла 56,6 м/ч. Достигнув положения, указанного на рис. 10.21 и изображенного на рис. 10.23, которое соответствовало заданным новым плановым границам русла (регуляционных сооружений), побочень прекратил свое продвижение вперед.

Движение наносов осуществлялось в форме ленточных гряд и микроформ поверх этого побочня и дальше, не меняло морфологического строения русла на этом участке. Плесовая яма у левого берега ниже автодорожного моста, наблюдавшаяся и в естественном состоянии русла (рис. 10.21), в новых условиях несущественно изменив свое местоположение, стала на 1,5 м глубже. Наини́зшая отметка этой ямы размыва составляет 53,5 м, что значительно ниже фундамента регуляционных сооружений на этом участке русла ниже автодорожного моста. Поэтому здесь требуется проведение мероприятий по сохранению устойчивости подпорной стенки.

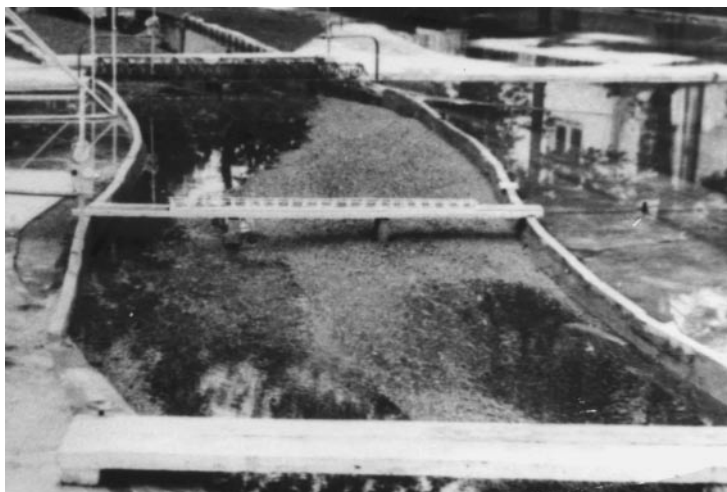


Рис. 10.23. Побочень в створе автодорожного моста

В подмостовом русле, в условиях новой системы регуляционных сооружений в левом пролете отметки дна составляют 62,0–61,0 м, а в правом — 59,0 м. Наивысшие отметки в зоне ямы размыва у промежуточной опоры моста — 59,2 м, что выше основания фундамента опоры ж/д моста. Как видим, отметки дна у правобережной опоры ж/д моста в условиях регулирования стенками (опыт 15) на 1 м выше по сравнению с условиями до зарегулирования. Это свидетельствует об относительном выравнивании отметок дна и глубин в подмостовом русле при современной системе регуляционных сооружений.

Гранулометрический состав донных отложений в опыте 15 представлен на рис. 10.24. Местоположения отбора проб отмечены на рис. 10.21.

Из рис. 10.24 видно, что в условиях регулирования русла на исследуемом участке наблюдается существенная сортировка и дифференциация гранулометрического состава наносов с сохранением той же общей закономерности, которая отмечалась в первой и во второй сериях опытов. Пробы 1, 4, 5, 8, 12, 14, взятые вдоль левого берега, имеют более крупный состав, чем пробы 6, 7, 10, 11, 15, взятые вдоль правого берега.

Ряд опытов третьей серии экспериментов был посвящен поиску средств, устраняющих образование ямы размыва ниже автодорожного моста, т.е. средств защиты от разрушения бетонной стенки на этом участке. С этой целью в двух опытах ниже автодорожного моста были установлены незатопляемые шпоры. Расстояние от моста до первой шпоры — 9,0 м, между первой и второй — 27 м, а между второй и третьей — 63 м. Длина шпор — соответственно 9, 21, 21 м.

При расходах воды 0,33 и 1 %-ной обеспеченности характер местных размывов у оголовков берегозащитных шпор указывает, что шпоры во время паводка будут разрушены.

С целью защиты шпор от разрушения на модели р. Утулик был испытан метод защиты их оголовков каменной отсыпкой. Ранее этот метод, как было

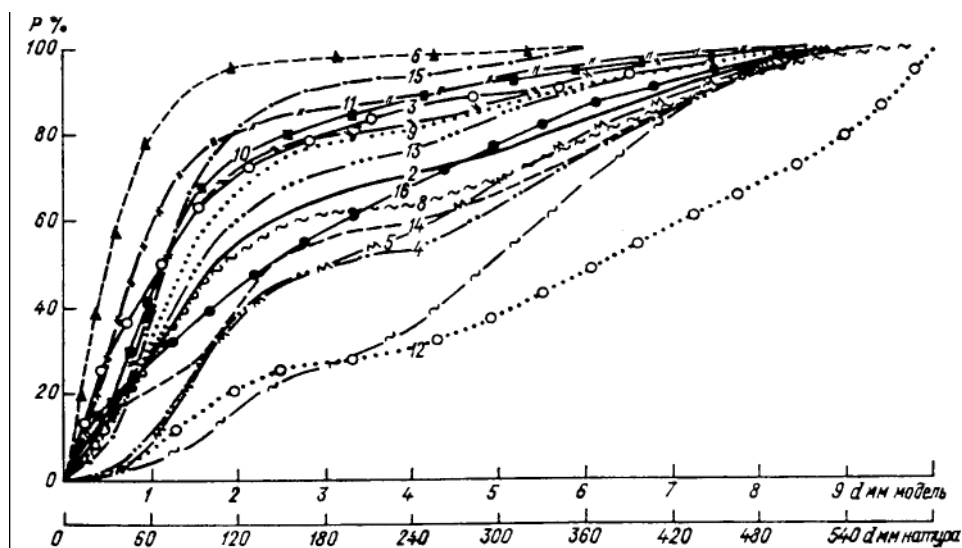


Рис. 10.24. Гранулометрический состав донных отложений в опыте 15

показано выше, был применен на модели р. Хара-Мурин и оказался эффективным. Контурсы отсыпки определялись в соответствии с характером размывов дна в районе шпор, полученных в опыте, а крупность камня также назначалась из условий их устойчивости при скоростной структуре потока, полученной в этом опыте. Опыты показали, что крупность камня диаметром 60–90 см в пересчете на натуру, в смеси, отсыпанной по указанному контуру, хорошо защищает оголовки шпор от размывов.

Для защиты оснований подпорных стен от размыва проектировщиками был предложен метод укладки вдоль этих стен бетонных плит или отсыпки крупного камня. Этот метод был испытан на модели р. Утулик. С этой целью вдоль дамбы ниже автодорожного моста, на участке длиной 240 м, при глубине 2,4 м была выполнена отсыпка гравием, соответствующая в натуре крупности камня 60–90 см, ширина полосы которой соответствовала 2,4 м. Такая же полоса длиной 100 м была выложена вдоль правобережной дамбы в районе ж/д моста. Испытанный метод также оказался эффективным средством, предотвратившим возникновение ямы местного размыва вдоль дамбы. Следует отметить, что этот результат, полученный для конкретных условий р. Утулик при заданных плавных очертаниях стенок русла в плане и малой кривизне, требует дополнительной проверки при попытке использования этого способа для других объектов.

С целью защиты от размыва левобережной дамбы ниже автодорожного моста на модели р. Утулик были испытаны и другие методы.

Так, в одном из опытов левобережной дамбе между ж/д мостами и автодорожным мостом было придано иное очертание с меньшей кривизной, из предположения, что причиной возникновения местной ямы размыва ниже автодорожного моста является заданная руслу в настоящее время кривизна в плане.





Рис. 10.25. Расчистка дна русла р. Утулик

Опыты показали, что при «исправленной» кривизне левобережной дамбы рельеф дна ниже автодорожного моста формируется без ямы местного размыва. Однако этот метод по стоимостным показателям не может конкурировать с отсыпкой камня вдоль стенки или строительством шпор.

В двух опытах на модели р. Утулик струеотводящая дамба ниже моста была укорочена вдвое, а затем снята целиком. При этом в створе мостового перехода отметки водной поверхности понизились соответственно лишь на 0,07 и 0,19 м.

В одном из опытов было испытано предложение проектировщиков по расчистке дна с целью понижения отметок водной поверхности в створе ж/д моста. На рис. 10.25 показана реализация проектной расчистки дна на модели перед опытом.

Сравнение отметок водной поверхности в соответствующих точках модели при расчистке и без расчистки показало, что в створе ж/д моста в первый момент времени уровни в условиях расчистки понизились на 1,26 м. Однако отметки дна в ходе опыта быстро восстанавливались. Причем, процесс восстановления происходил снизу вверх. В створе ж/д моста восстановление отметок водной поверхности на модели произошло за 30 мин (3,8 ч в натуре).

На модели р. Утулик был испытан еще один способ понижения отметок водной поверхности в створе ж/д моста с помощью устройства выемок ниже моста (рис. 10.26).

Выемки устраивались на расстоянии 100 м ниже ж/д мостов и отличались размерами и формой. У пяти испытанных типов выемок менялась длина в пределах 240–470 м, а глубина составляла 2–4 м. По краям в плане расстояние выемки от струенаправляющих дамб составляло 12,0 м. Как и следовало ожидать, наибольшее понижение отметок водной поверхности имело место при наибольших объемах выемок (табл. 10.10).



Рис. 10.26. Русловая выемка ниже железнодорожного моста

В табл. 10.10 представлены результаты расчета и проверки на модели времени заполнения выемок грунта ниже ж/д моста при разных типах выемок при расходах 1 и 0,33%-ной обеспеченности и величины понижения отметок водной поверхности в створе моста. Время заполнения выемок I, II и III типа оказалось соизмеримым с периодом паводка, и их устройство с целью понижения уровней воды в створе ж/д моста в течение всего паводочного периода неоправданно. Выемки IV и V типа могут быть использованы с этой целью. При этом, как по-

**Таблица 10.10. Расчет и проверка на модели времени заполнения выемок грунта ниже ж/д моста**

Тип выемки	Объем выемки		Твердый расход при $Q_{0,3\%}$		Твердый расход при $Q_{1\%}$		Время заполнения при $Q_{0,3\%}$		Время заполнения при $Q_{1\%}$		Понижение отметок водной Поверхности в створе моста, м
	модель, см <sup>3</sup>	натура, м <sup>3</sup>	модель, см <sup>3</sup> /с	натура, м <sup>3</sup> /с	модель, см <sup>3</sup> /с	натура, м <sup>3</sup> /с	модель, с	натура, ч	модель, с	натура, ч	
I	299406	64805	121,2	3,38	62,1	1,73	2470	5,3	4821	10,4	1,03
II	149703	32405	121,2	3,38	62,1	1,73	1236	2,7	2411	5,2	0,54
III	299406	64805	121,2	3,38	62,1	1,73	2470	5,3	4821	10,4	0,82
IV	418000	90296	121,2	3,38	62,1	1,73	3449	7,4	6731	14,5	0,97
V	598811	126610	121,2	3,38	62,1	1,73	4940	10,6	9643	20,8	1,38

казали наблюдения во время опытов, общий размыв дна в подмостовом сечении в начальный период заполнения выемок во время паводка составил лишь 1,0–1,5 м, что не является опасным для устоев и опор мостов.

Поверхностные скорости потока в районе выемки составляют 5–6 м/с, это дает основание полагать, что взвешенные наносы не будут участвовать в занесении выемки ниже моста. Они будут проноситься транзитом.

В результате выполненных лабораторных исследований были сформулированы следующие основные выводы:

— Русловой процесс р. Утулик на участке ж/д мостового перехода протяженностью 1,9 км, охваченном регулированием, осуществляется по схеме осередкового и побочного типов руслового процесса. Формирующиеся и перемещающиеся вниз по течению осередки и побочни в условиях регулирования русла существующей системой регуляционных сооружений приурочены к определенным участкам: осередок — побочень — к расширению русла выше автодорожного моста, правобережный побочень — к участку русла между автодорожным и ж/д мостами (рис. 10.21).

— Движение донных наносов на исследуемом участке русла р. Утулик начинается при расходах воды 650–800 м<sup>3</sup>/с. При этом в движение приходит мелкая часть смеси донных отложений крупностью до 12 см. При расходах воды 1000–1200 м<sup>3</sup>/с в движение вовлекается вся смесь наносов, слагающих донные отложения. По ширине зарегулированного русла наблюдается сортировка наносов. Крупность донных отложений в полосе русла вдоль левого берега значительно больше крупности донных отложений вдоль правого берега.

— Транспорт донных наносов в период формирования рельефа дна, соответствующего заданным в результате руслового регулирования плановым границам потока, выражается движением микроформ, ленточных гряд и мезоформ (осередков и побочней). Высота микроформ составляет 0,3–0,9 м. Скорость их перемещения в натуре меняется от 70 до 372 м/ч. Высота ленточных гряд составляет 0,6–1,8 м, скорость их перемещения 23–401 м/ч. Высота мезоформ составляет 0,9–2,7 м, а скорость их перемещения 14–187 м/ч. Времени стабилизации мезорельефа русла на модели в натуре соответствует 5 ч. После стабилизации мезорельефа транспорт донного материала происходит в форме перемещения микроформ и ленточных гряд поверх мезоформ. В период времени, предшествующий моменту стабилизации мезорельефа русла, отметки дна на участке будут меняться в пределах 0,9–2,7 м в соответствии с толщиной слоя движения донных наносов в теле мезоформ.

— В ходе экспериментов на деформируемой модели р. Утулик при существующей системе регуляционных сооружений ниже автодорожного моста выявлена опасная для левобережной дамбы зона развития местной ямы размыва, угрожающая дамбе при паводках 1 и 0,33 %-ной обеспеченности разрушением на участке протяженностью 120 м. Испытано несколько способов защиты этого участка дамбы от разрушения. Наиболее приемлемым из экономических соображений представляется метод защиты с помощью трех шпор и отсыпки крупного камня ( $d = 60–90$  см) по контуру размыва дна у оголовков шпор, установленному в результате опытов.

— Исследована пропускная способность подмостового русла при расходах воды 1 и 0,33 %-ной обеспеченности при каждом из вариантов систем регуляционных сооружений, соответственно относящихся к 1904–1945, 1945–1971 гг. и к современному состоянию (после 1971 г.). В соответствии с опытами, уровни воды при современной системе регуляционных сооружений в створе ж/д моста по сравнению с 1904–1945 гг. при одних и тех же расходах воды в среднем выше на 0,6 м. Однако при расходе воды 0,33 %-ной обеспеченности (2232 м<sup>3</sup>/с по Ленгипротрансу) отметка водной поверхности в створе ж/д моста на 1 м ниже отметки низа конструкции моста. Если учесть, что по расчетам, выполненным по той же методике, но по более длительному ряду наблюдений за расходами воды, вместо 2232 м<sup>3</sup>/с получаем 1880 м<sup>3</sup>/с, то отметка водной поверхности при расходе воды 0,33 %-ной обеспеченности в створе моста на 1,2 м ниже отметки низа конструкции.

— Рельеф дна в подмостовом русле при современной системе регуляционных сооружений более выровнен по ширине обоих пролетов моста по сравнению с прежними состояниями при других системах регуляционных сооружений.

— Глубина местных ям размыва у промежуточных опор моста не превышает 1,5–2,0 м. Отметки рельефа дна на участке подмостового русла: у промежуточных опор моста и береговых устоев во всех случаях (опытах) остаются на 4,0 м выше основания фундаментов опор и устоев моста.

— Испытаны способы понижения отметок водной поверхности в створе ж/д моста с помощью расчистки русла и устройства выемки грунта ниже моста. Оценена эффективность этих методов. Сравнение отметок водной поверхности в створе ж/д моста при проектной расчистке русла выше моста и в условиях без расчистки показало, что в створе ж/д моста уровень воды в первый момент времени понижается на 1,26 м, но быстро восстанавливается в течение 30 мин (3,8 ч в натуральных условиях).

— Выемка грунта ниже железнодорожного мостового перехода может понизить уровень воды в створе мостов в зависимости от объема выемки на 0,54–1,38 м. Время восстановления отметок дна русла, т. е. заполнения выемки, пропорционально объему выемки. Оно не зависит от формы продольного профиля выемки и для испытанных на модели расходов воды и объемов выемки составляет 2,7–20,8 ч натурой, т. е. время, соизмеримое с продолжительностью паводков редкой повторяемости на р. Утулик.

На основе изложенных выше выводов были разработаны следующие рекомендации:

- расходы воды 0,33 и 1 %-ной обеспеченности на железнодорожных мостовых переходах через р. Утулик при существующей системе регуляционных сооружений могут быть безопасно пропущены через существующие отверстия мостов без предусмотренного в проекте Ленгипротранса подъема железнодорожных мостов на 1,53 м. Соответственно, нет необходимости в повышении отметок подходов железнодорожной насыпи к мосту;
- наращивание на 1,0 м регуляционных сооружений на участке регулирования русла, предусмотренное в этом проекте, не требуется;
- необходимо выполнить работы по защите от размыва и обрушения левобережной подпорной стены ниже автомобильного моста.

### 10.3.3.3. Гидравлическая модель р. Аносовки

Небольшая горная река Аносовка длиной 28,7 км стекает с хребта Хамар-Дабан и впадает в оз. Байкал. В 750 м от ее устья реку пересекают два пути Восточно-Сибирской железной дороги. Мосты длиной 44,09 и 44,50 м (нижний) расположены на расстоянии 12,8 м друг от друга. До строительства мостового перехода река протекала несколькими рукавами, периодически блуждая по широкой долине. В ходе строительства мостового перехода были перекрыты большая часть долины и поймы, а также существующие к моменту строительства рукава русла р. Аносовки. Поток был искусственно, с помощью регулиционных сооружений — земляных дамб и расчистки главного русла, направлен в подмостовое отверстие шириной 42,7 м.

Однако во время высоких половодий 1927, 1931, 1932, 1934, 1938, 1940, 1942 гг. регулиционные сооружения подвергались существенным повреждениям и разрушениям (рис. 10.27), что постоянно требовало выполнения ремонтно-восстановительных работ, расчисток больших объемов грунта, реконструкции и строительства новых регулиционных сооружений. Наиболее существенные повреждения и разрушения регулиционных сооружений на железнодорожных мостовых переходах через р. Аносовку имели место во время паводков 1971 и 1978 гг.

В 1975 г. в 100 м выше железнодорожных мостов был построен автодорожный мост с капитальными регулиционными сооружениями, позднее предполагалось строительство новых регулиционных сооружений.

Целью комплексных научных исследований с использованием гидравлической деформируемой модели исследуемого участка р. Аносовки было: систе-

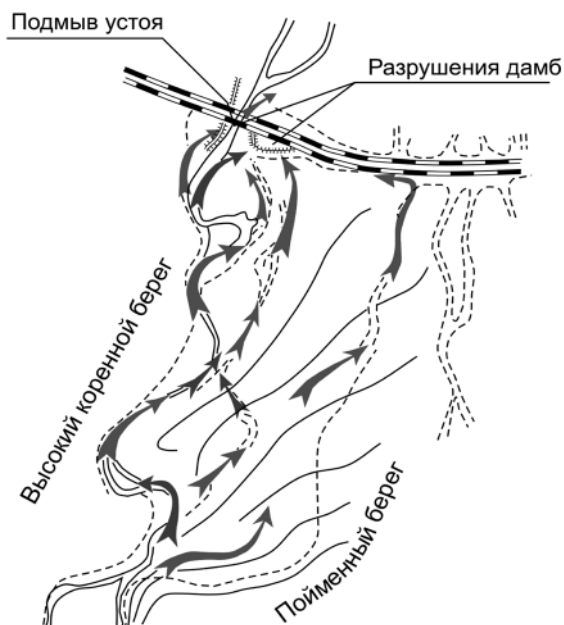


Рис. 10.27. Схема пойменных течений р. Аносовки во время паводков 1932 и 1938 гг.

материзировать существующие материалы, выполнить специальные натурные и лабораторные работы для изучения руслового и гидравлического режимов русла р. Аносовки в бытовых и проектных условиях, дать оценку надежности существующих и проектируемых регуляционных сооружений и разработать рекомендации по обоснованию и выбору экономически рациональных и надежных схем регулирования русла и конструкций регуляционных сооружений на участке мостовых переходов через р. Аносовку [145].

Площадь бассейна р. Аносовки составляет 100,4 км<sup>2</sup>, средняя высота водосбора — 1187 м абс., средний уклон русла — 0,047. В верхней и средней частях бассейна русло протекает в узкой горной долине и в плане повторяет ее очертания. В нижнем течении на участке длиной 6 км долина имеет корытообразное расширение. Русло в нижнем течении блуждает по долине, разветвляясь на рукава и прижимаясь то к одному, то к другому борту долины.

Бассейн реки покрыт хвойным лесом. На горных притоках р. Аносовки климатические, гидрологические и геоморфологические условия способствуют формированию селевых потоков. Систематических гидрологических наблюдений на р. Аносовке не ведется.

В табл. 10.11 представлены расчетные максимальные гидрологические характеристики паводочного стока р. Аносовки в створе железнодорожного мостового перехода, максимальные расходы воды различной обеспеченности и соответствующие им уровни воды по данным расчетов Института географии Сибирского отделения АН СССР, Ленгипротранса и Мостранспроекта, выполненные в различное время [145].

**Таблица 10.11. Расчетные максимальные гидрологические характеристики паводочного стока воды р. Аносовки в створе железнодорожного мостового перехода**

Источник информации	Максимальный расход воды, м <sup>3</sup> /с заданной обеспеченности, Р, %				
	10	2	1	0,33	селевой
Институт географии СО АН СССР, 1980 г.	119	188	216	270	324
Ленгипротранс, 1974 г.	-	-	296	370	445
Мостранспроект (экспедиция №12), 1940 г.				237	
	Отметка уровня воды в створе моста, м заданной обеспеченности, Р, %				
	10	2	1	0,33	селевой
Институт географии СО АН СССР, 1980 г.	462,70	463,05	463,20	463,35	463,75
Ленгипротранс, 1974 г.	-	-	462,18	-	461,76
Мостранспроект (экспедиция №12), 1940 г.			462,48		

**Таблица 10.12. Наблюденные в различные годы максимальные отметки уровней воды в створе железнодорожного мостового перехода через р. Аносовку**

Источник информации	Год	Отметка наблюдаемого максимального уровня в створе перехода, м	Отметка низа конструкции, м
Мостранспроект (экспедиция № 12)	1914	462,08	464,98
Служба пути ВСЖД	1927	462,15	
Служба пути ВСЖД	1938	462,24	

В табл. 10.12 представлены максимальные отметки уровней воды в створе железнодорожного мостового перехода через р. Аносовку, наблюдаемые в годы с высокими половодьями за период его эксплуатации.

В 1978 г. в 14 км выше устья р. Аносовки сформировалось запрудное озеро в результате перекрытия русла грязекаменным конусом выноса наносов левого ее притока. Вероятность образования и прорыва подобных запрудных озер в русле р. Аносовки оценивается обеспеченностью в 1 %, а величина расхода воды при прорыве селевой запруды может достигать 662 м<sup>3</sup>/с с отметкой максимального уровня воды в створе моста 465,75 м.

В составе лабораторных исследований была выполнена оценка достоверности величин, представленных в табл. 10.11, и дано обоснование расчетных гидрологических характеристик паводочного стока воды р. Аносовки на участке расположения мостовых переходов.

Целью натурных работ, выполненных на р. Аносовке, было получение данных, необходимых для выполнения анализа русловых деформаций этой реки и лабораторных исследований на деформируемой гидравлической модели (строительства и тарировки модели); русловой съемки исследуемого участка р. Аносовки; измерение расходов воды; получение данных о скоростной структуре потока и уклонах водной поверхности; отбор проб донных отложений.

В ходе натурных исследований на р. Аносовке на исследуемом участке протяженностью 2320 м, в различных ее частях на характерных и морфологических фрагментах русла фотографическим методом было взято 202 пробы поверхностного слоя донных отложений с целью подбора состава донных наносов на модели (крупности отложений и подаваемых на модель наносов).

Средний размер средневзвешенных диаметров 202 проб в натуре составил 11,25 см. На участках русловой отмостки после фотографирования поверхностного слоя определялась также крупность наносов подповерхностного слоя, которая оказалась равной — 5,82 см.

На неискаженной деформируемой модели р. Аносовки, построенной в масштабе 1:50, было выполнено 22 опыта. Численные значения масштабных множителей на модели р. Аносовка были представлены в табл. 10.6. В ходе экспериментов на деформируемой гидравлической модели изучались кинематическая

структура потока, характеристики транспорта наносов и изменения морфологии русла в бытовых и проектных условиях, а также пропускная способность подмостового сечения и влияние расчистки русла на характеристики руслового процесса и структуру потока, характер взаимодействия русла с существующими и проектируемыми регуляционными сооружениями.

Опыты выполнялись при расходах воды 1 %-ной и 0,33 %-ной обеспеченности, а также при других расходах, необходимых для построения кривой  $H=f(Q)$ .

В соответствии с русловой съемкой 1985 г. на модели были воспроизведены продольный и поперечный уклоны (общие и местные) и современное положение русла в плане с регуляционными сооружениями.

На модели в различных ее точках было установлено 15 тастеров, с помощью которых производилось измерение уровней воды и уклонов водной поверхности в различных опытах. В опытах также выполнялась съемка поля поверхностных скоростей потока с помощью фотографирования светящихся поплавков, а после опытов — топографическая съемка рельефа дна. Кроме того, измерялись геометрические и динамические характеристики микро- и мезоформ руслового рельефа (с помощью масштабных скоб), распределение на модели гранулометрического состава донных наносов и донных отложений (ситовым методом) и расхода донных наносов объемным методом. В опытах испытывались различные варианты проектных решений и инженерных мероприятий регулирования русла. Продолжительность опытов составляла от 0,5 до 2,5 ч (3,5–17,7 часов натуре).

Тарировка размываемой модели р. Аносовки выполнялась на основе данных гидрометрических измерений, выполненных полевой группой летом 1985 г., а также данных анализа гранулометрического состава 202 проб, отобранных во время полевых работ в русле р. Аносовки. Гранулометрический состав наносов, подаваемых на модель, подбирался в линейном масштабе 1:50, принятом на модели.

Гранулометрический состав грунта на модели (исходный состав материала, уложенного на модели и подаваемого в начале модели) был подобран следующим образом. Средневзвешенный диаметр опытного материала составлял 1,87 мм (9,37 см в натуре) — величину, близкую к средней арифметической между средневзвешенными диаметрами поверхностного и подповерхностного слоев донных отложений в натуре (соответственно 11,25 см и 5,82 см). Максимальный диаметр опытного грунта составлял 5,5 мм (27,3 см в натуре), поскольку в натуре осредненное значение крупных фракций в пробах  $d_{95}$  составляло 27,0 мм. Значения коэффициента неоднородности  $d_{95}/d_5$  в натуре и на модели соответственно составляли 18,4 и 22,7.

В тарировочной серии опытов для створа железнодорожного моста была определена кривая  $H=f(Q)$  (рис. 10.28), на которой наряду с точками, полученными на модели, нанесены натурные точки, полученные в натуре полевой группой в диапазоне расходов воды 18–54 м<sup>3</sup>/с. Кривая  $H=f(Q)$ , полученная экспериментально, позволяет восстановить расходы по максимальным уровням, зафиксированным в створе железнодорожного мостового перехода во время паводков 1914, 1927, 1938 и 1971 гг. (рис. 10.28). Кроме того, из этого рисунка видно, что кривая, полученная по данным расчетов Института географии СО АН СССР, завышает



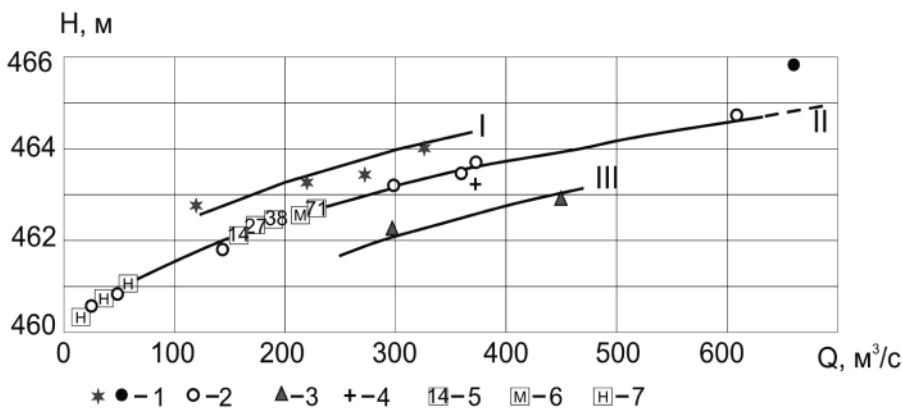


Рис. 10.28. Кривые  $Q=f(H)$ : I, 1 – расчетные данные института географии СО АН СССР; II, 2 – данные модели; III, 3 – расчетные данные Ленгипротранса; 4 – понижение уровня при расчистке дна; 5 – наблюдаемые уровни воды в 1914, 1927, 1938 гг.; 6 – расчетный расход Мостранспроекта; 7 – натурные данные

значения уровней и соответственно занижает значения расходов воды, а кривая, полученная по расчетам Ленгипротранса, наоборот, занижает уровни и завышает значения расходов воды в створе железнодорожного мостового перехода.

Расчетный расход воды, определенный Мостранспроектом (точка 6 на рис. 10.28), оказался на экспериментальной кривой  $H=f(Q)$ .

Согласно полученной экспериментальной кривой может быть скорректировано значение уровня воды, рассчитанного Институтом географии СО АН СССР для расхода воды  $662 \text{ м}^3/\text{с}$  при предположении прорыва селевой запруды в горной части бассейна. Максимальный уровень воды для этого расхода воды в створе железнодорожного моста, согласно экспериментальной кривой, будет на  $1,0 \text{ м}$  ниже, а именно, не  $465,75$ , а  $464,75 \text{ м}$ .

Наблюдения за характером транспорта донных наносов велись визуально и с помощью мерных скоб (при структурном транспорте донных наносов) как во время тарировочных опытов, так и в ходе других экспериментов.

В некоторых опытах на отдельных фрагментах русла наблюдалась структурная форма транспорта наносов.

В табл. 10.13 представлены характеристики потока и структурных форм перемещения донных наносов в опытах 9, 12, 13.

В результате выполненных исследований было установлено следующее.

Русловой процесс на исследуемом участке р. Аносовки развивается по схеме блуждания русла по долине (долинное блуждание) — при выдающихся, редких паводках; блуждания по пойме (пойменное блуждание) — при высоких паводках; и внутрируслового блуждания — периодического свала потока в пределах паводочного русла — при средних из максимальных, многолетних расходах воды. За период эксплуатации мостовых переходов через р. Аносовку именно блуждание русла по долине и пойме было причиной отмирания и оживления старых проток, возникновения новых пойменных проток и внутрируслового перераспределения

Таблица 10.13. Характеристики потока и структурных форм перемещения донных наносов по данным экспериментов на модели р. Аносовки

№ опыта	Обеспеченность расхода воды, %	Глубина потока на модели, см в натуре, м	Средняя скорость потока на вертикали: на модели, см/с в натуре, м/с	Число Фруда $Fr = \frac{v}{\sqrt{gh}}$	Скорость перемещения гряд: на модели, см/с в натуре, м/ч	Высота гряд, см: на модели в натуре
Микроформы						
9	0,33	$\frac{3,5}{1,7}$	$\frac{42}{29,4}$	0,61	$\frac{0,23}{57,96}$	$\frac{1,0}{50}$
12	0,33	$\frac{2,0}{1,0}$	$\frac{42}{29,4}$	0,93	$\frac{0,73}{156}$	$\frac{1,5 \div 2,0}{75 \div 100}$
12	0,33	$\frac{2,0}{1,0}$	$\frac{50}{3,54}$	1,09	$\frac{0,46}{114,22}$	$\frac{1,5 \div 2,0}{75 \div 100}$
12	0,33	$\frac{1 \div 1,5}{0,5 \div 0,7}$	$\frac{39}{2,74}$	1,01	$\frac{0,42}{110}$	$\frac{1,5 \div 2,0}{75 \div 100}$
13	0,33	$\frac{4,5}{2,2}$	$\frac{36,4}{2,56}$	0,54	$\frac{0,3}{75,5}$	$\frac{1,5}{75}$
13	0,33	$\frac{2,0}{1,0}$	$\frac{40,0}{2,83}$	0,91	$\frac{0,4}{101,8}$	$\frac{1,0}{50}$
Ленточные гряды						
9	0,33	$\frac{3,0}{1,5}$	$\frac{50}{3,5}$	0,91	$\frac{0,3}{75,6}$	$\frac{3,0}{150}$
9	0,33	$\frac{4,5}{2,2}$	$\frac{48}{3,39}$	0,7	$\frac{0,33}{82,6}$	$\frac{2,0}{100}$
Мезоформы						
12	0,33	$\frac{1,0}{0,5}$	$\frac{48}{3,29}$	1,5	$\frac{0,04}{10,8}$	$\frac{4,5}{225}$
12	0,33	$\frac{1,5}{0,7}$	$\frac{50}{3,5}$	1,2	$\frac{0,028}{7,2}$	$\frac{6,0}{300}$
12	0,33	$\frac{1,0}{0,5}$	$\frac{48}{3,29}$	1,5	$\frac{0,04}{10,18}$	$\frac{4,0 \div 5,0}{200}$
12	0,33	$\frac{1 \div 1,5}{0,5 \div 0,7}$	$\frac{39}{2,74}$	1,01	$\frac{0,42}{11,0}$	$\frac{1,6 \div 2,0}{75 \div 100}$

расходов воды по ширине основного русла. Земляные дамбы, будучи мощными сооружениями, до 1942 г. не справлялись со своим назначением.

Максимальные поверхностные скорости потока в русле р. Аносовки при расходе воды 0,33 %-ной обеспеченности в створах мостовых переходов в бытовых условиях составляют 4,2 м/с, а на всем исследуемом участке русла — 4,7 м/с.

При стеснении русла регуляционными сооружениями между железнодорожным и автодорожным мостами и проектной расчистке русла значение этой скорости в створах мостов возрастает до 4,6 м/с.

По данным экспериментов на деформируемой модели начало транспорта донных наносов в русле р. Аносовки следует ожидать уже при расходе воды

49,5 м<sup>3</sup>/с. При этом расходе воды на некоторых участках русла (в подмостовом русле и на участке между 445–965 м выше мостовых переходов) будет двигаться мелкая часть смеси донных отложений (менее 5 см в пересчете на натуру), слагающих русло р. Аносовки. При расходе воды 141,4 м<sup>3</sup>/с следует ожидать повсеместного движения мелких и средних фракций донных отложений (10–12 см и менее), а при расходах воды 300–370 м<sup>3</sup>/с — интенсивный транспорт всех фракций наносов, слагающих дно.

Движение наносов в период паводков на р. Аносовке происходит преимущественно в бесструктурной форме без их скопления в грядовые образования. Однако на отдельных фрагментах русла может наблюдаться движение гряд — микроформ, ленточных гряд и мезоформ. Их размеры (высота) могут достигать соответственно 1, 1,5, и 3,0 м, а скорость перемещения соответственно 156, 83, 11 м/ч. Общий расход донных наносов при расходах воды 1 %-ной и 0,33 %-ной обеспеченности по данным экспериментов в пересчете на натуру соответственно составляет 1260 и 2520 м<sup>3</sup>/ч.

Для створа железнодорожного мостового перехода в соответствии с кривой  $H=f(Q)$ , полученной экспериментальным путем, выполнена оценка достоверности результатов расчетов Ленгипротранса, Института географии СО АН СССР и Мостранспроекта. Восстановлены величины расходов воды по данным наблюдений уровней воды во время половодий 1914, 1927, 1938 и 1971 гг. Установлено, что во всех случаях (при всех расходах воды), меньших, чем расход воды, соответствующий случаю прорыва запрудного селевого озера в горах, отметки низа конструкции железнодорожных мостов остаются более чем на 1,38 м выше уровня воды в створе мостов. Предусмотренное проектом строительство левобережной регулирующей стенки между железнодорожным и автодорожным мостами при расходе воды 0,33 %-ной обеспеченности, вызывает понижение минимальных отметок дна в подмостовом русле на 0,5 м.

Проектная расчистка дна русла, как при наличии, так и при отсутствии левобережной регулирующей стенки между мостами, приводит к временному понижению уровня воды в створах мостовых переходов. Дно в полосе расчистки восстанавливается в течение 17,7 ч активного транспорта донных наносов в натуру при расходе воды 0,33 %-ной обеспеченности (рис. 10.29).

Испытанный на модели способ регулирования блуждающего русла при помощи перекрытия второстепенных проток под небольшим углом к потоку насыпной дамбой из местного материала с крупностью частиц на напорном откосе 0,5–0,7 м представляется эффективным для случая р. Аносовки.

На основе экспериментов были сформулированы следующие рекомендации по обеспечению надежности функционирования мостовых переходов:

- строительство левобережной стенки между железнодорожным и автодорожным мостами представляется целесообразным (рис. 10.29);
- проектная расчистка дна русла р. Аносовки в районе мостовых переходов малоэффективна;
- представляется целесообразным перекрыть продольной насыпной дамбой оба правобережных ответвления от главного русла на участке мостовых переходов.

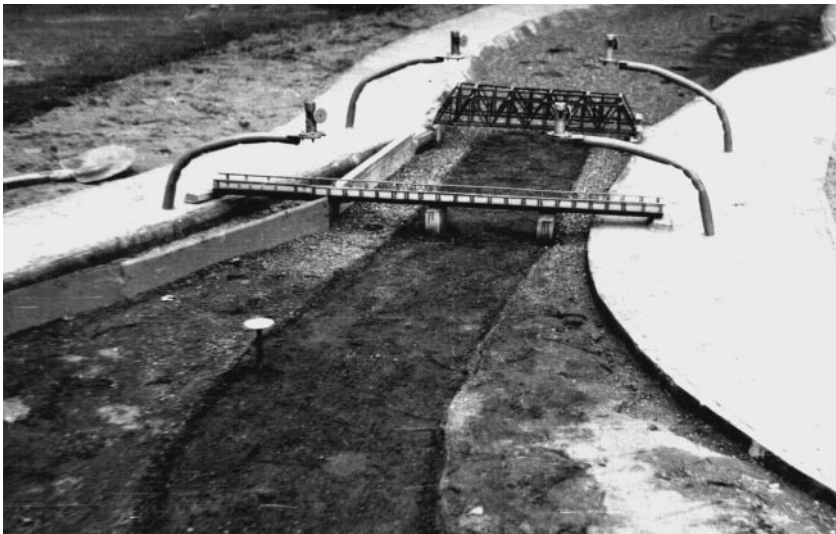


Рис. 10.29. Проектная расчистка дна при наличии левобережной регуляционной стенки между а/д и ж/д мостами (вид по течению)

При выполнении перечисленных мероприятий будет обеспечена как пропускная способность подмостового русла, так и безопасность существующей системы регуляционных сооружений на участке мостовых переходов через р. Аносовку. Отметка низа конструкции железнодорожных мостов при всех расходах воды на 1,38 м остается выше уровня воды.

Что касается пропуска через мостовое отверстие расчетного расхода воды  $662 \text{ м}^3/\text{с}$ , который возможен в случае прорыва селевой запруды в горах, следует иметь в виду гипотетический характер этого предположения. Формирование такого расхода и сохранение высоты волны без ее распластывания на пути следования к мосту, в связи с ограниченным объемом воды в запрудном озере и большим расстоянием (14 км) от этого озера до створа мостового перехода, представляется, с нашей точки зрения, практически невероятным. Точка кривой II на рис. 10.28, соответствующая этому расчетному селевому расходу, была получена для условия установившегося режима течения воды. Следовательно предположить, и дополнительные опыты на модели подтвердили, что тот же расход воды, пропущенный в режиме попусков, в створе мостового перехода дает уровни воды на 0,5–0,8 м ниже (в зависимости от режима попусков), чем при установившемся режиме течения.

#### **10.3.4. Гидравлическое моделирование руслового процесса и транспорта наносов р. Лабы в связи с добычей аллювия для строительных целей**

Начиная с 50-х годов XX столетия недостаточно обоснованная с научной точки зрения, технически и экологически непродуманная добыча для строительных нужд речного аллювия из русел и пойм рек в массовых объемах, в том числе

горно-предгорных, во многих странах приобрела угрожающий для окружающей среды характер и масштабы. В большинстве случаев, как показала практика, экономический и экологический ущербы многократно превышают стоимость извлекаемого грунта [291, 444].

Добыча аллювия из русла и поймы реки существенно влияет на ее гидравлический и русловой режимы. Разработка речных карьеров приводит к понижению уровней воды в реке, увеличению уклонов и активизации транспорта наносов выше карьера, нарушению баланса наносов на участке добычи аллювия и их дефициту ниже карьера, размыву дна выше и ниже выемки. Чрезмерная, безвозвратная добыча грунта из русла реки вызывает развитие необратимых деформаций (однонаправленный размыв), в результате чего может произойти трансформация русла и даже смена типа руслового процесса и, как следствие, нарушение устойчивости инженерных сооружений на большом участке реки, ухудшение состояния окружающей среды и экологических условий. Понижение уровней воды в реке в результате появления карьера приводит к понижению уровней грунтовых вод и деградации растительности на пойме и прилегающих к ней территориях, активизируются оползневые процессы, сокращаются нерестилища рыб и т. д.

Основная задача, без решения которой невозможно принять научно обоснованного, экономически и технологически приемлемого и экологически ответственного решения о целесообразности организации карьерных разработок на реке, состоит в определении достоверного объема стока наносов, особенно руслоформирующих фракций. Объем твердого стока реки определяет допустимые объемы изъятия речного аллювия из русла и способность реки восстанавливать естественный режим русловых деформаций и стока наносов. Надежная количественная оценка стока донных наносов на реках горно-предгорной зоны в настоящее время невозможна, ориентируясь лишь на существующий уровень знаний в этой области, без выполнения специальных комплексных исследований на конкретной реке, на которой запланирована или уже ведется добыча речного аллювия.

Одной из таких рек является р. Лаба, главный приток р. Кубань. В 1989 г. на этой реке, в 150 км от ее истока, в п. Мостовской был построен дробильно-сортировочный завод с целью добычи и переработки песчано-гравийной смеси из этой реки. Ежегодная потребность завода в сырье составляла 750 тыс. м<sup>3</sup> (рис. 10.30).

Целью научно-исследовательских работ, выполненных в ГГИ по заказу этого завода в 1991–1993 гг., было изучение руслового и гидравлического режимов и стока наносов р. Лабы у п. Мостовской на участке добычи гравийно-галечной смеси в естественных и проектных условиях, оценка последствий карьерных разработок и противопаводкового эффекта этого мероприятия (рис. 10.31), разработка рекомендаций для принятия решений о целесообразности продолжения и технологии добычи песчано-гравийного материала из русла. В ходе реализации отмеченной научно-исследовательской работы был выполнен комплекс теоретических, натурных и лабораторных исследований. Было осуществлено несколько выездов в поле и выполнены лабораторные

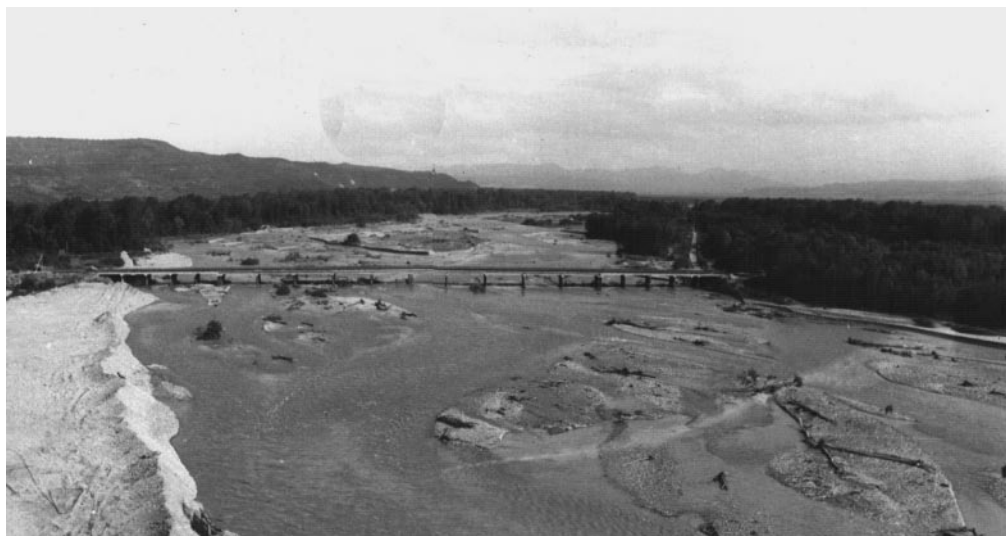


Рис. 10.30. Общий вид исследуемого участка русла р. Лабы в районе п. Мостовской при расходе воды  $217 \text{ м}^3/\text{с}$ . Течение сверху вниз



Рис. 10.31. Добыча аллювия из русла р. Лабы в районе п. Мостовской

исследования на неискаженной, гидравлической, деформируемой модели и в 100-метровом гидравлическом лотке [291, 444].

Следует отметить, что при выполнении работ по р. Лабѣ, в отличие от приведенных выше трех примеров исследований руслового процесса предгорных рек на участках мостовых переходов, удалось достаточно подробно изучить вопрос о характеристиках стока донных наносов на этой реке в натуральных условиях.

По типу водного питания р. Лаба относится к Алтайскому типу, который отличается регулярно повторяющимся, длительным, растянутым во времени высоким половодьем, на фоне которого наблюдаются серии подъемов уровня воды, вызванные интенсивными дождями и снеготаянием.

В отличие от горных притоков оз. Байкал и вообще горных рек, на которых активный транспорт донных наносов наблюдается редко, в короткие периоды дождевых паводков и не каждый год, на р. Лабе, в силу отмеченной специфики, каждый год в течение длительного времени, и особенно во время дождевых паводков, наблюдается активный транспорт в реке руслообразующего материала. Отмеченное позволило параллельными исследованиями в натуральных и лабораторных условиях детально изучить характеристики стока донных наносов на р. Лабе в естественных и проектных условиях и использовать полученные результаты как для разработки рекомендаций по этой реке, так и для усовершенствования метода гидравлического моделирования стока донных наносов и некоторых обобщений по рекам горно-предгорной зоны, сходным с р. Лабой по величине и факторам, определяющим гидрологический, русловой и гидравлический режимы, стоку наносов, а также по типу руслового процесса.

#### 10.3.4.1. Общие сведения о реке

Река Лаба — является левым, самым крупным притоком р. Кубани. Она образуется от слияния рек Большой и Малой Лабы, берущих начало с ледников Большого Кавказского хребта.

Длина Лабы — 351 км, площадь водосбора 12500 км<sup>2</sup>. Средняя высота водосбора — 700 м. Уклон реки изменяется от 0,0067 в верховьях до 0,0005 на устьевом участке. На исследуемом участке у п. Мостовской, в 150 км от истока, уклон дна русла составляет 0,0045.

На Лабе отчетливо выделяются два участка с разными типами руслового процесса. На участке реки от истока до п. Егерухай (116 км от устья) русло многоорукавное, галечное. Ниже п. Егерухай, до устья река развивается по типу незавершенного и свободного меандрирования.

В гидрологическом отношении бассейн Лабы считается достаточно хорошо изученным. Регулярные наблюдения за стоком воды у станции Каладжинской, расположенной в 10 км выше исследуемого участка (3 км ниже выхода реки из гор) ведутся с 1928 г., а за стоком взвешенных наносов — с 1931 г. Этот участок реки между ст. Каладжинской и п. Мостовской бесприточный.

Питание Лабы смешанное, поверхностный сток формируется за счет талых снеговых, дождевых и грунтовых вод, а также ледникового питания.

Режим уровней и расходов воды характеризуется растянутым весенне-летним половодьем, паводками в течение всего года и низкими уровнями в зимние месяцы.

Средняя высота подъема уровня воды над минимальным зимним составляет 139 см, наибольшая — 292 см (1958 г.), наименьшая — 95 см (1973 г.).

Средний многолетний максимальный расход воды составляет 437 м<sup>3</sup>/с. Наибольшие максимальные расходы воды наблюдались в 1939, 1941 и 1944 гг.,

составляя соответственно 730, 901 и 866 м<sup>3</sup>/с. На половодье приходится от 56 % до 86 % годового стока воды. В течение всего года, но особенно часто летом и осенью на реке проходят дождевые паводки, высота которых в отдельные годы превышает максимальные уровни половодья (1941, 1972 гг.). Наиболее высокий паводок наблюдался 7–8 ноября 1941 г. Корреляционный и спектральный анализ рядов стока позволил выявить закономерности чередования на Лабе маловодных и многоводных лет с периодом 17–20 лет.

Максимальные расходы воды различной обеспеченности и параметры эмпирической кривой распределения ежегодных вероятностей превышения максимальных расходов воды, независимо от их происхождения, рассчитанные в соответствии с действующим СНиП, приведены в табл. 10.14.

**Таблица 10.14. Максимальные расходы воды различной обеспеченности**

Тип кривой	Вероятность, %				
	1	5	10	20	50
Пирсон III	862	693	614	532	410
Крицкий-Менкель, $c_c/c_s=4,5$	866	684	609	530	413

По данным наблюдений, средний годовой расход взвешенных наносов изменяется от 4,9 до 56 кг/с. Годовой сток взвешенных наносов составляет от 150 до 1800 тыс. т (в среднем 630 тыс. т). Крупность взвешенных наносов составляет 0,5–0,005 мм. Максимальная крупность взвешенных наносов — 1–2 мм.

#### 10.3.4.2. **Натурные исследования**

Натурные исследования на р. Лабе у п. Мостовской проводились в 1992 и 1993 гг. Было осуществлено четыре выезда в поле: в зимнюю межень (январь 1992 г.), во время весенне-летнего половодья (май–июнь 1992 и 1993 гг.) и в период прохождения дождевых паводков (октябрь–ноябрь 1992 г.). Кроме того, по программе ГГИ Заказчиком был разработан экспериментальный карьер и выполнена инструментальная съемка карьера вслед за прохождением паводка в апреле 1993 г.

Во время полевых работ на участке русла протяженностью 5 км выполнялась русловая съемка, отбор проб донных отложений и проб воды на мутность. Изменялись уровни воды, уклоны водной поверхности, поле скоростей потока поверхностными поплавками, выполнялись также промеры глубин в карьере (эхолотированием с лодки и наметкой), измерялись расходы воды и взвешенных наносов.

Для оценки гранулометрического состава донных отложений производилось фотографирование дна на различных участках русла. Анализ фотографий показал, что дно русла сложено галькой средней крупностью 50–60 мм. Под слоем отмостки русло сложено галькой (75–80 %) и песком (20–25 %).

Для анализа крупности руслового аллювия на исследуемом участке использовались также результаты ситового анализа грунта, извлекаемого из русла Мостовским дробильно-сортировочным заводом, полученные Лабораторией наносов завода в течение 1991–1993 гг. (131 проба).



По данным измерений взвешенных наносов на водомерном посту в станции Каладжинская и во время полевых работ у п. Мостовской (430 измерений) была получена эмпирическая зависимость расхода взвешенных наносов от расхода воды в виде:

$$Q_T = 3,7 \cdot 10^{-8} \cdot Q^{2,7}. \quad (10.30)$$

Коэффициент парной корреляции для линеаризованной связи составляет 0,86.

Объем стока донных наносов за различные периоды времени оценивался по фактическим данным о заносимости карьера разрабатываемого в русле р. Лабы. Объем донных наносов в карьере измерялся и оценивался для шести временных интервалов, охватывающих различные фазы водного режима (табл. 10.15).

Таблица 10.15. Сравнение измеренного и расчетного стока донных наносов

№	Период	$Q_{\min}$ , м <sup>3</sup> /с	$Q_{\max}$ , м <sup>3</sup> /с	Сток донных наносов, тыс. м <sup>3</sup>	
				измеренный	расчетный
I	– 14.07.91	37,8	448	130–170	142
II	24.01 – 07.06.92	96,0	274	70–30	76
III	01.04 – 07.06.92	120,0	274	60–70	63
IV	08.06 – 19.06.92	224,0	270	20,5	21
V	20.06. – 07.11.92	59,8	493	130–140	142
VI	15.04 – 24.04.93	138,0	574	45	44

По данным натурных измерений было подобрано уравнение связи расхода донных наносов с расходом воды:

$$Q_D = 2,3 \cdot 10^{-9} \cdot Q^{2,9}. \quad (10.31)$$

Эта зависимость (рис. 10.32) при расчете по реальному гидрографу за соответствующие периоды времени дает суммарный сток донных наносов, наиболее близкий к измеренному.

По результатам расчетов стока донных и взвешенных наносов по уравнениям (10.30) и (10.31) за разные по водности годы наблюдений за стоком воды и взвешенных наносов отношение стока донных наносов к суммарному стоку на исследуемом участке р. Лабы в различные годы составляет 12–37 %.

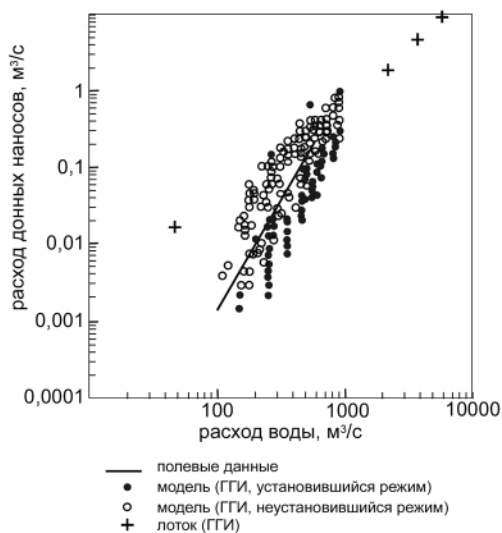


Рис. 10.32. Зависимость расхода донных наносов (в рыхлом теле) от расхода воды

### 10.3.4.3. Гидравлическая модель р. Лабы

Неискаженная деформируемая модель исследуемого участка Лабы была выполнена в масштабе 1:50 на открытой русловой площадке Главной экспериментальной базы ГГИ. Длина модели 84 м (рис. 10.33).

Целью модельных исследований было изучение гидравлических характеристик потока, режима русловых деформаций и транспорта донных наносов в естественных (бытовых) условиях и при наличии в русле проектного карьера длиной 1800 м, шириной 250 м и глубиной 4 м (рис. 10.34).

Модель была рассчитана в соответствии с методикой, приведенной выше и использованной при моделировании предгорных участков рек на мостовых переходах. Результаты этих расчетов приведены в табл. 10.16.

Деформируемая модель Лабы была построена с жесткими берегами по русской съемке 1992 г. На модели было выполнено 54 эксперимента общей продолжительностью 1172 часа. Количество измерений стока наносов с модели составило 608.

Гранулометрический состав донных отложений на модели был подобран соответствующим натурному, в принятом масштабе 1:50.

Тарировка модели производилась по уклону водной поверхности, скоростям течения, расходу наносов и характеру морфологического строения русла и руслового процесса, используя данные натурных исследований. Для установления связи расхода донных наносов с расходом воды в естественных условиях и соответствия этой связи зависимости (10.31), установленной по натурным измерениям, в начале модели в диапазоне расходов воды, соответствующем натурному (200–901 м<sup>3</sup>/с), подавались наносы в количестве, необходимом для поддержания отметок дна на входном участке неизменными. Динамическое равновесие счита-



Рис. 10.33. Гидравлическая модель р. Лабы

лось достигнутым при равенстве подаваемого на модель и выносимого с модели объемов наносов.

Скорости потока на модели измерялись поверхностными поплавками, уклон водной поверхности определялся по мерным иглам, установленным вдоль модели, и нивелированием. Сток наносов оценивался объемным способом по отложениям наносов в нижнем отстойнике модели, гранулометрический состав наносов определялся ситовым методом, рельеф дна строился по данным нивелировок.

Во время экспериментов фиксировались формы транспорта наносов и скорость их движения.

Как отмечалось, одной из основных задач модельных экспериментов на деформируемой модели исследуемого участка Лабы было получение количественной связи расхода влекомых наносов с расходом воды в

естественных (бытовых) условиях в соответствии с натурными исследованиями при идентичной натуре морфологии русла и режиме руслового процесса. Опыты на модели были выполнены в диапазоне расходов воды, соответствующем в натуре от 30–50 м<sup>3</sup>/с (начало движения самых мелких фракций донных отложений) до 900 м<sup>3</sup>/с (соответствующем историческому максимуму на этой реке).

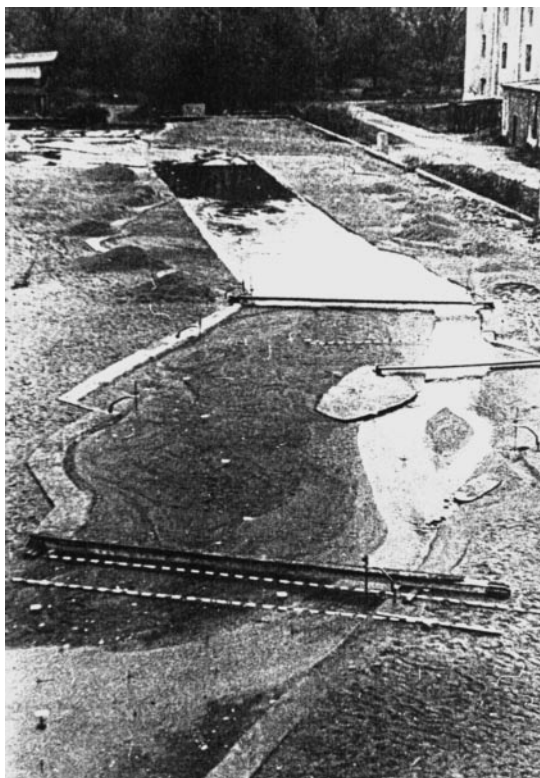


Рис. 10.34. Большой русловой карьер на модели р. Лабы

**Таблица 10.16. Масштабные множители гидравлических характеристик на деформируемой модели р. Лабы**

Характеристика	Масштабный множитель
Линейные размеры (длина, ширина, глубина)	50
Крупность частиц	50
Уклон дна и водной поверхности	1
Объем стока воды и наносов	125000
Число Фруда	1
Скорость потока	7,07
Расход воды и наносов	17678
Время гидрологических и морфологических процессов	7,07

Первоначально на модели было выложено ровное дно с уклоном 0,0045. В дальнейшем водный поток сам формировал рельеф дна, русло, протоки, микро- и мезоформы русла. Эксперименты показали, что расход наносов имеет резко пульсационный характер, даже при установившемся режиме движения воды. Как видно из рис. 10.32, натурные и модельные данные удовлетворительно ложатся на кривой зависимости расхода влекомых наносов от расхода воды, описываемой уравнением (10.31). Разброс экспериментальных точек достаточно большой, что объясняется разнообразием факторов, влияющих на величину расхода донных наносов: режима движения воды (установившийся, неустановившийся), морфологии русла и уровня воды, степени и интенсивности вовлеченности основной, преобладающей смеси донных отложений и самых крупных частиц в движение, времени осреднения расхода донных наносов и др. Разброс точек больше при малых расходах воды, так как в этом диапазоне происходит сортировка наносов и элемент случайности и избирательное движение частиц, слагающих донные отложения, проявляются выразительнее, чем при больших, руслоформирующих расходах воды, когда в движение вовлечена вся смесь донных наносов или ее преобладающая часть и поток не обтекает, а формирует динамически равновесное русло. Тем не менее сток влекомых наносов за сравнительно большие интервалы времени во всем диапазоне расходов воды с достаточной надежностью может быть определен по средней линии связи, соответствующей зависимости (10.31).

В табл. 10.17 представлены результаты сопоставления данных измерений стока влекомых наносов при трех значениях расходов воды на Лабе с формулами различных исследователей, предложенных для расчета расхода влекомых наносов на реках горно-предгорной зоны. Из 35 сравниваемых формул 18 были разработаны советскими исследователями, а 17 — зарубежными авторами. Как видно из этой таблицы, наиболее близкие к фактическим результаты были получены по формулам В.В. Ромашина, Р.В. Тимировой и З.А. Классен [149, 387], а также Г.И. Шамова [285] и И.А. Никитина. Отмеченные зависимости получены на участках рек, сходных с Лабой.

На модели воспроизводился реальный паводок, наблюдаемый на Лабе в апреле 1993 г. с максимальным расходом  $574 \text{ м}^3/\text{с}$ , для которого расход донных наносов был определен по объему заполнения экспериментальной выемки, подготовленной непосредственно перед этим паводком. Сток донных наносов за этот паводок (в период с 15 по 24 апреля 1993 г.) по данным модели составил 52,8 тыс.  $\text{м}^3$ , тогда как измеренный за этот же период сток донных наносов составил 45 тыс.  $\text{м}^3$ .

На модели были также воспроизведены три самых высоких за период наблюдений на Лабе паводки с максимальными расходами воды  $901 \text{ м}^3/\text{с}$  (1941 г.),  $730 \text{ м}^3/\text{с}$  (1939 г.) и  $866 \text{ м}^3/\text{с}$  (1944 г.). По данным экспериментов, сток наносов за эти паводки составил соответственно 30, 22 и 60 тыс.  $\text{м}^3$ . Расчеты по зависимости (10.31) соответственно составили 27, 19 и 64 тыс.  $\text{м}^3$ .

Для изучения характера стока донных наносов в условиях резко неустановившегося движения воды на размываемой модели были воспроизведены 12 экспериментальных паводков различной высоты и продолжительности. Эти

Таблица 10.17. Сравнение данных измерений на р. Лабе с результатами расчета расхода донных наносов по формулам различных исследователей

Дата		9 июня 1992 г.		18 июня 1992 г.		31 мая 1993 г.*	
Расход воды $Q$ , м <sup>3</sup> /с		195		269		382	
Расход наносов $Q_T$ , м <sup>3</sup> /с		0,01		0,026		0,071	
№ п/п	Авторы формул	$Q_{T\text{расч.}}/Q_{T\text{изм.}}$					
1	В.Н. Гончаров, 1954	0,127	12,7	0,257	9,9	0,295	4,2
2	И.В. Егизаров, 1949	0,183	18,3	0,416	16	-	-
3	И.Ф. Карасев, 1975	0,184	18,7	1,129	43,4	-	-
4	З.Д. Копалиани, 1983	0,19	19	0,318	12,2	0,432	6,1
5	Р.Д. Кромер, 1984	0,005	0,5	0,04	1,5	0,012	0,2
6	А.Н. Крошкин, 1968	0,202	20,2	-	-	-	-
7	И.И. Леви, 1948	0,082	8,2	0,175	6,7	0,274	3,9
8	** И.А. Никитин, 1951	0,018	1,8	0,053	2	0,141	2
9	Д.В. Носелидзе, 1992	0,134	13,4	0,331	12,7	0,355	5
10	В.В. Романовский, 1977	0,49	49	0,756	29,1	1,997	28,1
11	**В.В. Ромашин, 1990	0,017	1,7	0,039	1,5	0,079	1,1
12	К.И. Россинский, 1968	0,195	19,5	0,412	15,8	0,418	5,9
13	Н.В. Рухадзе-1, 1977	0,128	12,8	0,267	10,3	0,929	13,1
14	Н.В. Рухадзе-2, 1977	0,012	1,2	0,017	0,7	-	-
15	В.Ф. Талмаза, 1963	0,1	10	0,192	7,4	0,36	5,1
16	**Р.В. Тимирова — З.А. Классен, 1970	0,009	0,9	0,029	1,1	0,076	1,1
17	А.Ю. Умаров, 1967	2,88	288	4,313	166	-	-
18	Г.И. Шамов, 1949	0,05	5	0,092	3,5	0,111	1,6
19	Т. Ашида, 1977	0,492	49,2	0,868	33,4	-	-
20	Д. Батхуст, 1987	0,167	16,7	0,243	9,3	-	-
21	Р. Беттес, 1984	0,989	98,9	0,158	6,1	-	-
22	Г. Чанг, 1980	0,545	54,5	1,049	40,3	-	-
23	Х. Эйнштейн, 1942	0,334	33,4	0,706	27,2	-	-
24	Х. Эйнштейн, 1950	0,331	33,1	0,489	18,8	-	-
25	Х. Эйнштейн-Браун, 1950	0,276	27,6	0,674	25,9	-	-
26	В. Граф, 1987	0,266	26,6	0,545	21	-	-
27	П. Мэйер-Петер и Р. Мюллер, 1948	0,531	53,1	1	38,5	-	-
28	Милхауз, 1973	0,023	2,3	0,04	1,5	-	-
29	Г. Паркер, 1978	0,448	44,8	1,007	38,7	-	-
30	Г. Паркер и др., 1982	0,14	14	0,497	19,1	-	-
31	Д. Ротгнер, 1959	0,033	3,3	0,09	3,5	0,17	2,4
32	А. Шоклич, 1943	0,134	13,4	0,197	7,6	-	-
33	Г. Снат, 1984	0,224	40290	0,361	13,9	-	-
34	Т. Такахаши, 1987	0,714	71,4	1,256	48,3	-	-
35	С. Томпсон, 1985	0,078	7,8	0,111	4,3	-	-

Примечание: \* — данные по уклону водной поверхности отсутствуют; \*\* — региональные зависимости.

эксперименты подтвердили крайне изменчивый характер стока влекомых наносов, иногда не синхронный с формой и высотой экспериментального паводка. После изучения на пространственной модели р. Лабы руслового и гидравлического режимов, а также транспорта донных наносов в естественных условиях, на модели были воспроизведены проектные условия. Был разработан карьер длиной 1800 м, шириной 250 м и глубиной 4 м.

Для оценки степени влияния карьера на гидравлические характеристики потока, транспорт наносов и режим деформаций русла на модели было воспроизведено среднее многолетнее половодье, схематизированное в виде ступенчатого гидрографа с расходом воды  $250 \text{ м}^3/\text{с}$  в течение 30 сут. (натуры) и  $400 \text{ м}^3/\text{с}$  — 5 сут. (натуры). Расход воды  $250 \text{ м}^3/\text{с}$  ( $14,1 \text{ л/с}$  на модели) соответствует среднему многолетнему расходу половодья и является расходом, вносящим наибольший вклад в среднем многолетнем стоке наносов. Расход воды  $400 \text{ м}^3/\text{с}$  ( $22,6 \text{ л/с}$  на модели) принят в качестве среднеемноголетнего максимального расхода воды. Наносы в начале модели подавались в зависимости от расхода воды, в соответствии с графиком на рис. 10.32.

Как показали эксперименты, влияние проектного карьера на гидравлический режим потока и русловые деформации проявилось в понижении уровней воды в пересчете на натуру на 3–4 м сначала в самом карьере. Это привело к значительному увеличению уклонов водной поверхности (до 0,0104) непосредственно выше карьера и интенсивному размыву дна, который по мере распространения вверх по течению вызвал снижение уровней воды и выполаживание уклонов водной поверхности (рис. 10.35). Все наносы задерживались в карьере, в связи с чем ниже карьера из-за дефицита наносов также наблюдались размывы дна русла и снижение уровней воды, но гораздо менее значительные, чем на

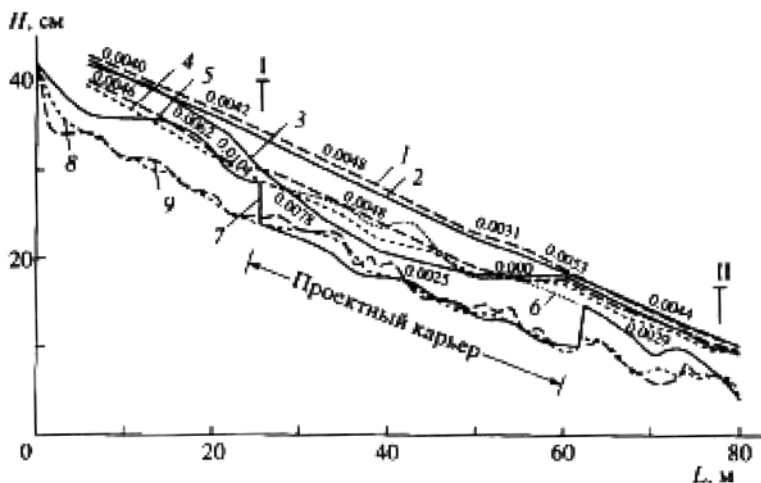


Рис. 10.35. Продольные профили водной поверхности и дна на размываемой модели р. Лабы у п. Мостовской: 1 и 2 — естественный режим ( $Q = 22,6$  и  $14,1 \text{ л/с}$  соответственно), 3 — в начале опыта ( $Q = 14,1 \text{ л/с}$ ); 4 и 5 — через 86 и 116 часов и 8 и 9 — через 105 и 123 часов соответственно

верхнем участке. Размыв дна и врезание русла непосредственно ниже карьера привели к образованию отмошки, которая способствовала стабилизации продольного профиля дна и водной поверхности на участке.

Таким образом, карьер вызвал врезание русла в среднем на 2–2,5 и 1–2 м соответственно выше и ниже карьера и снижение уровней воды на 1,5–2,5 м (верхний участок) и 0,5–1 м (ниже карьера). Зона заметных изменений отметок водной поверхности и дна ниже карьера распространилась до автодорожного моста (~1000 м).

#### 10.3.4.4. Лабораторные эксперименты в 100-метровом гидравлическом лотке

Параллельно с экспериментами на пространственной деформируемой модели проводились исследования в 100-метровом гидравлическом лотке шириной 1 м [291]. При тех же гидравлических режимах и крупности донных отложений, что и на пространственной модели, в лотке изучаемое явление воспроизводилось в двухмерном режиме, что позволяет изучить процесс занесения карьеров различной конфигурации и различного объема, трансформацию дна русла и изменения характеристик гидравлического режима потока. В силу меньшей трудоемкости работ в 100-метровом гидравлическом лотке в короткий срок можно выполнить больше опытов, чем на пространственной модели, и более детально исследовать изучаемый процесс. Масштабные множители моделирования в лотке соответствовали значениям, приведенным в табл. 10.16 для пространственной деформируемой модели.

По характеру сопряжения руслового карьера с транзитным потоком целесообразно классифицировать карьеры на затопленные и незатопленные. Критерием для разделения карьеров на указанные две группы может служить соотношение

$$\Delta Z < H,$$

где  $\Delta Z = IL_K$  — максимально возможное снижение уровня воды в створе верхового откоса карьера,  $I$  и  $H$  — соответственно уклон водной поверхности и глубина потока в естественных (ненарушенных) условиях,  $L_K$  — длина карьера. При  $\Delta Z < H$  карьер будет функционировать в затопленном режиме, а при  $\Delta Z > H$  — в незатопленном.

Можно записать:

$$IL_K = H, \quad (10.32)$$

откуда для затопленного режима

$$L_K = \frac{H}{I}. \quad (10.33)$$

Наибольшая длина карьера, функционирующего в затопленном режиме для исследуемого участка Лабы при  $I = 0,0048$  и  $H = 1–2$  м составит соответственно 208–416 м.

При незатопленном режиме у верхового откоса карьера образуется кривая спада, способствующая интенсивному размыву дна выше карьера. Течение в транзитной зоне карьера имеет те же или близкие гидравлические характеристики, что и выше карьера. При затопленном режиме выше карьера кривая спада уположивается, а течение в пределах карьера испытывает подпор. В самом карьере скорости потока уменьшаются, и в связи с этим в нем могут отлагаться помимо влекомых и взвешенные наносы. Исходя из отмеченного, результаты экспериментов по исследованию трансформации дна ниже карьера можно распространять на карьеры любой длины. При изучении изменений отметок водной поверхности и дна выше карьера на модели, очевидно, надо отдельно исследовать оба указанных случая.

По техническим условиям (необходимость создания уклона дна опытным грунтом в лотке с горизонтальным дном, наличие порога водосливного щита) в экспериментах на 100-метровом лотке в качестве рабочей длины лотка удалось использовать только его часть (56 м). Состав грунта и средний уклон дна в лотке были такими же, как и на деформируемой пространственной модели.

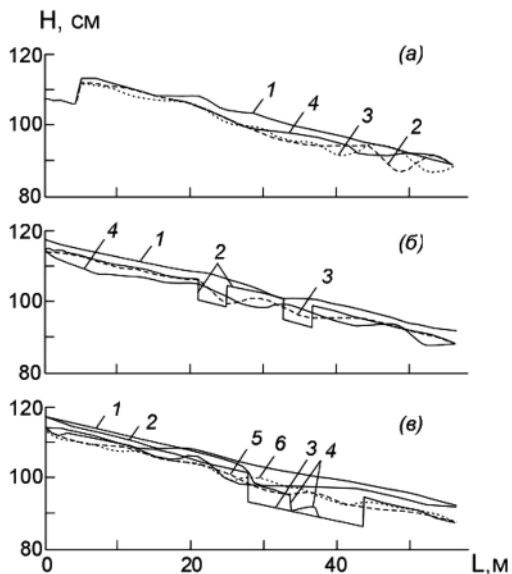
Сначала в лотке была проведена тарировочная серия экспериментов, в ходе которой определялись гидравлические условия начала транспорта наносов, изучались формы транспорта наносов и устанавливалась связь расхода влекомых наносов с расходом воды. Затем в соответствии с принятыми масштабами моделирования в верхней части лотка был устроен карьер и исследовался механизм трансформации дна ниже карьера при глубинах потока от 1 до 2 м, характерных для Лабы в половодье. После этого изучалось влияние на русловой и гидравлический режимы потока двух коротких карьеров длиной 200 и глубиной 3 м каждый, расположенных на расстоянии 400 м один от другого, при глубинах потока вне зоны влияния карьеров от 1 до 2 м. Затем исследовалось влияние на гидравлический режим потока и трансформацию дна русла, карьера длиной 800 и глубиной 4 м при тех глубинах потока, что и в предыдущих экспериментах. Во время экспериментов в начале лотка подавались наносы в соответствии с соотношением между расходами воды и наносов, полученным для тарировочной серии экспериментов.

На рис. 10.36 (а) видно, что размыв дна ниже большого карьера, полностью перехватывающего поступающие сверху наносы, в пересчете на натуру достигает 2–2,5 м и распространяется на расстояние до 2000 м. Размыв в целом стабилизировался через 16,7 сут. (натуры) после начала эксперимента. На этом же рисунке видна и вариация отметок дна, вызванная образованием и движением мезоформ (побочней) ниже карьера.

Короткие карьеры (рис. 10.36 (б)) функционировали в затопленном режиме и вызвали понижение уровня воды примерно на 1 м на участке расположения карьеров. Размыв дна выше карьеров составил также ~1 м и распространился до самого начала лотка. Перемычка между карьерами была практически полностью смыта. Вертикальные деформации дна ниже карьеров составили в среднем ~1 м, а зона размыва достигла ~500 м. Через ~12 сут. (натуры) после начала опыта часть карьеров оказалась занесенной и отметки дна стали восстанавливаться.



Рис. 10.36. Продольные профили водной поверхности и дна в лотке:  
 (а) ниже карьера: 1 – водная поверхность в начале опыта; 2 – профиль дна через 57 ч; 3 – через 70 ч; 4 – через 75 ч;  
 (б) при наличии двух коротких карьеров: 1 – водная поверхность в начале опыта  $H = 2$  см; 2 – профиль дна в начале опыта; 3 – через 14 ч, 4 – через 40 ч;  
 (в) в длинном карьере: 1 – водная поверхность в начале опыта  $H = 2$  см; 2 – водная поверхность через 38 ч  $H = 4$  см; 3 – профиль дна в начале опыта; 4 – через 3 ч; 5 – через 7 ч; 6 – через 38 ч



В отличие от коротких, длинный карьер (рис. 10.36 (в)) функционировал в незатопленном режиме, и понижение уровня воды на этом участке в пересчете на натуру составило 2,5 м. Размыв дна выше карьера достиг 1,5 м и распространился на весь верхний участок лотка. Дефицит наносов на нижнем участке вызвал размыв ниже карьера на глубину до 1,5 м. Карьер был практически полностью занесен через 2,3 сут. (натуры) от начала опыта, после чего стал восстанавливаться естественный профиль дна.

В связи с идеализированными условиями транспорта влекомых наносов в прямолинейном лотке, в плоской постановке задачи, где в отличие от природы не проявляется пространственная структура рельефа русла и потока, полученное время занесения карьеров может рассматриваться как минимально возможное.

#### 10.3.4.5. Выводы и рекомендации

Выполненный комплекс теоретических, полевых и лабораторных исследований позволяет сделать ряд выводов о русловом процессе и режиме наносов р. Лабы у п. Мостовской и сформулировать рекомендации по технологии и объемам выборки руслового аллювия, для принятия обоснованного решения по вопросу о дальнейшей судьбе карьерных разработок на этой реке.

Русловой процесс р. Лабы на исследуемом участке развивается по схеме горной пойменной многорукавности (пойменного блуждания) с осередковым типом в главном рукаве реки.

Активная фаза транспорта донных и взвешенных наносов на р. Лабe приходится на период половодья и паводков (3–4 месяца), особенно возрастая в краткие периоды экстремальных подъемов уровней и расходов воды.

Средний многолетний годовой сток взвешенных наносов на реке составляет 669 тыс. т (420 тыс. м<sup>3</sup>), наибольший измеренный — 1,8 млн. т (1100 тыс. м<sup>3</sup>), наименьший — 150 тыс. т (90 тыс. м<sup>3</sup>).

Как показывают расчеты, годовой сток влекомых наносов изменяется в зависимости от водности года от 68 тыс. т (31 тыс. м<sup>3</sup>) до 702 тыс. т (319 тыс. м<sup>3</sup>) и по отношению к суммарному стоку наносов составляет от 12 до 37 %. Средний многолетний годовой сток влекомых наносов, рассчитанный по ежедневным расходам воды за период 52 года, равен 290 тыс. т (132 тыс. м<sup>3</sup>).

По данным натурных исследований, карьерные разработки, выполнявшие в русле р. Лабы у п. Мостовской в 1991–1993 гг., привели к снижению уровней воды в реке на участке непосредственных выемок речного аллювия между автодорожным мостом и транспортной эстакадой на 2–2,5 м.

Выше карьера посадка уровней воды составила 1–1,5 м на расстоянии до 1100 м.

Ниже карьера заметного снижения уровней воды во время полевых работ в 1993 г. зафиксировано не было.

Полное восстановление отметок дна на участке добычи руслового аллювия при условии полного прекращения карьерных разработок, в соответствии с расчетами, произойдет через 10–15 лет.

По данным модельных исследований эксплуатация длинного карьера (более 400 м), функционирующего в незатопленном режиме, вызывает врезание русла в зоне активного транспорта наносов на глубину 2–3 м на расстоянии не менее 1–1,5 км выше карьера и на 1–2 м ниже карьера на расстоянии до 1 км.

В зоне необратимых однонаправленных деформаций дна непосредственно ниже карьера происходит самоотмостка дна крупными наносами, препятствующая дальнейшему размыву русла в глубину.

Снижение уровней воды на участке русла выше карьера составляет 1,5–2,5 м, а ниже карьера — 0,5–1 м.

Таким образом, разработка длинной русловой прорези вызывает значительные посадки отметок дна и водной поверхности, что, с одной стороны, благоприятно скажется на условиях пропуска половодий и паводков на участке и уменьшит вероятность неконтролируемого блуждания реки и связанного с этим размыва берегов с существующими постройками, а с другой стороны, в связи с падением уровня грунтовых вод на прилегающих территориях, может оказать негативное влияние на условия водоснабжения и продуктивность сельскохозяйственных угодий.

Разработанная русловая прорезь (длинный карьер) со временем будет расширяться, искривляться в плане и мелеть за счет продуктов размыва берегов и поступающих сверху наносов, что приведет к постепенному восстановлению отметок дна и водной поверхности.

Разработка длинного карьера не приводит к усилению планового блуждания русла или смене типа руслового процесса.

Исходя из отмеченного выше, наиболее обоснованным и допустимым с точки зрения наименьшего воздействия карьерных выемок на русловой и гидравлический режимы реки, представляется ежегодное изъятие грунта в объеме не

более среднего годового стока влекомых наносов (порядка 100–200 тыс. м<sup>3</sup>) из коротких (длиной менее 200 м) и нешироких (порядка 100 м) карьеров, функционирующих в затопленном режиме и поэтому не вызывающих значительных посадок уровней воды.

Эти карьеры целесообразно располагать в шахматном порядке с целью предотвращения размыва перемычек между карьерами, а также на возможно большем расстоянии друг от друга (не менее 400 м) на участке русла, не охваченного карьерными разработками 1991–1994 гг.

Результаты выполненных исследований могут быть использованы при решении задач, подобных описанной выше, на реках, для которых р. Лаба может служить рекой-аналогом.

### **10.3.5. Гидравлическое моделирование р. Нюкжи на участке прижима 1416–1422 км по трассе БАМ**

В своей западной части Байкало-Амурская магистраль (БАМ) пересекает Забайкальскую горную страну с ее многочисленными горными реками и их притоками. На этом участке БАМ было запроектировано большое количество инженерных сооружений, взаимодействующих с руслами и поймами рек, наибольший интерес из которых, в связи с их массовостью, представляли «прислоненные полки» — отсыпки грунта непосредственно в руслах рек под железнодорожную насыпь. Последние часто приурочены к так называемым прижимам — местам, где река протекает вдоль отвесных склонов долин. Общая протяженность участков прижимов на трассе БАМ составляет около 300 км и в основном приходится на реки Нюкжа, Олекма, Хани и их притоки.

Целью лабораторных исследований на гидравлической деформируемой модели участка прижима р. Нюкжи (1416–1422 км по трассе БАМ) было изучение руслового процесса и определение характера и степени гидравлического воздействия потока на железнодорожную насыпь в русле при различных проектных вариантах, разработанных Ленгипротрансом. Оценка проектных решений и выбор наиболее рациональных вариантов трассирования железной дороги БАМ вдоль вогнутых скальных берегов рек, в силу большого разнообразия таких участков, различающихся по условиям гидравлического и руслового режимов, является сложной задачей. Создание гидравлических моделей способно в значительной мере содействовать ее решению.

Исследуемый прижим расположен на участке 20–25 км от устья Нюкжи в средней части пологой излучины с радиусом кривизны 3200 м.

Анализ плановых деформаций исследуемого участка с помощью совмещения аэрофотоснимков разных лет съемок привел к выводу о локальном характере распространения участков, подверженных плановым деформациям, и невысоких темпах этих деформаций, откуда следует, что на участке 1416–1422 км трассы БАМ плановые деформации русла не оказывают существенного влияния на кинематику потока и устойчивость железнодорожной насыпи. Исходя из этого, деформируемая модель исследуемого участка была выполнена с фиксированными, недеформируемыми в плане границами.

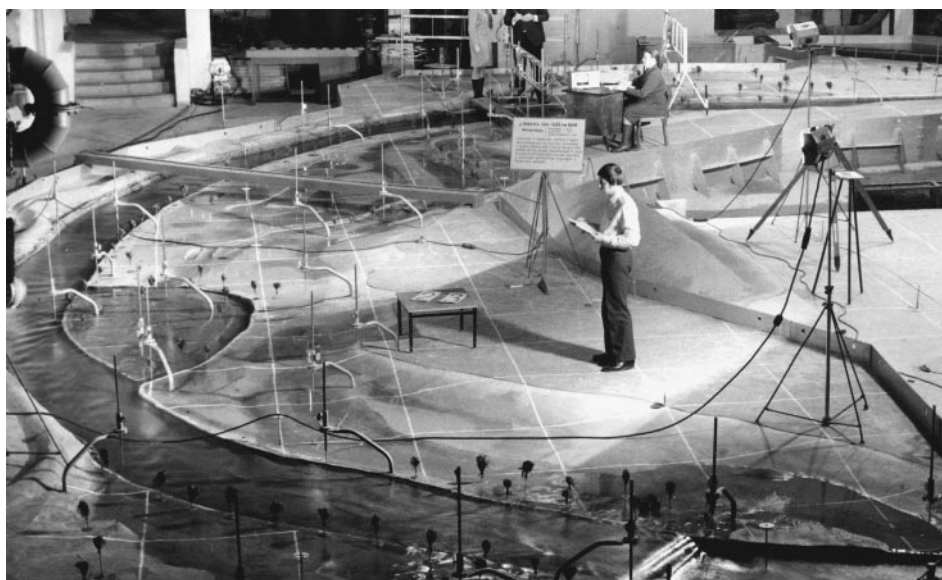


Рис. 10.37. Гидравлическая модель р. Нюкжи

Подробное описание методики исследований и результатов опытов представлено в работе [137]. Ниже дана краткая информация об этих исследованиях.

Плановый масштаб модели составлял 1:300, вертикальный — 1:100. На модели воспроизводилась вся излучина длиной 10 км (1415–1425 км трассы БАМ), включающая пятикилометровый участок прижима (1417–1422 км) и весь пойменный массив (рис. 10.37). Длина модели по средней линии русла составляла 33 м, ширина русловой части 0,86–1,10 м, максимальная ширина поймы 3,8 м.

Нюкжа относится к большим рекам. Ее русло сложено крупным аллювием. Последнее обстоятельство позволяет моделировать крупность донных отложений в масштабе глубины потока. Однако большие абсолютные размеры этой реки не позволили создать неискаженную модель и воспроизвести все линейные размеры русла в одном масштабе. Трехкратное искажение линейных масштабов на модели Нюкжи было обусловлено желанием охватить всю излучину русла с пойменным массивом, а также ограничением лабораторной площади. Трехкратное искажение линейных масштабов приводит к увеличению уклона дна и водной поверхности в 3 раза.

При режимах, рассчитанных по условиям равенства числа  $Fr$  на модели и в натуре, в тарировочных экспериментах не достигалось требуемого наполнения русла водой. Это вызывало необходимость форсировки расхода воды. Степень форсировки подчинялась удовлетворению двух условий: достижению требуемого наполнения русла и равенства критерия подвижности наносов по неразмывающей скорости  $\frac{v}{v_0}$  для природы и модели. В основу расчетов для сравнения

полагалось  $Fr = idem$ .

Записав выражение для расхода воды  $Q=HBv$  и выразив скорость потока через число Фруда  $v = Fr\sqrt{gH}$ , для отношения расходов воды в натуре и на модели, т. е. масштаба расходов, получаем:

$$\alpha_Q = \frac{Q_H}{Q_M} = \alpha_{Fr} \alpha_B \alpha_H^{3/2}. \quad (10.34)$$

Из этого выражения как частные случаи для неискаженной модели  $\alpha_B=\alpha_H$  при соблюдении  $Fr = idem$  имеем известное выражение  $\alpha_Q = \alpha_B^{2/5}$ , а в случае искаженной модели  $\alpha_B \neq \alpha_H$ , но  $Fr = idem$ .

$$\alpha_Q = \alpha_B \alpha_H^{3/2}. \quad (10.35)$$

Аналогично расходу воды для масштаба скоростей потока можно записать:

$$\alpha_v = \frac{v_H}{v_M} = \frac{Fr_H \left( \sqrt{gH} \right)_H}{Fr_M \left( \sqrt{gH} \right)_M} = \alpha_{Fr} \alpha_{\sqrt{H}}. \quad (10.36)$$

Исходя из отмеченных соображений, опыты на модели Ньюджи проводились при двухкратной форсировке числа  $Fr$  и дополнительно при форсировке в 1,4 раза.

В табл. 10.18 приведены количественные значения масштабных соотношений для модели Ньюджи.

**Таблица 10.18. Количественные значения масштабных соотношений на модели р. Ньюджи**

$\alpha$	$\alpha_{Fr} = 1$	$\alpha_{Fr} = 0,7$	$\alpha_{Fr} = 0,5$
$\alpha_Q$	300 000	210 000	150 000
$\alpha_v$	10	7	5

В табл. 10.19 представлены характеристики натурального и модельного потоков в гидростворе 3, расположенном ниже впадения в Ньюжку ручья Дерпук (верхний правый угол рис. 1), при расходе воды  $Q = 4770 \text{ м}^3/\text{с}$ , уровне  $H_B = 417,67 \text{ м}$  и  $\alpha_{Fr} = 0,5$ . На модели этим условиям соответствует расход воды 82,5 л/с. Глубина потока в створе 3 при этом расходе воды на модели в русле составляет 9 см, а на пойме — 3–5 см. Отметка водной поверхности в створе 3 при  $Q_{0.3\%}$  в пересчете на натуру составляет 420,65 м.

На модели было выполнено 48 опытов, разделенных на семь серий.

В тарировочной серии опытов определялись: кривая неразмывающих скоростей потока, гидравлические режимы (расход воды, уровни, уклоны), степень форсировки числа  $Fr$  и расход донных наносов на модели. Во второй и третьей сериях экспериментов исследовались кинематика потока и русловые деформации (характеристики транспорта донных наносов) соответственно в естественном состоянии и при наличии железнодорожной насыпи. Опыты четвертой серии проводились при наличии в русле железнодорожной насыпи и пяти бун.

Таблица 10.19. Характеристики натурального и модельного потока в гидростворе 3 при  $Q=4770 \text{ м}^3/\text{с}$ ,  $H_g=417,67 \text{ м}$  и  $\alpha_{Fr}=0,5$

Характеристика потока	Натура	Модель	Масштабный коэффициент	
			символ	Численное значение
Ширина русла, м	280	0,93	$\alpha_B$	300
Средняя глубина, м	6,0	0,06	$\alpha_H$	100
Средняя скорость потока, м/с	2,45	0,50	$\alpha_v$	5
Уклон водной поверхности	0,00056	0,0017	$\alpha_I$	0,33
Число Фруда $Fr = \frac{v}{\sqrt{gh}}$	0,32	0,64	$\alpha_{Fr}$	0,5
Число Рейнольдса $Re = \frac{vH}{\nu}$	$14,7 \cdot 10^5$	$3 \cdot 10^4$	$\alpha_{Re}$	450
$\frac{B}{H}$	46,6	15,2	$\alpha_{B/H}$	3,0

В пятой серии опытов была выполнена срезка левого (выпуклого) берега, и эксперименты проводились при наличии железнодорожной насыпи и бун. В шестой серии опыты проводились при наличии железнодорожной насыпи и срезке берега, но без бун. В седьмой серии исследовались варианты стабилизации плесовой ямы в районе впадения в Нюкжу с правого берега ручья Дерпук одной и двумя бунами. Во всех сериях эксперименты проводились с расходами воды, соответствующими расходам 10 и 0,3 %-ной обеспеченности. Было проведено также несколько опытов при  $Q$  1 %-ной обеспеченности.

Выполненные исследования позволили сделать следующие выводы:

- На основе материалов аэрофотосъемок выявлен локальный характер распространения участков, подверженных плановым деформациям. Левый, пойменный берег подвержен размыву. Однако размыв берега осуществляется невысокими темпами. Это позволяет утверждать, что на участке 1416–1422 км трассы БАМ плановые деформации русла не будут оказывать существенного влияния на кинематику потока и устойчивость железнодорожной насыпи.
- Сооружение железнодорожной насыпи вдоль прижима вызывает увеличение средних скоростей в русле на 3–15 %. Наибольшее увеличение скоростей течения в проектных условиях (на 10–15 % по сравнению с бытовыми) относится к расходу воды 10 %-ной обеспеченности, наполняющему русло в пределах бровок, наименьшее — к расходам воды 1 и 0,3 %-ной обеспеченности.
- При наличии бун в русле максимальные скорости течения в различных створах прижима составляют от 4,3 до 4,8 м/с. Поверхностная скорость у оголовка первой по течению буны составляет 4,0 м/с, у остальных бун — 2,5 м/с. Скорость потока на границах водоворотных областей в межбунном пространстве и вдоль прижима составляет

0,8–2,5 м/с. Наибольшие местные размывы дна наблюдаются у первой и последней бун.

- При осуществлении срезки левого берега полосой 85 м с устройством защитных бун вдоль железнодорожной насыпи максимальные скорости течения составляют 4,5 м/с, скорость потока у оголовка первой буны — 4,25 м/с, у второй — 3,75 м/с, у остальных бун скорость менее указанных значений.
- Осуществление срезки левого берега полосой 85 м без устройства защитных бун вызывает заметное уменьшение скоростей потока в русле по сравнению с вариантом с бунами. Максимальная скорость граничной струи вдоль прижима при срезке берега без бун не превышает 3,6 м/с.
- В результате опытов установлено, что транспорт наносов на исследуемом участке Нюкжи осуществляется в виде движения ленточных гряд. Получены геометрические и динамические характеристики этих гряд, а также аналитическое выражение для масштаба времени русловых деформаций, согласно которому, деформациям, осуществляющимся на модели в течение 1 ч, соответствуют деформации в натуре, осуществляющиеся в течение 12,5 ч или 0,52 сут. Скорость движения гряд в натуре в бытовых условиях при расходе 0,3 %-ной обеспеченности определена равной в среднем около 953 м/сут, а суммарный расход донных наносов составляет 320 200 м<sup>3</sup>/сут.
- Крупность камня на откосе железнодорожной насыпи, составляющая по проектным расчетам Ленгипротранса в варианте без бун 0,7 м на участке 1420–1422-й км и 0,6–0,7 м на участке 1417–1420-й км, а в варианте с бунами 0,8 м в креплении бун и 0,4 м между бунами, надежно, с гарантией обеспечивает устойчивость железнодорожной насыпи.
- По результатам опытов в соответствии с теми же рекомендациями представляется возможным в проектном варианте без бун уменьшить крупность камня на участке 1417–1420-й км на 0,1 м. Таким образом, крупность камня по всему прижиму в варианте без бун и без осуществления срезки берега может быть принята равной 0,5–0,6 м, за исключением участка плеса у впадения ручья Дерпук, где наблюдается сложная система течений.
- В варианте со срезкой левого берега на ширину 85 м крупность камня на откосе насыпи при отсутствии бун может быть принята 0,4–0,5 м, поскольку максимальная скорость в граничной струе прижима составляет не более 3,6 м/с.
- С сооружением железнодорожной насыпи в русле отметка плеса у устья ручья Дерпук сохраняется, но пережат и плес в целом перемещаются вверх по течению на 400 м. Здесь возникает сложная система течений, требующая выполнения специальных защитных мероприятий для этого участка насыпи протяженностью около 300 м, если трассу на этом отрезке не переносить из русла. Для обеспечения устойчивости насыпи на этом участке был рекомендован один из вариантов стабилизации плесового участка прижима — устройством в русле одной или двух бун по схемам, рассмотренным в опытах.

## Заключение

Горные реки широко распространены в природе. Суммарная протяженность русел рек горно-предгорной зоны с крупным составом речного аллювия превышает суммарную протяженность равнинных рек с песчаным руслом.

В общей системе денудационных процессов на Земле горные реки занимают промежуточное положение между осыпями и равнинными реками. Поэтому рекам горно-предгорной зоны в определенной мере присущи морфодинамические черты обоих этих природных объектов. С осыпями горные реки схожи лавинообразным характером движения селей в верхних звеньях гидрографической сети, а их общность с равнинными реками проявляется в структурных формах транспорта донных наносов, наблюдаемых на участках среднего и нижнего течения горно-предгорных рек в виде русловых мезо- и микроформ.

При сравнении руслового процесса равнинных и горно-предгорных рек, из трех основных факторов, определяющих русловую процесс: характеристик стока воды, характеристик стока наносов и ограничивающего фактора, последний приобретает особое значение. Его учет позволяет представить всю совокупность речных типов в горно-предгорной зоне, связанной единой, более или менее строгой закономерностью. Она выражается в постепенном освобождении русла реки вниз по течению от влияния ограничивающего фактора в верховьях и в постепенном переходе режима транспорта наносов от бесструктурного сначала к элементам структурности, а затем к полностью структурному транспорту и свободному руслоформированию.

Специальными лабораторными исследованиями условий образования гряд из крупных наносов установлено, что гряды в этих условиях, безотносительно от абсолютной крупности частиц, могут возникать и существовать всегда, когда выполняются условия:  $\frac{v}{v_0} > 1$  и  $\frac{H}{d_{90}} > 15$  (для однородного состава донных отложений), или  $\frac{H}{d} > 30$  (для разнородного состава). Эти условия реализуются в средних и нижних течениях горно-предгорных рек, тогда как бесструктурный транспорт наносов имеет место преимущественно в их верховьях и на малых горных реках, где  $\frac{H}{d_{90}} \leq 15$ .

На реках горно-предгорной зоны обнаружены все типы руслового процесса, свойственные равнинным рекам: ленточно-грядовый, побочневый, осередковый типы, меандрирование, а также два дополнительных типа, формирующиеся исключительно на участках горно-предгорных рек при выходе русел из гор или в расширениях горных долин. Это горная пойменная многоруканность на средних и больших реках горно-предгорной зоны и горное долинное блуждание на малых реках (рис. 10.2, 10.3).

Выполнение непосредственных измерений на реках горно-предгорной зоны во время паводков затруднено в силу специфики этих рек: больших уклонов дна,



высоких скоростей потока, превышающих 8 м/с, редкой повторяемости высоких, руслоформирующих паводков и их чрезвычайной скоротечности. Вместе с этим, на гидравлических, физических моделях рек, сложенных из крупного аллювия, в отличие от таких же моделей равнинных рек, крупность донных отложений воспроизводится в масштабе глубины потока, что дает возможность создавать динамически и геометрически неискаженные, деформируемые гидравлические модели.

Представленная в настоящей главе методика гидравлического моделирования руслового процесса и транспорта наносов в реках горно-предгорной зоны при структурной и бесструктурной формах транспорта донных наносов, основываясь на данных лабораторных исследований, позволяет адекватно воспроизводить на деформируемых гидравлических моделях русловой процесс и характеристики транспорта донных наносов и количественно описывать и пересчитывать на натурные условия все стороны и элементы взаимодействия потока и русла (формирование рельефа дна и его структурных элементов, пропускную способность русла, отметки и уклоны водной поверхности, характеристики стока донных наносов и др.) в бытовых и проектных условиях при различных, постоянных или переменных расходах воды, различной их продолжительности и величине, при любых сочетаниях и последовательности гидрографов стока воды.

Разработанный метод может быть использован как для поискового прогнозирования, имеющего целью предсказать состояние объекта исследования (прототипа) в будущем при наблюдаемых тенденциях развития процесса, так и нормативного прогнозирования, преследующего целью предсказывать путь достижения желательного состояния объекта на основе заранее заданных критериев в виде различных вариантов проектных решений.

Эффективность разработанной методики гидравлического моделирования на неискаженных, деформируемых гидравлических моделях продемонстрирована на примере четырех объектов: рек Хара-Мурин, Утулик, Аносовка и Лаба. В первых трех случаях задача исследований состояла в изучении руслового процесса предгорных рек разной величины и типа руслового процесса на участках железнодорожных мостовых переходов и в научном обосновании оптимальных, наиболее надежных и экономически выгодных проектных решений регулирования руслового процесса на этих реках, а в последнем случае более подробно исследовался транспорт наносов и русловой процесс Лабы в связи с добычей аллювия из этой реки для строительных нужд. Параллельными исследованиями в натуральных условиях и на пространственной, деформируемой гидравлической модели Лабы, а также в 100-метровом гидравлическом лотке удалось детально изучить характеристики стока наносов, русловой и гидравлический режимы этой реки и обосновать как эффективность разработанной методики гидравлического моделирования руслового процесса и транспорта донных наносов на реках горно-предгорной зоны в целом при структурном и бесструктурном режимах их движения, так и правомерность и достоверность количественных пересчетов характеристик транспорта донных наносов с модели на прототип — наиболее важного, сложного и слабо разработанного звена

в современной теории и практике гидравлического моделирования руслового процесса на деформируемых моделях речных русел.

Дальнейшее развитие теории и прикладных аспектов руслового процесса и транспорта донных наносов рек горно-предгорной зоны, включая методику их моделирования, представляется в расширении натурных исследований и более широком привлечении лабораторного метода, в разумном сочетании этих подходов и теоретического анализа, а также в совершенствовании и внедрении в практику методов математического и гибридного моделирования (совместного использования физических и математических моделей).

## ГИДРАВЛИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЛЕДОВЫХ ЗАТОРОВ И ЗАТОРНЫХ НАВОДНЕНИЙ

### 11.1. Методические подходы к изучению ледовых заторов

В странах с холодным климатом, к которым относится Россия, разрушение ледостава весной часто сопровождается формированием мощных ледовых заторов — многослойных нагромождений льдин в русле. Образующиеся в процессе вскрытия реки ледовые заторы стесняют живое сечение русла и вызывают подъем уровня воды в месте скопления льдин и на некотором участке выше по реке.

Подъем уровня воды при заторах льда на реках России достигает: на Нижней Тунгуске 28,5 м, Лене 19,8 м, Олекме 16,8 м, Печоре 14,8 м. При этом превышение наивысшего заторного уровня над поймой в населенных пунктах составляет 9,8 м (р. Енисей); 7,7 м (р. Печора); 6,7 м (р. Лена); 6,2 м (р. Иртыш, Олекма) [33].

Отсюда следует, что ледовые заторы и вызванные ими наводнения — грозное природное явление, приводящее к стихийным бедствиям с огромным материальным, экономическим и экологическим ущербом и человеческими жертвами.

Широкое распространение мощных ледовых заторов на реках России создает серьезные трудности при проектировании, строительстве и эксплуатации инженерных комплексов и сооружений на этих реках, обеспечении их безопасности.

Заторные наводнения представляют собой сложнейшее для наблюдения, количественного описания и прогнозирования природное явление, поскольку они реализуются в результате случайного сочетания множества факторов различной природы: климатических, метеорологических, геоморфологических, гидрологических, физико-термических, а также физико-механических свойств льда. Поэтому решение задачи прогнозирования ледовых заторов и методов их предотвращения и смягчения их последствий требует комплексного подхода с позиций ряда научных дисциплин: климатологии, метеорологии, гидрологии, гидрофизики, геоморфологии, речной гидравлики, сопротивления материалов, механики сыпучих сред.

Различным аспектам проблемы ледовых заторов и связанных с ними наводнений посвящено большое число исследований. Подробный обзор этих работ представлен в трудах Г.И. Болотникова [29, 30], В.А. Бузина [33, 34], С. Балтоуса [315], в сборнике статей конференции, организованной под эгидой НАТО в Новосибирске [339]. В отмеченных публикациях анализируются теоретические и эмпирические подходы для описания различных сторон проблемы формирования ледовых заторов и методов борьбы с ними, обсуждаются вопросы математического и физического моделирования ледовых заторов.

Общей теории ледовых заторов еще не создано. Каждое из перечисленных выше методических направлений наряду с преимуществами имеет серьезные ограничения и недостатки. Так, существующие в настоящее время математические

и численные гидродинамические модели пока больше пригодны для условия свободного ото льда русла, так как для условий со льдом необходимы параметры, труднодоступные для инструментального определения (коэффициенты гидравлического сопротивления, физико-механические характеристики скоплений льда, ледопрopusкная способность русел различных типов и др.).

Например, в одномерной математической модели ледовых заторов, предложенной Е.И. Дебольской [15], задается толщина ледового покрова, гидрограф паводка и длина свободного ото льда участка реки выше кромки ледяного покрова. Эта модель предназначена для случая рек с нешироким руслом, где заторы маломощны и не приводят к большим подъемам уровня воды.

В работе [95], посвященной математическому моделированию ледовых заторов на р. Лене у г. Ленска, принималось известным: место образования затора, густота ледохода на подходе к затору, коэффициент шероховатости нижней поверхности скопления льдин, длина скопления льдин, время начала формирования затора и его разрушения, суммарные расходы воды и льда на входной границе расчетной области. В рассматриваемой модели МГУ отсутствует также блок для расчета толщины скопления льда. Анализ этих и других подобных работ убеждает, что численное моделирование ледовых заторов находится в начальной стадии развития [339].

В исследовании ледовых заторов широкое распространение получили лабораторные методы с использованием гидравлических лотков и пространственных физических моделей [24, 29, 48, 77, 124, 221, 345, 378]. Эти исследования выполняются в двух направлениях: без учета прочностных характеристик льда и с учетом его прочностных характеристик. Последние проводятся в ледотермических лабораториях, оснащенных специальным оборудованием для получения искусственного льда при отрицательной температуре воздуха [29, 277, 378]. В лабораторных исследованиях большое внимание уделялось обоснованию выбора искусственного материала для имитации льда в модельных опытах, воспроизведению заторов подныривания и торошения, обоснованию критериальных условий формирования и прорыва заторов торошения и др. [23, 24, 29, 33, 75, 77, 221, 378].

Из накопленного опыта лабораторных исследований ледовых заторов следует, что в настоящее время, при некоторых ограничениях и допущениях, таких как невозможность надежного воспроизведения на модели даже в ледотермических лабораториях прочности, пластичности и других термических и физико-механических свойств льда, наиболее полно и достоверно в обычных гидравлических лабораториях можно изучать ледопрopusкную способность русла при заданных морфологических характеристиках и гидравлических характеристиках потока, механизм формирования и динамику ледовых заторов, эффективность методов борьбы с ними и решать инженерные задачи рационального проектирования, строительства и эксплуатации гидротехнических сооружений на реках с ледовыми заторами. В качестве примера здесь можно привести работу Г. Гарбрехта с соавторами [345].

По сравнению с методами математического и физического моделирования ледовых заторов, изучение этого природного явления в натуральных условиях и по-

пытки его теоретического осмысления имеют более долгую историю [209, 239]. На основе данных наблюдений и экспедиционных исследований [26, 33, 80, 166], а также теоретических проработок и систематизации различных аспектов проблемы формирования ледовых заторов изучены и классифицированы различные типы проявления ледовых заторов и причины их возникновения [77, 80], закономерности распространения заторных наводнений по территории России [80], механизм и динамика ледовых заторов [23, 24, 209, 255, 308, 315, 378, 397, 426]. Однако созданные к настоящему времени теоретические модели ледовых заторов пока не нашли применения в практике.

Для прогнозирования наводнений, вызванных ледовыми заторами, расчетов и прогноза максимальных заторных уровней в настоящее время на практике используются методы, основанные на обобщении фактических данных и эмпирических, общих и локальных для конкретных рек, зависимостях максимальных заторных уровней от факторов процесса заторообразования, установленных на основе сетевых гидрологических наблюдений. Общие зависимости процесса заторообразования используются в методах [33, 80]. На локальных эмпирических закономерностях и некоторых теоретических предпосылках базируются методы прогнозирования заторных явлений И.Я. Лисера, Р.А. Нежиховского, В.А. Бузина, В.В. Кильменинова [33, 128, 166, 339].

Таким образом, дальнейший прогресс в совершенствовании теории ледовых заторов и ее практических аспектов требует комплексного подхода, в котором достаточно ясно очерчены преимущества и роль гидравлического моделирования в изучении ледопротускной способности русла, деталей механизма образования и динамики ледовых заторов, разработки методов эффективной борьбы с ними и обоснования рационального проектирования, строительства и эксплуатации инженерных сооружений в руслах и поймах рек с ледовыми заторами. Ниже приведены два примера решения задач, связанных с ледовыми заторами на р. Лене с использованием гидравлических физических моделей.

## **11.2. Гидравлическое моделирование ледовых заторов на р. Лене у г. Ленска**

В 1998 и 2001 гг. на р. Лене у г. Ленска имели место два катастрофических наводнения, обусловленные весенними заторами льда. Уровень воды наводнения 2001 г. был наивысшим за весь период гидрологических наблюдений у г. Ленска и на 6,62 м превысил отметку выхода воды на пойму (рис. 11.1). Большая часть Ленска, расположенная на этой пойме, была полностью затоплена, что нанесло огромный материальный ущерб городу и его населению (рис. 11.2).

В 1998 и 2001 гг. на Лене у Ленска проводились предварительные противозаторные мероприятия. Они заключались в создании искусственных прорезей в ледяном покрове, подрыве льда на участках малой ледопротускной способности русла и в местах высокой концентрации напряжений в ледовом покрове.



Рис. 11.1. Многолетние колебания максимального уровня воды на р. Лене у г. Ленска во время ледовых заторов



Рис. 11.2. Затопление Ленска во время наводнения (фото 18 мая 2001 г.)

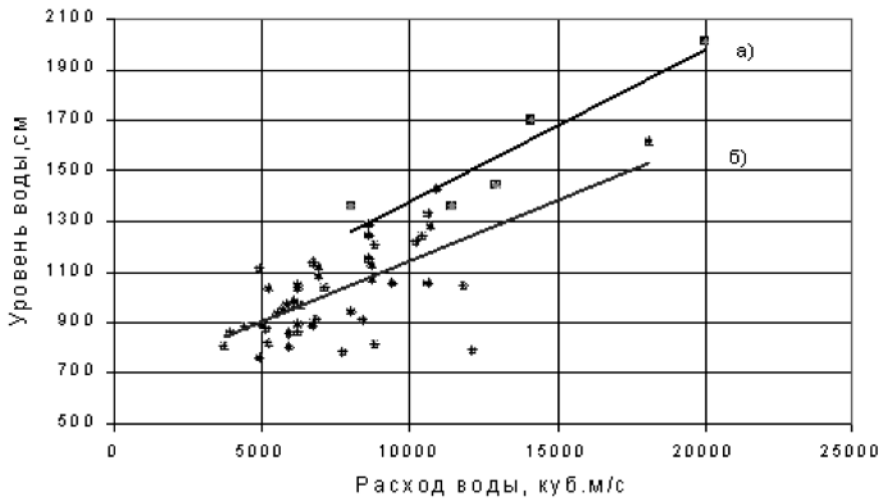


Рис. 11.3. Связь максимальных заторных уровней и расходов воды на р. Лене у г. Ленска: а – в естественных условиях; б – при проведении противозаторных мероприятий, включая бомбометание

В период заторообразования скопления льда разрушались бомбами, сброшенными с самолетов. Перечисленные мероприятия, также как и аналогичные, проводимые в другие годы, не привели к снижению уровня воды и в 2001 г. (рис. 11.3).

В составе НИР, целью которых было усовершенствовать теоретические основы и методику прогноза заторных наводнений на Лене у г. Ленска с учетом противозаторных мероприятий, регулярно проводимых на этой реке, было выполнено гидравлическое моделирование исследуемого участка на физической модели для подробного изучения деталей механизма формирования и динамики ледовых заторов, оценки эффективности противозаторных мероприятий и разработки рекомендаций по их оптимизации.

### 11.2.1. Задачи и методика моделирования

Моделирование ледовых заторов на р. Лене у г. Ленска было предпринято для решения следующих основных задач:

- исследования ледопропускной способности русла и мест образования заторов льда;
- изучения процесса формирования продольного профиля водной поверхности и его характеристик на участке длиной 70 км при разных местоположениях заторов льда относительно г. Ленска, разных объемах ледовых масс, участвующих в заторе, и разных расходах воды;
- определения длительности (динамики) образования заторов льда и формирования призмы подпора воды;
- оценки эффективности противозаторных мероприятий и мер защиты г. Ленска от наводнений.



Рис. 11.4. Общий вид гидравлической модели р. Лены у г. Ленска

Гидравлическая, жесткая модель Лены в районе Ленска была построена в плановом масштабе 1:1000. Вертикальный масштаб модели составлял 1:250. Такое соотношение масштабов было продиктовано желанием охватить участок русла у Ленска, на котором формируются ледовые заторы, максимально используя размеры лабораторной площадки в экспериментальном зале Русловой лаборатории ГГИ.

Общая длина модели составила 80 м, а длина рабочего участка, включая о. Половинный (2680 км от устья), до о. Батамайского (2626–2620 км) составила 68 м.

При строительстве модели были использованы материалы русловой съемки, выполненной для этой цели специалистами МГУ в масштабе 1:10 000.

Схема модельной установки изображена на рис. 11.5.

В пределах русловой части модели было установлено 14 пунктов для измерения уровня воды. Водомерные иглы размещены вдоль модели таким образом, чтобы с учетом морфологии русла подробно отслеживался продольный профиль водной поверхности при формировании заторов.

Поверхностные скорости течения измерялись путем фотографирования светящихся поплавков через вращающийся обтюратор.

Тарировка модели выполнялась по данным о натуральных уклонах водной поверхности, измеренных в ходе выполнения русловой съемки, а также гидрометрических работ при расходе воды 2500 м<sup>3</sup>/с и уровне 153,22 м БС по водпосту Ленска. Кроме того, в хорошем соответствии с натурой оказались заторные уровни у города, что дает основание считать процессы, воспроизводимые на модели, вполне адекватными соответствующим натурным процессам.



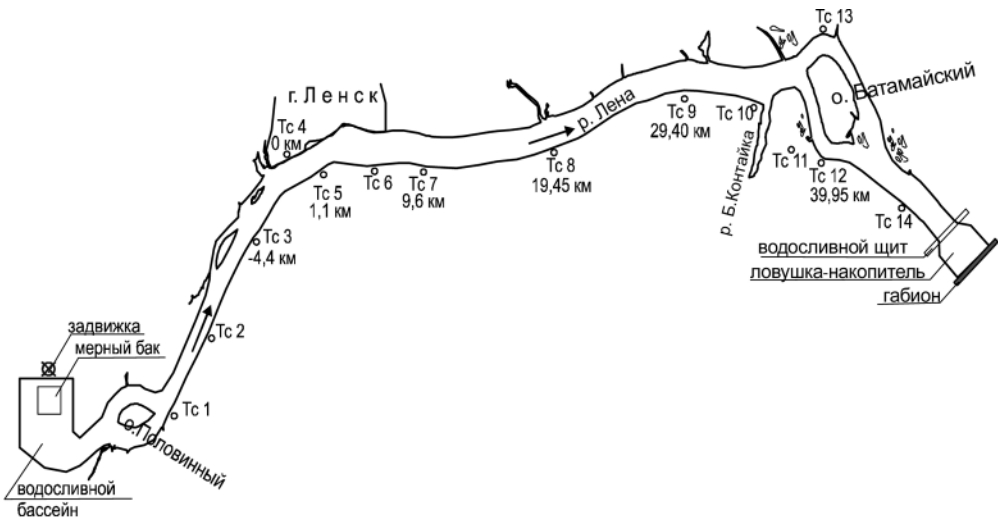


Рис. 11.5. Схема модельной установки

Русловой поток моделировался с выполнением двух условий: равенства натурального и модельного чисел Фруда  $Fr = idem$  (критерий динамического подобия) и обеспечения на модели значений числа Рейнольдса, больших его критического значения (критерий кинематического подобия).

В развернутом виде критерий Фруда может быть представлен следующим соотношением:

$$v_H \sqrt{gH_H} = \frac{v_M}{\sqrt{ghH_M}}, \quad (11.1)$$

откуда следует соотношение для масштаба скоростей течения модельного потока

$$\frac{v_H}{v_M} = \sqrt{\frac{H_H}{H_M}}, \quad (11.2)$$

где  $v$  и  $H$  — скорость течения и глубина потока соответственно в натуре и на модели,  $g$  — ускорение силы тяжести.

Исходя из этих условий и с учетом геометрических (планового и вертикального) масштабов модели, получены следующие масштабные множители для пересчета модельных значений различных характеристик потока и русла в натурные значения:

- для длин и ширин — 1000;
- для высот и глубин — 250;
- для площадей поперечного сечения — 250000;
- для объемов — 250000000;
- для скорости течения — 15,81;
- для времени — 63,25;
- для уклона — 0,25.

Известно, что модели с разными масштабами плана и глубин должны иметь такую шероховатость поверхности, которая позволила бы через возросшее сопротивление движению потока привести модельные скорости течения, глубины, отметки свободной поверхности потока и числа Фруда в соответствие с их натурными значениями. Такая процедура была выполнена в ходе тарировки модели. В качестве шероховатости был использован мелкий и средний гравий.

Основное условие, которое выполнялось при моделировании льда, заключалось в соблюдении соотношения  $\frac{\rho_{\text{л}}}{\rho_{\text{в}}} = idem$ , где  $\rho_{\text{л}}$  — плотность натурального льда,

а  $\rho_{\text{в}}$  — плотность воды. С учетом того, что и в натуре и на модели присутствует натуральная вода, приведенное соотношение означает, что плотность натурального льда и материала — заменителя льда, для модели должны быть одинаковы.

Другие свойства льда (например, прочность, пластичность) по приведенным выше соображениям и с учетом основной задачи, предусматривающей моделирование заторов торошения, в данной работе не моделировались.

В качестве модельного материала — имитатора льда, был использован листовая полиэтилен высокого давления низкой плотности, в среднем  $0,93 \text{ г/см}^3$  (изменяется в диапазоне от  $0,92$  до  $0,95 \text{ г/см}^3$ ), цвет — белый. Такой материал уже неоднократно использовался при моделировании ледовых процессов, и полученные результаты [29] дают основание считать его вполне подходящим имитатором льда. Вариация плотности в указанных пределах не вызывает какого-либо беспокойства, поскольку плотность натурального льда также варьирует в тех же пределах, особенно в условиях заметного потепления в весенний период.

В экспериментах использовались квадратные пластины полиэтилена с длиной стороны 5, 10 и 20 см и толщиной 0,5 и 0,6 см, что соответствует натурным размерам льдин  $50 \times 50$ ,  $100 \times 100$ ,  $200 \times 200$  м и толщине льда 1,25 и 1,5 м.

Размеры льдин в экспериментах с конкретными расходами воды выбирались таким образом, чтобы в целом на модели воспроизводилась картина, соответствующая натурному ледоходу. Для диапазона расходов воды от 3000 до  $8170 \text{ м}^3/\text{с}$  основными в ледоходе были льдины размером  $5 \times 5$  см (70 % от общего количества льдин), льдины размером  $10 \times 10$  см составляли 30 %.

В экспериментах с расходами воды 12000 и 22900, было принято следующее соотношение льдин разного размера, участвующих в ледоходе:  $5 \times 5$  см — 60 %,  $10 \times 10$  см — 30 %,  $20 \times 20$  см — 10 %.

Принятое распределение размеров льдин основано на анализе — просмотре видеofilма о ледоходе на Лене на участке от Якутска до острова Батамайский.

Аналогичная методика назначения на модели размеров льдин использовалась ранее в работе [23].

### 11.2.2. Результаты экспериментов

В соответствии с задачами, перечисленными выше, на модели было выполнено 80 экспериментов, разделенных на четыре серии.

В первой серии экспериментов исследовались ледопрopusкная способность русла и места вероятного образования заторов льда. Прежде чем начать экспе-

рименты со льдом, были выполнены опыты в русле с открытой водной поверхностью без льда для получения значений уклонов и скоростной структуры потока при расходах воды, соответствующих их натурным значениям 3000, 8170, 22900 м<sup>3</sup>/с, при которых наблюдаются заторы льда на Лене у г. Ленска. Кроме того, для оценки гидравлических условий взаимодействия потока с защитной дамбой Ленска были проведены опыты при расходе воды расчетной обеспеченности 0,1 %, равном 33800 м<sup>3</sup>/с.

Выполненные эксперименты позволили количественно описать скоростные поля на всем протяжении русла от о. Половинный до ухвостья о. Батамайский при расходах воды различной обеспеченности.

Во второй части этой серии опытов изучалась ледопропускная способность русла и места образования заторов льда при расходах воды 3000, 8170, 12 400 и 22 900 м<sup>3</sup>/с.

Методика экспериментов заключалась в следующем. После достижения требуемого в данном опыте расхода воды на чистую воду на участок русла выше Ленска подавалась ледовая масса с укладкой в один слой. После того как требуемый объем льда выкладывался на воду, поле «битого льда» освобождалось от удерживающего устройства и начиналось свободное движение его по чистой воде вниз по течению. Весь процесс движения ледяного поля и последующего формирования заторов фиксировался фотоаппаратом и видеокамерой, благодаря чему была возможность многократных просмотров и анализа исследуемых процессов.

Экспериментами этой серии обнаружено следующее. На начальной стадии движение однослойного поля битого льда не испытывает заметных осложнений на участке относительно прямолинейного русла (до приверха о. Батамайский). Первые заторные ситуации возникают у приверха о. Батамайский, на его мелководье. Однако эти ситуации в ряде случаев оказываются неустойчивыми, и начинающийся затор вдруг прорывается потоком с распространением ледового скопления по обоим рукавам или по какому-то одному из них.

В рукавах у о. Батамайский из-за резкой изменчивости глубин и скоростей течения по ширине русла и в продольном направлении, а также из-за резких сужений и изгибов русла движущиеся поля битого льда вновь образуют заторы.

Описанный процесс и некоторые возникающие в его ходе ситуации показаны на рис. 11.6, 11.7.

Из рис. 11.6 (а) следует, что при расходе воды 22 900 м<sup>3</sup>/с сформировавшийся затор у приверха острова уже исключил движение льда по правому рукаву. В то же время ледоход по левому рукаву продолжается, хотя уже наметилась вторая перемычка в основном русле выше приверха острова и первой перемычки.

На рис. 11.7 (а) видно, что эта вторая перемычка в основном русле окончательно сформировалась и уже оба рукава у Батамайского освобождаются ото льда. Время между ситуациями, показанными на рис. 11.6 (а) и на рис. 11.7 (а), в пересчете на натуру составляет 63,5 минуты, за это время левый рукав благодаря затору очистился ото льда на участке длиной в 3 км (сетка на модели километровая).

На рис. 11.6 (б) видно, что затор в узкости правого рукава сформировался при расходе воды 12 400 м<sup>3</sup>/с. Его образованию, по-видимому, содействовал и резкий поворот русла на этом участке.

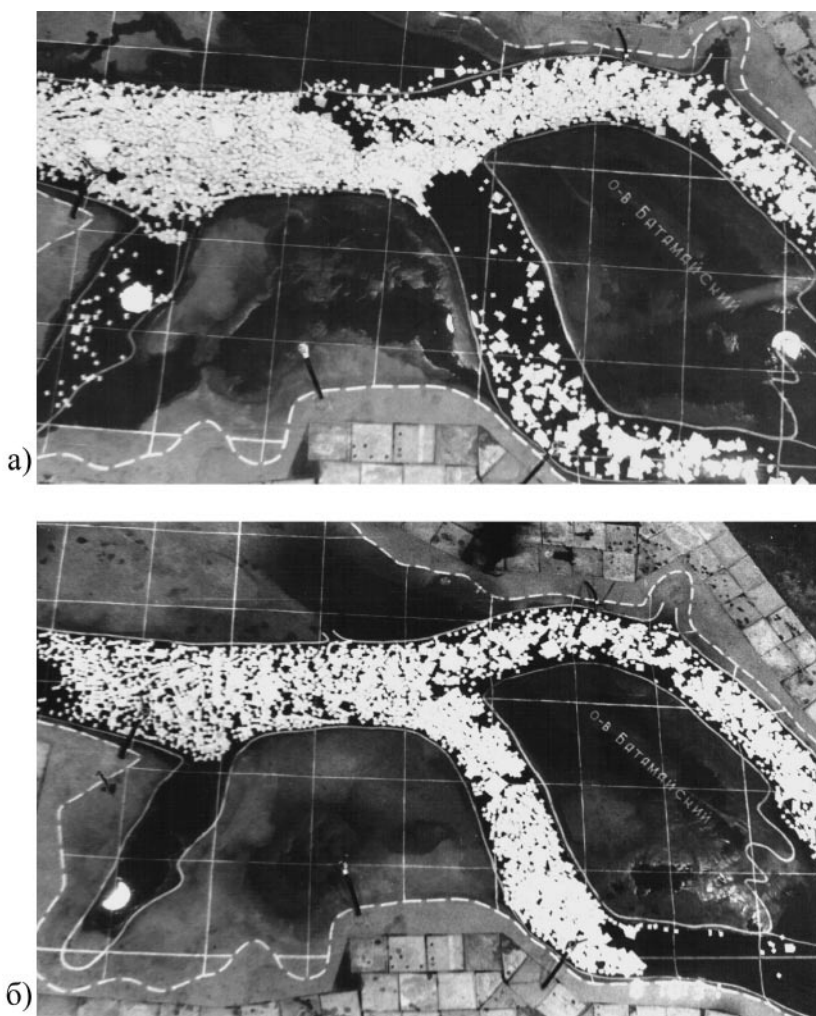


Рис. 11.6. Затор у о. Батамайский:

- а – затор, сформировавшийся у приверха о. Батамайский, перекрыта правая протока.  $Q=22\ 900\ \text{м}^3/\text{с}$ ;  
 б – затор, сформировавшийся в правой протоке.  $Q=12\ 400\ \text{м}^3/\text{с}$

Рассмотрение рис. 11.6 и 11.7 дает основание считать, что в условиях однослойного поля битого льда в формировании заторов большую роль играют крупные льдины с поперечным размером в 150–200 м.

Исследования, проведенные на Лене С.С. Коржувым [153], позволили выявить типичные места образования заторов льда, названные «морфологическими ловушками» (в отличие от «режимных ловушек», связанных не с морфологическими особенностями строения долины и русла, а с характеристиками водного режима).

Результаты рассмотренной серии экспериментов приводят к выводу о том, что правильнее, по-видимому, не разъединять режимные и морфологические механизмы образования заторов, а рассматривать их роль в совместном воздей-

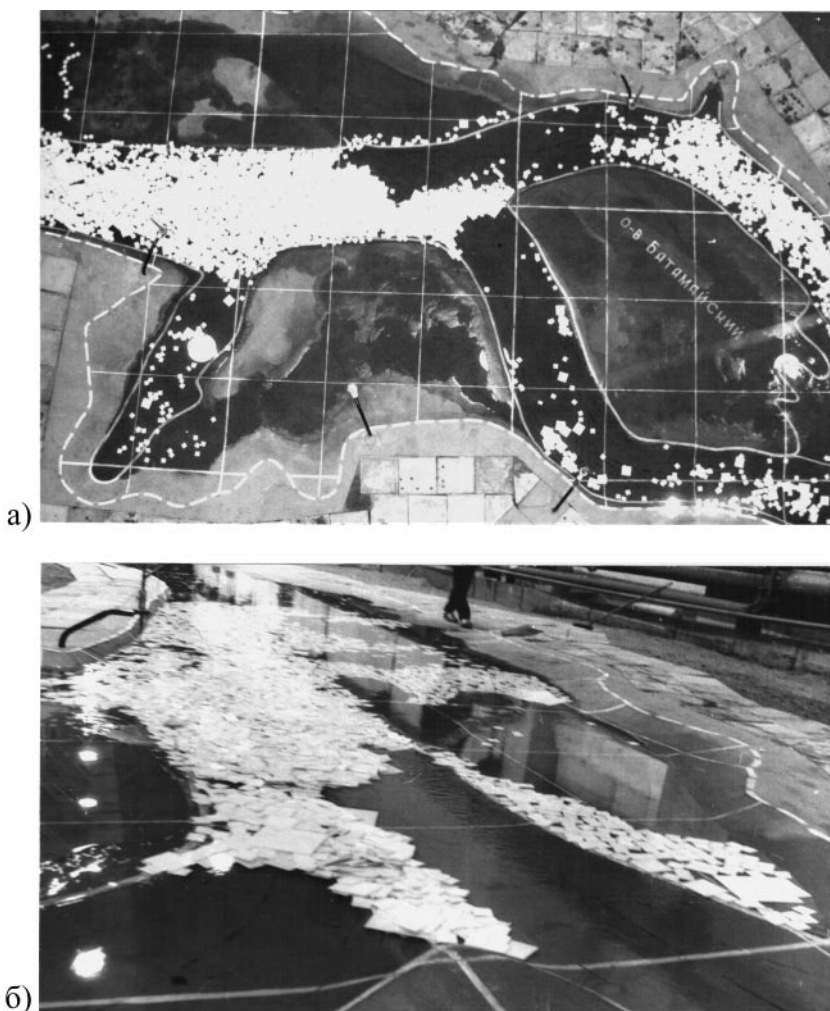


Рис. 11.7. Затор у приверха о. Батамайский.  $Q=22\ 900\ \text{м}^3/\text{с}$ :  
а – вид сверху; б – вид против течения

ствии на характер движения поля битого льда по чистой воде, поскольку есть участки русла, на которых ни при каких характеристиках потока заторы не образуются, и есть сравнительно малые расходы воды, при которых ни у каких морфологических элементов русла заторы тоже не образуются.

Второй вывод по этой серии экспериментов заключается в том, что присвоение названия «типичное» какому-либо месту образования затора не дает оснований рассчитывать на ежегодное образование затора в этом месте. Более того, как видно на приведенных рисунках, в ходе одного половодья заторы образуются в разных местах и даже (при образовании многослойного скопления льда в ходе уплотнения ледяного поля) на относительно прямолинейных участках русла. Однако здесь речь идет о заторах, образующихся из однослойных полей битого

льда, перемещающихся вниз по течению по чистой воде, не встречая никакого сплошного препятствия.

Значительно более сложный процесс заторообразования с существенно большими подъемами подпорных уровней воды совершается, когда мощное ледяное поле отчасти уже всторошенного льда приходит при движении в контакт с кромкой ледостава. Такие ситуации были рассмотрены во второй серии экспериментов.

Во второй и третьей сериях экспериментов исследовались заторы торошения, вызывающие наибольшие подъемы уровня воды в районе Ленска. В этих экспериментах изучались различные комбинации изменения расходов воды, при которых формируются заторы льда, объемов битого льда, участвующего в формировании затора, и местонахождения кромки ледостава, препятствующей дальнейшему продвижению вниз по течению скоплений битого льда.

В экспериментах воспроизводилось 20 ситуаций с разным сочетанием перечисленных выше факторов (табл. 11.1).

Время проведения эксперимента предварительно оценивалось по данным наблюдений за реальными заторами на рассматриваемом участке Лены.

За весь период наблюдений у Ленска продолжительность заторных ситуаций не превышала 4 суток. Ориентируясь в целом на эту цифру, каждый эксперимент продолжался до тех пор, пока не достигалось предельное положение подпорного уровня воды и он переставал возрастать дальше. Полученное таким образом время проведения эксперимента оказалось близким к натурным данным, что является еще одним показателем хорошего соответствия модельных и натуральных процессов.

Каждый эксперимент, обозначенный в табл. 11.1, повторялся трижды. Таким образом, в этой серии в целом было выполнено 60 экспериментов.

В методическом плане эксперименты выполнялись следующим образом. На модели устанавливался требуемый гидравлический режим (расход воды и отметки свободной поверхности потока). Затем в районе о. Батамайский устанавливался ледостав (либо у приверха острова, либо у его ухвостья, либо в 50 км ниже водомерного поста Ленска). Ледостав имитировался либо полиэтиленовым листом, либо фанерой соответствующей толщины. Береговые грани листов предварительно обрабатывались в соответствии с контурами приурезовой части берегов.

Далее на воду подавался лед в предусмотренном для каждого конкретного эксперимента количестве и процентном составе по размерам льдин. Лед наносился на поверхность воды плотной укладкой, сводящей к минимуму просветы между отдельными льдинами.

Когда лидирующая зона движущегося по течению поля битого льда достигала кромки ледостава, в зоне их контакта возникало активное торошение льда и начиналось формирование затора.

С этого момента с дискретностью от 6 часов до 24 часов натуре (в зависимости от интенсивности подъема уровня) снимались отсчеты уровня воды по всем 14 водомерным иглам.

Таблица 11.1. Основные характеристики экспериментов с заторами торошения

№ п/п	Дата выполнения	Расход воды		Средняя глубина, H см	Средняя скорость, v см/с	Уклон водной поверхности	Объем льда, км <sup>3</sup>	Продолжительность опыта, час	Ненарушенная кромка льда, км от в/п г. Ленска
		Натура, м <sup>3</sup> /с	Модель, л/с						
1	10.09	3000	0,76	1,64	5,44	0,000080	0,05	1,5	
2	08.09	8170	2,07	2,42	8,73	0,000080	0,05	1,2	38
3	08.09						0,15	1,5	38
4	09.09						0,10	1,5	46
5	08.09						0,10	1,5	50
6	05.09						0,20	1,5	46
7	05.09						0,20	1,5	50
8	21.08						12 400	3,14	3,11
9	22.08	0,10	1,2	38					
10	22.08	0,10	1,2	46					
11	22.08	0,10	2,0	50					
12	27.08	0,20	2,0	38					
13	01.09	0,20	1,5	46					
14	01.09	0,20	1,5	50					
15	25.08	22 900	5,79	4,28	12,97	0,000070			
16	26.08						0,10	2	46
17	26.08						0,10	2	50
18	02.09						0,20	1,2	38
19	03.09						0,20	1,5	46
20	04.09						0,20	1,5	50

Вместе с тем осуществлялось тщательное визуальное, а также посредством фотоаппарата и видеокамеры наблюдение за процессом формирования затора в пределах всей длины поля битого льда.

Эти два методических приема в совокупности позволили довольно детально уяснить механизм формирования затора в качественной форме и, вместе с тем, получить детальную количественную оценку о величинах подпорных уровней в разных исходных ситуациях, об интенсивности их роста, поведения продольных профилей водной поверхности, включая предельные их положения в окончательно сформировавшихся заторах.

Замечено, что начавшееся у кромки ледостава торошение, продолжая развиваться здесь, вместе с тем довольно быстро распространяется вверх по течению. Это является следствием постоянно происходящего уплотнения всего ледяного поля, которое, передвигаясь прерывисто отдельными участками, перестраивается из однослойного состояния в многослойное и всторошенное состояние.



Рис. 11.8. Образование затора торошения у кромки ледяного покрова (фото после спуска воды с модели)

На рис. 11.8 показано состояние ледяного поля у кромки ледостава (вид против течения). На переднем плане видна сильная торосистость ледового скопления и обнаруживается его многослойность. С удалением от кромки ледостава против течения торосистость поля уменьшается, но остается все же существенной.

На рис. 11.9 видна вся толщина многослойного скопления льда вблизи очага затора, обнажившаяся после аккуратного (чтобы не нарушить сложившуюся структуру) опорожнения модели. На переднем плане видно, что многослойность скопления достигает здесь 7 слоев. При толщине льда 1,5 м общая толщина скопления превышает 10 м. А это означает, что по крайней мере в береговых зонах и на отмелях разного происхождения ледяное скопление перекрывает речной поток от поверхности до дна.



Рис. 11.9. Многослойное скопление льдин, оставшееся на месте затора



Такое состояние ледового скопления способствует образованию дополнительных заторов преимущественно «арочного» типа с упором самозаклинивающейся ледовой массы в берега и в дно реки.

Внутренние заторы возникают в самых различных местах рассматриваемого участка Лены, но преимущественно по течению ниже Ленска (рис. 11.10 (б)).

Время существования таких заторов различно, но как правило невелико. Например, сформировавшиеся у приверха о. Батамайский и в верхней части его правого рукава заторы через 12 часов полностью закрылись. Но за это же время в средней части правого рукава образовался новый внутренний затор.

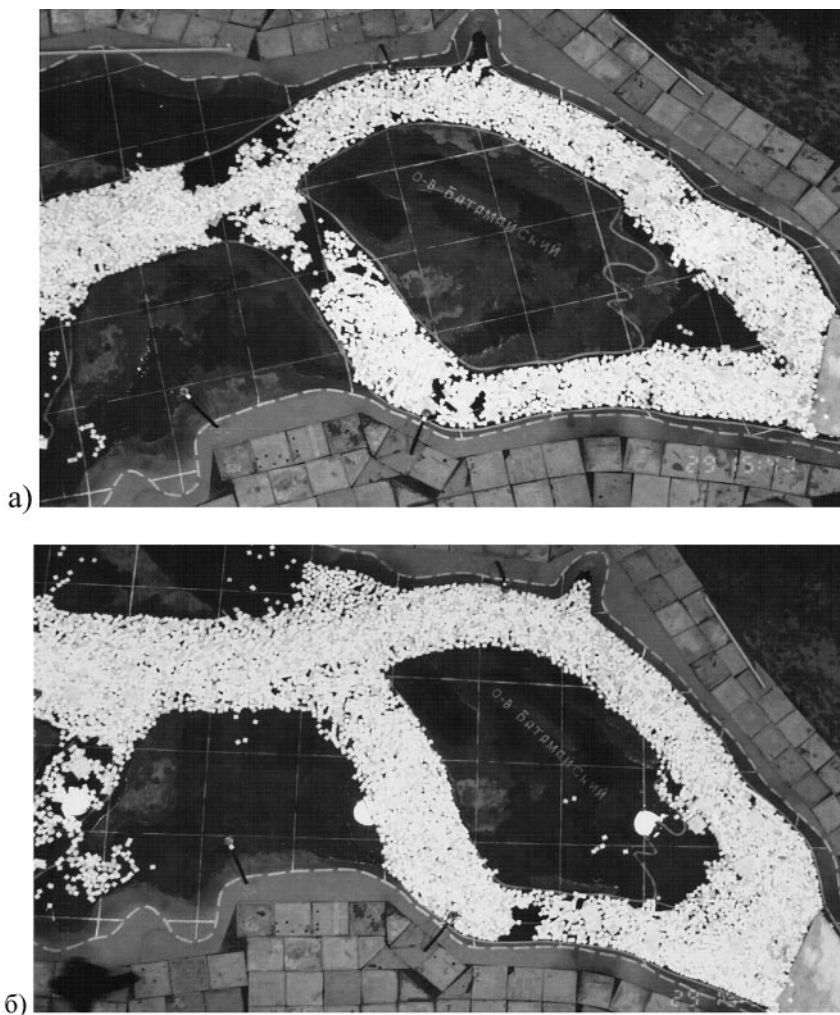


Рис. 11.10. Формирование затора при ненарушенной кромке льда в устье о. Батамайский.  
 $Q=22\ 900\ \text{м}^3/\text{с}$ , объем льда  $0,1\ \text{км}^3$ : а – временный затор перед приверхом острова;  
б – вид через 12 минут (около 12 часов в натуре)

Внутренние заторы образуются при разных положениях кромки ледостава (т. е. очага основного затора), при разных расходах воды и объемах ледовой массы, т. е. в довольно широком диапазоне изменения гидрометеорологических условий. Вместе с тем, местоположение этих заторов также варьирует в широких пределах. В связи с этим представляется, что предсказание места и времени образования таких заторов крайне затруднительно.

Наиболее мощные заторы льда с большими подъемами заторного уровня воды, вызывающими значительные затопления левобережных и правобережных пойменных территорий, образуются либо при наибольшем объеме поступающего к очагу затора ледового поля (рис. 11.11 (а)), либо при наибольшем заторном расходе воды (рис. 11.11 (б)), либо при сочетании наибольшего заторного расхода воды с наибольшим объемом льда (рис. 11.12).



а)



б)

Рис. 11.11. Обстановка на реке у Ленска: а – затор при  $Q=8170 \text{ м}^3/\text{с}$ , объеме льда  $0,2 \text{ км}^3$ ;  
б – затор при  $Q=22\,900 \text{ м}^3/\text{с}$ , объеме льда  $0,1 \text{ км}^3$

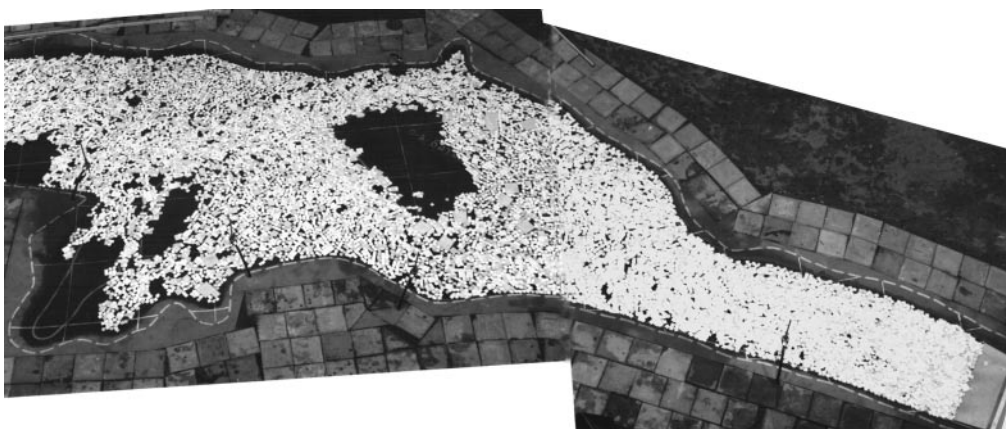


Рис. 11.12. Общий вид сформировавшегося затора с очагом на 50 км ниже в/п. Ленска ( $Q=22900 \text{ м}^3/\text{с}$ , объем льда  $0,2 \text{ км}^3$ )

При этом местоположение очага затора может быть разным. Однако наибольший подъем уровня воды у Ленска до отметки 174,2 БС вызвал (по данным экспериментов) затор, сформированный расходом воды  $29\,900 \text{ м}^3/\text{с}$  при объеме льда  $0,2 \text{ км}^3$  с местоположением кромки ледостава у приверха о. Батамайский.

Как уже отмечалось, кроме качественной характеристики механизма формирования заторов торошения в каждом эксперименте измерялись уровни воды в 14 пунктах, размещенных в пределах всей длины модели. Эти измерения позволили сделать количественную оценку формирования профиля водной поверхности как по длине реки, так и во времени при самых разных сочетаниях определяющих факторов.

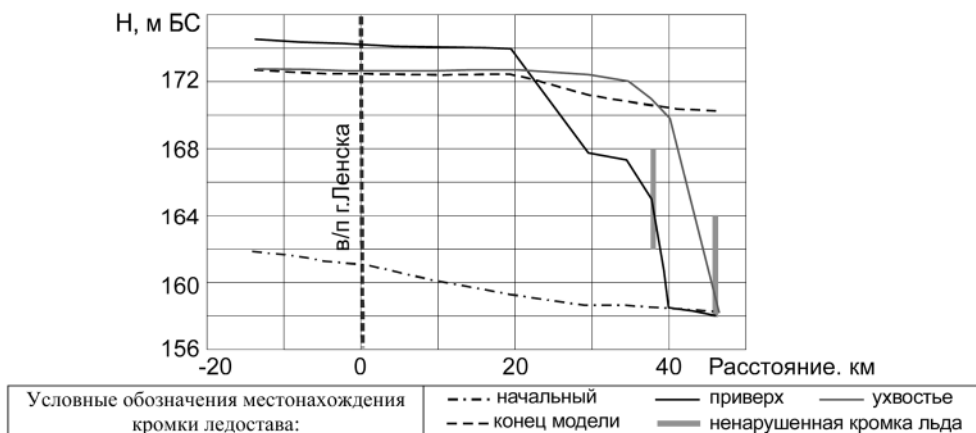


Рис. 11.13. Продольные профили водной поверхности р. Лены при заторах, сформировавшихся при разных положениях кромки.  $Q=22\,900 \text{ м}^3/\text{с}$  (объем льда  $0,2 \text{ км}^3$ )

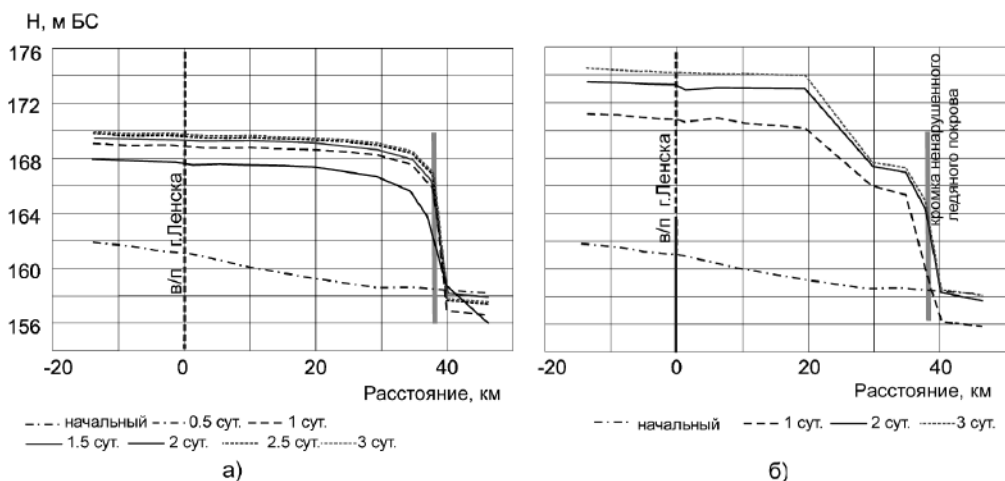


Рис. 11.14. Продольные профили водной поверхности р. Лены на разных стадиях формирования затора.  $Q=22\,900\text{ м}^3/\text{с}$ . Кромка льда-приверх о. Батамайский (38 км от Ленска): а – объем  $0,1\text{ км}^3$ ; б – объем  $0,2\text{ км}^3$

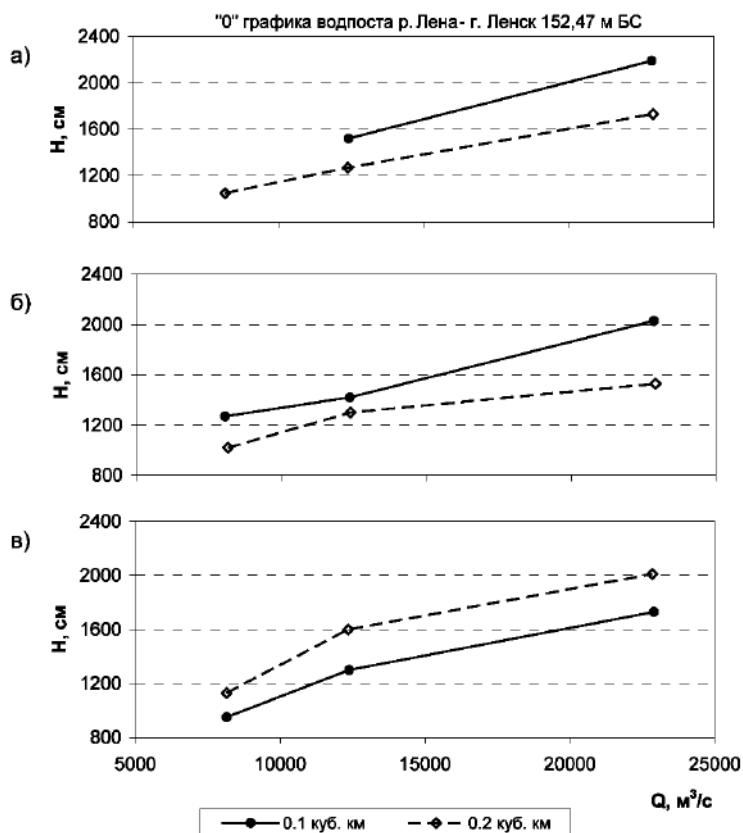


Рис. 11.15. Кривые зависимости  $Q=f(H)$  в Ленске при положении кромки ледостава: а – у приверха о. Батамайский; б – ухвостье о. Батамайский; в – в 50 км ниже в/п г. Ленска

Оценка выполнена в виде графиков предельного (наивысшего) состояния продольного профиля водной поверхности. Из рассмотрения этих рисунков, в частности, следует, что затопление города переливом воды через защитную дамбу (отметка гребня которой составляет 170,07 м БС) может произойти только при сочетании заторного расхода воды 22 900 м<sup>3</sup>/с с объемом льда 0,2 км<sup>3</sup> независимо от местоположения кромки ледостава (рис. 11.13).

Наибольший катастрофический подъем заторного уровня воды у Ленска в опыте достиг отметки 174,2 м БС, т. е. вода здесь поднялась более чем на 13 м над уровнем открытого и освобожденного от льда русла при этом расходе воды, и глубина ее на гребне защитной дамбы составила более 4 м.

Эксперименты позволяют оценить интенсивность изменения продольных профилей водной поверхности во времени в разных сочетаниях факторов, определяющих образование затора (рис. 11.14). Из рассмотрения этого материала следует, что наибольший прирост уровня воды наблюдается в первые сутки формирования затора и составляет в разных ситуациях от 2 до 5 м. В следующие дни интенсивность нарастания уровня резко уменьшается и составляет преимущественно лишь доли метра.

По данным о заторных уровнях воды и соответствующих им расходах воды построены зависимости  $Q = f(H)$  для трех положений кромки ледостава и двух вариантов объема льда (рис. 11.15). На рисунках видно, что увеличение объема льда в 2 раза (до 0,2 км<sup>3</sup>) приводит к росту заторных уровней в диапазоне расходов воды от 8000 до 23 000 м<sup>3</sup>/с более чем на 3 м, а в верхней части кривой — до 5 м.

### **11.2.3. Оценка эффективности противозаторных мероприятий и мер защиты г. Ленска от наводнений**

На гидравлической модели Лены исследовались следующие виды противозаторных мероприятий:

- регулирование расхода воды на участке разветвления русла у о. Батамайский;
- взрывные работы на участках возможного образования заторов;
- уменьшение прочности ледостава путем предварительной нарезки его на элементы разной формы;
- создание искусственного затора на участке реки выше г. Ленска по течению.

Из вышеизложенного следует, что наиболее затороопасным местом на данном участке реки является двухрукавное русло у о. Батамайский. Вместе с тем, здесь довольно близко от поверхности дна залегают скальные породы: на островах и в береговой зоне, где они выходят на дневную поверхность. В связи с этим капитальные дноуглубительные и выправительные работы с целью уменьшения кривизны русла и расширения его на участках сужений, учитывая размеры реки и значительную длину участка выправления, представляются дорогостоящим мероприятием, в связи с чем оценка эффективности регулирования реки на участке у о. Батамайский в опытах свелась к регулированию расхода воды путем перекрытия русла левого рукава.

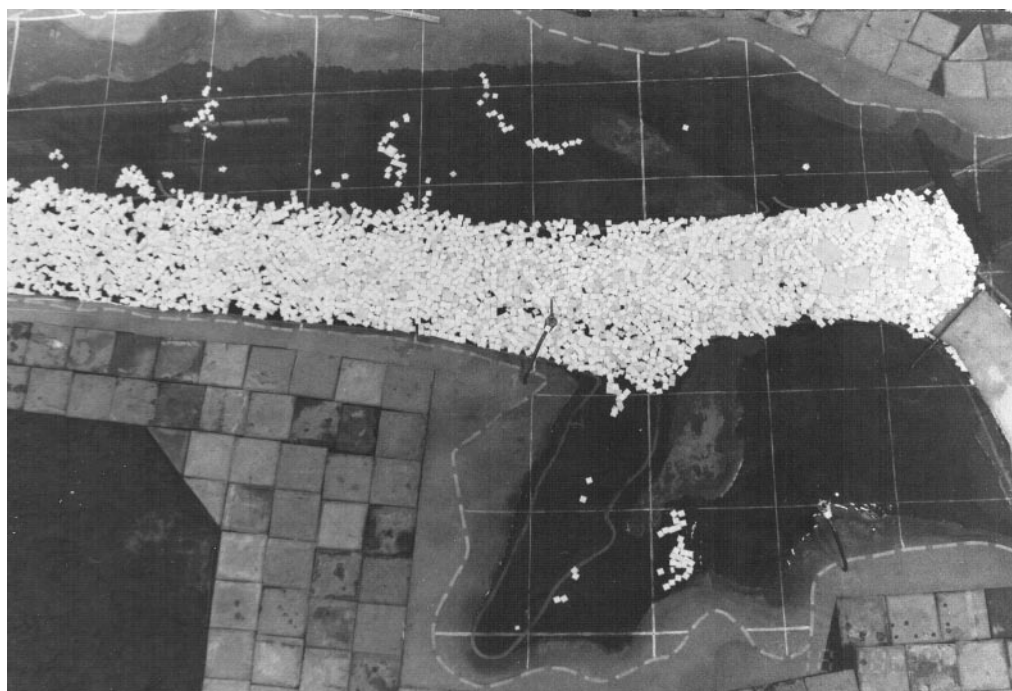


Рис. 11.16. Исходная ситуация у приверха о. Батамайский при регулировании расхода воды перекрытием левого рукава

Исходная ситуация в этом эксперименте показана на рис. 11.16. Левая протока перекрыта, скопление льда удерживается ледоставом в правом рукаве.

После освобождения правого рукава от ледостава скопление льда приходит в движение и распространяется вниз по течению. Однако через сравнительно небольшое время в правом рукаве образуется затор путем самозаклинивания льдин на участке поворота русла влево, а также у приверха о. Батамайский. Таким образом, почти удвоенная водность рукава, увеличение глубин и скоростей течения в нем все же не привели к положительному результату. Это значит, что, по-видимому, морфологический фактор (извилистость русла, наличие узкостей и мелей) оказывается более сильным по воздействию на движение скопления льда, чем водность, и поэтому именно он должен быть задействован, если имеются приемлемые условия для его реализации.

Разрушение заторного скопления путем организации взрывных работ практикуется на реках Сибири в течение многих лет. Как правило, этот прием применяется в исключительных случаях, когда есть угроза затопления населенных пунктов.

На модели Лены были выполнены имитационные опыты, в которых воспроизводились поверхностные и подводные «взрывы» в голове затора. Здесь нужно сделать два замечания. Во-первых, воздействие взрывом на затор, по-видимому, целесообразно, когда ниже его головы по течению река свободна от ледостава или когда имеющийся ледостав сильно ослаблен по прочности. Вто-

рое замечание заключается в том, что «взрывы» на модели воспроизводились чисто механическим путем. Были изготовлены штампы двух размеров: со стороны квадрата 5 см, что соответствует в натуре площади скопления льда 50×50 м; со стороны квадрата 10 см, что соответствует в натуре площади 100×100 м. Предполагалось, что в пределах таких площадей взрыв соответствующей мощности выведет ледовую массу из состояния покоя, частично разрушив ее на более мелкие элементы. Отмеченное означает, что в пределах площадей 50×50 м или 100×100 м в ледяном скоплении образовывалась брешь.

Такие бреши воспроизводились путем резкого надавливания сверху на штампы (в случаях поверхностных взрывов) или путем резкого выдергивания их вертикально вверх (в случаях подводных взрывов).

«Взрывы» исполнялись в поперечных сечениях средней части головы затора и по продольному створу головы затора.

Поверхностные взрывы не дали практически никакого положительного результата, поскольку скопление льда в голове затора заполняет русло до дна и надавливание на него штампом не выводит скопление из устойчивого состояния.

Подводные взрывы организовывались путем установки штампов на дно и также последующим одновременным выдергиванием их вверх. Точки установки штампов на дно по поперечному и продольному створам показаны на рис. 11.17. При выполнении подводного «взрыва» значительная часть льдин, находящихся на штампе и в частичном контакте с ним, выбрасывалась из общей массы скопления с образованием в месте «взрыва» участков с чистой водой. Однако устойчивость скопления льда в целом все же не нарушалась, и оно продолжало оставаться неподвижным.

Вместе с тем взрывы по продольному створу оказали заметное влияние на возрастание расхода фильтрации и, соответственно, на снижение заторного уровня воды. После выполнения взрыва по продольному створу в ледовом скоплении образовался как бы дренажный тракт, интенсивно отводящий воду из затора.

Однако здесь нельзя не заметить, что применение взрывов льда для борьбы с заторами влечет за собой негативные последствия в части влияния на окружающую среду.

В связи с отмеченным, более приемлемым способом борьбы с затором считается предварительная разрезка ледяного покрова на участке ледостава на элементы разной формы и разного размера. Большая серия предварительных экспериментов с оценкой различных вариантов разрезки льда была выполнена в гидравлических лотках. Один из вариантов, испытанных в гидравлических лотках, был повторен на пространственной гидравлической модели. Суть этого варианта заключается в разрезке ледяного покрова на элементы ромбической и треугольной формы с образованием в прибрежных зонах русла продольных прорезей, между которыми разрезанное ледяное поле могло бы выталкиваться речным потоком, как по направляющим, вниз по течению. В правом рукаве о. Батамайский, более криволинейном на начальном участке, продольные прорези имели тоже криволинейную форму. В левом рукаве направляющие были прямыми и параллельными между собой. Собранные из



а)



б)

Рис. 11.17. Разрушение заторов льда методом подводного взрыва: а – местоположение подводных взрывов в голове затора; б – местоположение подводных взрывов в продольном направлении

таких элементов ледяные поля на модели удерживались на плаву с помощью упорных реек, установленных с нижней их стороны. Далее на воду подавалось скопление битого льда и течением приводилось в контакт с верхней кромкой разрезанного поля.

После освобождения полей от удерживающих реек сразу же начиналось выталкивание ромбических и треугольных элементов из направляющих. Постепенно утрачивая первоначальный порядок, разрезанные элементы перемещались вниз по течению, а вслед за ними и скопление битого льда.

На крутом повороте правого рукава влево (вершина излучины) в опыте произошло самозаклинивание ромбических и треугольных элементов и как след-



ствии — началась концентрация битого льда, через небольшое время правый рукав оказался перекрытым. В левом рукаве это же самое случилось с правобережной направляющей, но несколько раньше.

Таким образом, даже наиболее эффективный в лотковых экспериментах вариант нарезки ледового поля в условиях пространственного русла на модели не привел к желаемому результату.

Выход из этого положения представляется в уменьшении размеров разрезанных элементов льда примерно вдвое. Но как следствие, также вдвое, а может быть и втрое, возрастут издержки, связанные с осуществлением этого мероприятия. В рассмотренном варианте общая протяженность нарезки составляет около 10 км в каждом рукаве. В варианте с уменьшенными вдвое элементами общая протяженность нарезки в обоих рукавах составит около 40 км. При этом нет полной уверенности в том, что затор будет формироваться именно на этом участке реки.

Существует мнение, что надежным способом защиты от потенциального затора может быть организация искусственного затора на участке реки выше по течению защищаемого объекта [270]. В связи с этим на гидравлической модели Лены была устроена легкосъёмная перемычка — дамба в устье о. Половинный (рис. 11.5). Дамба имитирует намороженную на ледостав плотину, перед которой и должно сформироваться скопление битого льда, т. е. затор. Предполагается, что после взрыва намороженной дамбы распространяющаяся вниз по течению волна прорыва (либо по чистой воде, либо по полю битого льда) увлечет за собой сформировавшееся скопление льда, которое должно без негативных последствий миновать г. Ленск и при наличии битого льда на участке ниже о. Половинный способствовать его вовлечению в общее движение.

В силу морфологических особенностей русла и поймы в районе о. Половинный поднять уровень воды удалось до отметки 167,0 м БС. Далее эксперимент повторялся многократно: с внезапным спуском чистой воды на чистую воду, воды и льда на чистую воду; чистой воды на поле битого льда и воды с битым льдом на поле битого льда.

Результаты проведенных опытов убеждают в перспективности этого способа защиты интересующих объектов от затопления. Волна искусственного прорыва после ликвидации дамбы очень быстро выполаживается, поэтому при первоначальной отметке уровня 167,0 м БС в районе Ленска ее гребень имел отметку при расходе воды 22 900 м<sup>3</sup>/с только 165,0 м БС, что на 2 м ниже гребня ограждающей город дамбы.

Основные результаты исследований, выполненных на пространственной гидравлической модели р. Лены у г. Ленска, сводятся к следующему.

- Применение гидравлической модели в настоящем исследовании позволило достаточно детально наблюдать явление образования и формирования заторов льда одновременно на большом участке реки и в многовариантном сочетании определяющих факторов.
- Эксперименты с однослойным ледоходом в условиях чистой воды на нижележащих участках реки показали, с одной стороны, большое влияние морфологии и морфометрии русла на его ледопропускную способность

и заторообразование, а с другой стороны, значительный вес случайной составляющей в образовании затора в том или ином месте в целом затороопасного участка реки.

- Эксперименты с заторами торошения, образующимися у ненарушенной кромки ледостава, позволили получить не только детальные количественные оценки профилей водной поверхности и интенсивности их формирования при разном сочетании заторообразующих факторов (что важно для составления краткосрочных прогнозов заторных уровней воды), но и установить внутреннюю структуру заторных скоплений льда (ее многослойность, характер напластований), механизм формирования внутренних заторов и причины их возникновения.
- Экспериментальная оценка эффективности противозаторных мероприятий превентивного и оперативного характера выявила, что наиболее действенным методом борьбы с заторными наводнениями в г. Ленске является устройство искусственного затора с очагом в районе о. Половинный. Однако и в этом случае положительный результат наиболее вероятен в условиях свободного ото льда (или с существенно ослабленным ледоставом) русла на нижележащем участке реки.
- В связи с отмеченным представляется целесообразным ориентироваться не на какой-то конкретный вид «самого эффективного» противозаторного мероприятия, а на некоторый их комплекс. В конкретном случае р. Лены у г. Ленска такой комплекс должен включать устройство искусственного затора выше по течению Ленска, устранение или значительное ослабление ледостава на участке от о. Половинный до о. Батамайский и улучшение условий ледохода в районе о. Батамайский (возможно, путем перекрытия правого рукава, расчистки или некоторого выправления в плане левого рукава).

### **11.3. Исследование ледовых заторов на р. Лене у с. Табага на пространственной гидравлической модели**

Гидравлическое моделирование ледовых заторов на Лене у с. Табага было выполнено в Русловой лаборатории ГГИ в 2006–2007 гг. в составе двух НИР: «Гидрологическое обоснование оптимальной схемы мостового перехода через реку Лену в районе Табагинского мыса на строящейся ж/д линии Беркакит — Томот — Якутск» по договору с ООО НПО «Мостовик» и «Экспериментальная оценка проектных решений мостового перехода через р. Лену на новой железнодорожной линии Беркакит — Томот — Якутск с целью установления допустимых величин пролетов моста по условиям пропуска весеннего ледохода» по договору с институтом «Трансмост» ОАО «Проекттрансстрой».

Проектируемый мостовой переход расположен в 23 км выше Якутска. Основная цель модельных исследований состояла в экспериментальной оценке ледопропускной способности проектируемых мостовых переходов разной

конструкции для установления оптимального варианта технического решения мостового перехода, обеспечивающего безопасное для моста и для окружающей среды прохождение через него весеннего половодья и ледохода.

Проектировщиками было разработано два основных альтернативных варианта проекта: 20-пролетного моста с длиной пролетов 154 м и вантового моста с тремя главными пролетами длиной по 600 м, по схеме:  $220+280+3\times 600+280+220$  м.

Гидрологические наблюдения у с. Табага, расположенного в 1,2 км выше створа проектируемого моста, ведутся с 1937 г. (рис. 11.18). Этими наблюдениями установлено, что р. Лена на исследуемом участке характеризуется сложным водным и ледовым режимом: большими расходами в период весеннего половодья, весенним ледоходом и образованием мощных заторов льда. Повторяемость заторов в естественных условиях у Табаги составляет 82 %. Образованию ледовых заторов благоприятствует большая толщина льда, достигающая 2,1 м и ограничение ледопропускной способности на участке с. Покровское – пос. Кангалассы (1725–1600 км по судоходной карте), связанное с наличием здесь ряда больших островов и уменьшением уклона реки в 2 раза (рис. 11.18). По данным наблюдений установлено, что на Лене от с. Табага (1675 км) до пос. Кангалассы (1600 км), на участке длиной 75 км насчитывается 7 очагов заторообразования, на которых происходит задержка вскрытия реки и образование цепочки скопленных льдин толщиной 5,0 м, которые, уменьшая живое сечение реки, формируют огромную подпорную призму выше по течению.

Программа модельных исследований включала следующие задачи:

- Исследовать на гидравлической пространственной модели гидравлические характеристики и структуру речного потока в естественных и проектных условиях.
- Изучить условия прохождения через мостовой переход в разных его вариантах ледяных полей с разными размерами отдельных льдин.
- Установить механизм образования заторов и характер их последующего развития при разных расходах воды и объемах ледовой массы в естественных и проектных условиях.
- Оценить влияние морфологических элементов русла и поймы в районе мостового перехода на ледоход и условия образования заторов.
- Определить величины подпорных уровней воды при разных местоположениях скопленных льда относительно моста.
- Оценить эффективность устройства разрыва в дорожной дамбе на правобережной пойме (действующая Хаптагайская протока).
- Определить скорости течения в подмостовом сечении при разных вариантах мостового перехода для оценки возможных местных размывов у мостовых опор.
- Определить скорости течения потока на участке перехода через реку газопровода «Хатассы — Павловск» в 8 км ниже мостового перехода для оценки возможных деформаций русла на этом участке реки.
- Оценить возможность подтопления населенных пунктов и других хозяйственных объектов, расположенных на островах и в пойме реки.

### 11.3.1. Методика и состав модельных экспериментов

На гидравлической модели воспроизводился участок русла и поймы Лены от Покровска до Якутска протяженностью 70 км (рис. 11.18 (а)). Топографической основой при формировании рельефа модели служила русловая съемка участка реки, выполненная полевым отрядом МГУ летом 2006 г.

Моделируемый участок реки Лены представляет собою многорукавное русло со множеством осередков и островов. Наиболее значительными в районе проектируемого мостового перехода, у Табагинского выступа левобережного коренного склона долины, являются Табагинская пойменная протока на левобережной пойме и Хаптагайская пойменная протока на правобережной пойме (рис. 11.18(б)). Главное русло реки в пределах рассматриваемого участка имеет ширину в меженных (пойменных) бровках до 4,2 км. Расходы воды редкой повторяемости и весенние заторы льда формируют разлив воды в пределах дна долины шириной (на уровне горизонтали с отметкой 100 м БС) до 18–20 км.

Поскольку в составе модельных экспериментов именно большие расходы воды и заторные уровни представляют особый интерес, с учетом этих обстоятельств и размеров имеющейся лабораторной площадки горизонтальный масштаб модели был принят равным 1:1200. Вертикальный масштаб модели был принят с учетом соблюдения условия:

$$Re_{\text{мод}} \geq Re_{\text{кр}} \quad (11.3)$$

где  $Re_{\text{мод}}$  — число Рейнольдса (или критерий кинематического подобия) модельного потока;  $Re_{\text{кр}}$  — критическое значение числа Рейнольдса, разграничивающее ламинарный и турбулентный режимы течения и варьирующее в пределах от 300 до 1500, в зависимости от условий входа на модель и от состояния граничной поверхности.

Второе обстоятельство, определяющее величину вертикального масштаба, заключается в необходимости получения на модели удобных для работы глубин.

Оба эти обстоятельства вынуждают укрупнить вертикальный масштаб модели по сравнению с ее горизонтальным масштабом и принять его равным 1:300.

Заметим, что 4-кратное несоответствие горизонтального и вертикального масштабов, как показывает многолетний опыт Русловой лаборатории ГГИ и многих зарубежных лабораторий, для широких, близких к прямолинейному русел рек, вполне допустим при решении подобных задач, т. е. позволяет добиться кинематического и динамического подобия модели и природы по основным осредненным характеристикам исследуемых процессов.

Раскрывая условие  $Fr=idem$  для природы и модели, получим соотношение для масштабного множителя скорости течения  $\alpha_v = \sqrt{\frac{H_H}{H_M}} = \sqrt{\alpha_H}$ , где:  $\alpha_v$  — масштабный множитель скорости течения,  $\alpha_H$  — масштабный множитель глубины потока,  $H_H$  и  $H_M$  — характерные глубины в натурном и в модельном руслах.

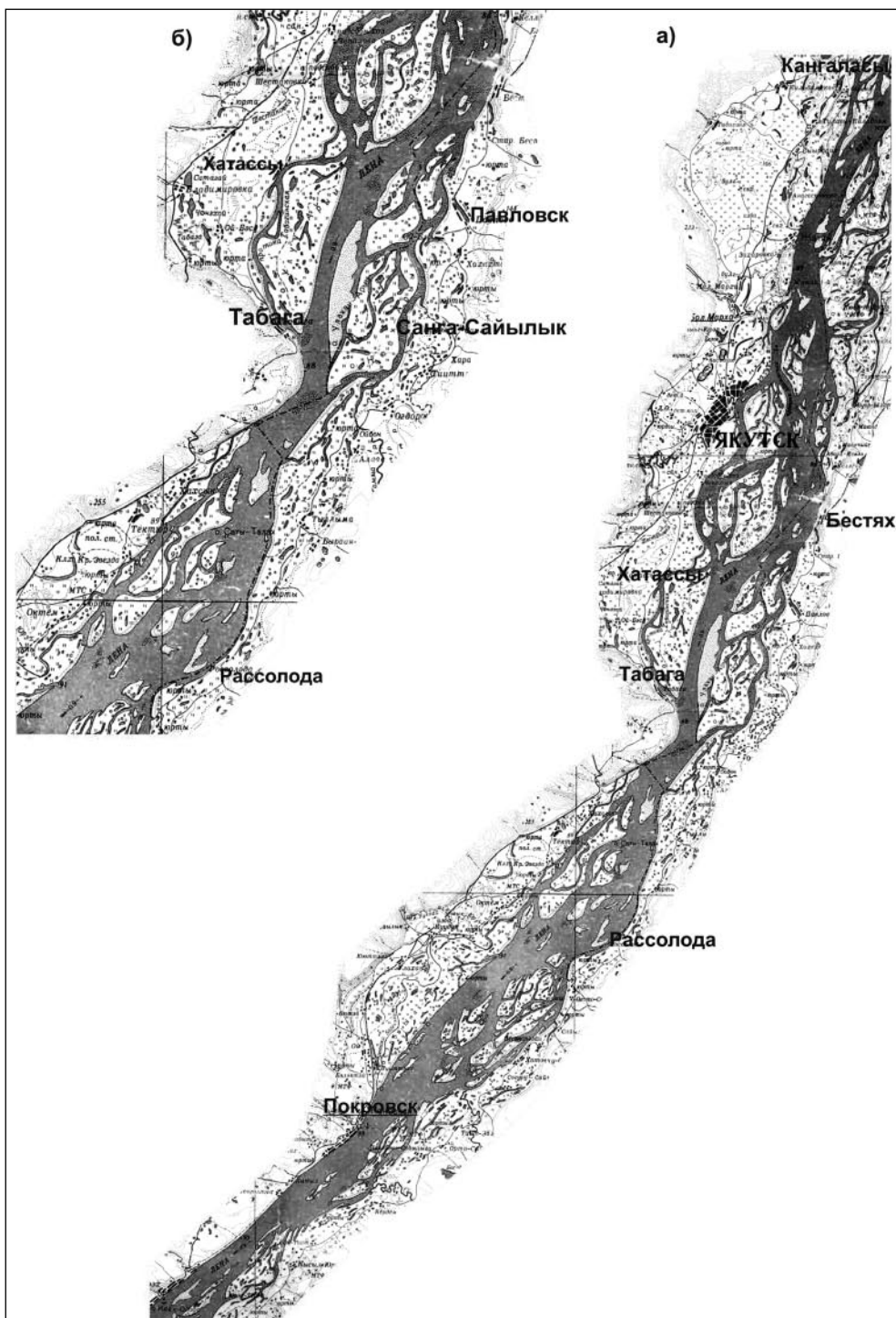


Рис. 11.18. Схематический план участка р. Лены:  
 а – от г. Покровска до пос. Кангаласы; б – фрагмент русла и поймы у с. Табага

С учетом принятого масштаба глубин 1:300 масштабный множитель скорости течения составляет 17,3.

Условие (11.3) проверено применительно к расходу воды, соответствующему уровню пойменных бровок. Глубина в реке при этом расходе воды составляет около 12 м, скорость течения — около 1,5 м/с. Соответствующие им модельные значения глубины и скорости течения с учетом  $\alpha_h$  и  $\alpha_v$  составляют соответственно 0,04 м и 0,087 м/с, а модельное число Рейнольдса — 3050, что вдвое превышает верхний предел  $Re_{кр}$  и, таким образом, свидетельствует о получении на модели вполне развитого турбулентного режима потока.

Проверка модели на динамическое подобие натуре, т. е. по условию  $Fr=idem$ , была проведена в ходе ее тарировки. Заметим, что обычно при несоответствии горизонтального и вертикального масштабов модели выполнение условия  $Fr=idem$  достигается путем нанесения на модель дополнительной шероховатости.

Таким образом, с учетом принятых масштабов модели получаем следующие масштабные множители для пересчета модельных значений геометрических и гидравлических характеристик в соответствующие им натурные значения:

- для линейных размеров в плане  $\alpha_L=1200$ ;
- для линейных размеров по вертикали (глубин и высот)  $\alpha_H=300$ ;
- для скорости течения  $\alpha_V=17,3$ ;
- для площади в вертикальной плоскости  $\alpha_{F_B}=360000$ ;
- для площади в горизонтальной плоскости  $\alpha_{F_\Gamma}=360000$ ;
- для расхода воды  $\alpha_Q=6228000$ ;
- для объема  $\alpha_w=432600000$ ;
- для уклона потока  $\alpha_I=0,25$ ;
- для времени  $\alpha_t=69,42$ .

С учетом полученных расчетных характеристик для модельного потока и русла был выполнен проект размещения модели на лабораторной площадке и определены параметры оборудования, необходимого для функционирования модели в назначенном диапазоне гидравлических, морфологических и ледовых характеристик. В частности, на модели должен обеспечиваться расход воды до 10 л/с, равномерное оборудование должно обеспечивать надежность отсчета в 0,1 мм, скорости течения должны надежно определяться в диапазоне 1,0–25,0 см/с, оборудование для измерения отметок дна русла и поверхности поймы должно обеспечивать надежность отсчета не хуже 1,0 мм, материал для имитации льда должен иметь плотность, близкую плотности натурального льда, т. е. около 0,95 г/см<sup>3</sup>, толщину около 5,0 мм и допускать возможность изготовления отдельных агрегатов — льдин различного размера.

Проектируемый мостовой переход внесет изменения в структуру речного потока, в режим уровней воды, характер русловых деформаций в процесс весеннего ледохода и режим формирования заторов льда. Для оценки влияния мостового перехода на перечисленные явления и процессы в ходе экспериментов необходимо получить следующие гидравлические характеристики потока для естественных и различных проектных условий: уровни и расходы воды, скорости течения, уклоны водной поверхности. На модели было установлено 5 стационарных уровнемеров в точках, соответствующих расположению водомерных постов Покров-

ска, Табаги и Якутска. Дополнительно 2 уровнемера были установлены на участке между Покровским и Табагой для более детальной фиксации характеристик кривой подпора на участке выше проектируемого мостового перехода.

Фотографирование и видеосъемка поверхностных поплавок и исследуемых процессов выполнялись с технологического моста, расположенного на высоте 10 м над моделью. Отдельные детали наблюдаемых процессов фотографировались непосредственно на модели.

Уровни воды на модели измерялись механическими игольчатыми уровнемерами стационарного и переносного типа. Уклон водной поверхности определялся путем измерения уровней воды в интересующих пунктах и последующего деления разности значений уровней на расстояние между пунктами. Регулирование уровней воды и глубины потока на модели осуществлялось концевым водосливным затвором.

Скорости течения в условиях свободной водной поверхности (без льда) измерялись с помощью поверхностных поплавок. В условиях сформировавшегося затора, когда водная поверхность почти сплошь покрыта «льдом», скорости течения измерялись в его головной части лабораторной гидрометрической микровертушкой с диаметром лопастного винта 6 мм.

Лед в модельных экспериментах воспроизводился листовым полиэтиленом высокого давления плотностью  $0,93 \text{ г/см}^3$ , близкой к плотности натурального льда.

Все многообразие возможных вариантов развития весны и половодья сведено в модельных исследованиях к двум характерным ситуациям. Дружная весна с высоким и большим по расходу воды половодьем. В этой ситуации назначался расход воды обеспеченностью 0,33 %, равный  $63\,000 \text{ м}^3/\text{с}$ , а ледовое поле формировалось в головной части из наиболее крупных агрегатов (квадратные плитки размером  $35 \times 35 \text{ см}$ ), в средней части — плитками  $20 \times 20 \text{ см}$  и в хвостовой части плитками  $10 \times 10 \text{ см}$ .

В варианте с «вялой» весной назначался расход воды, соответствующий уровню воды в бровках межженного русла и равный  $19\,556 \text{ м}^3/\text{с}$ , а ледовое поле формировалось из квадратных плиток размером  $10 \times 10 \text{ см}$ , что соответствует натурным агрегатам льда размером  $120 \times 120 \text{ м}$ . Хвостовая часть такого ледового поля формировалась более крупными плитками, но только из соображений получения дополнительного объема ледовой массы.

В обоих вариантах ледохода головная часть ледового скопления располагалась в 5 км от мостового перехода, а все скопление, выложенное однослойно, удерживалось в покое рейкой, установленной в пределах всей ширины русла. Для исключения образования преждевременного подпора уровня воды рейка устанавливалась над свободной поверхностью потока, а через насверленные в ней вертикальные отверстия опускались до дна металлические стержни (гвозди), которые удерживали формируемое ледовое поле.

На гидравлической модели было выполнено 48 экспериментов, состоящих из нескольких серий, различающихся по следующим признакам: естественные условия на участке реки, проектные условия на участке реки, свободное состояние русла (без льда) и ледоход на реке.

Модель Лены тарировалась по расходу воды, измеренному на реке 14 июля 2006 г. и составившему 45 716 м<sup>3</sup>/с.

После нанесения на модель гравийно-щебеночной смеси крупностью 0,5–1,0 см первоначальная недоброкачественность жесткой модели, проявляющаяся всегда при неравенстве масштабов плана и глубин, была устранена, т. е. было достигнуто соблюдение условия динамического подобия  $Fr=idem$ . Скорости течения, измеренные на модели в левобережной части русла у водомерного поста Табага составили 15–17 см/с, что в пересчете на натуру составляет 2,76–2,94 м/с – значения, весьма близкие измеренным в природе. Продольный уклон модельного потока, пересчитанный на натуру, составил 0,00008, что также близко к натурным значениям уклонов реки при этом расходе воды. Отметки уровней воды по водпостам Покровск, Табага, Якутск оказались одинаковыми с натурными значениями, что свидетельствовало о подобии глубин потока.

Модель была проверена на соответствие натуре и при других расходах воды. Подачей на модель этих расходов воды на водомерном посту Табага устанавливались уровни воды, соответствующие кривой расходов.

Свободное состояние участка реки в проектных условиях изучалось в экспериментах № 7–22. Общий вид гидравлической модели приведен на рис. 11.19.

В этой серии опытов измерялись уровни воды в пяти основных и в дополнительных пунктах и поле поверхностных скоростей при устройстве мостового перехода по варианту 1 (220+280+3×600+280+220 м) и по варианту 4 (2×154+4×308+10×154 м). Каждый вариант рассматривался в двух подвариантах: с глухой правобережной дамбой и с отверстием в ней в пределах Хаптагайской протоки (разрыв в дамбе длиной 600 м). Каждый подвариант мостовых переходов рассматривался с расходами воды 30 000, 45 716, 52 000 и 63 000 м<sup>3</sup>/с, т. е. в режиме затопленной поймы.

Весенний ледоход и заторы льда в проектных условиях исследовались в экспериментах № 23–42.

В этой серии экспериментов выполнена качественная и количественная оценка гидравлико-кинематических ситуаций, возникающих у мостового перехода и в целом на участке реки в период весеннего ледохода и в связи с образованием заторных скоплений льда у мостового перехода.

Рассмотрены 4 варианта пролетов мостового перехода:

- вариант 1 (220+280+3×600+280+220 м),
- вариант 2 (220+280+2×600+280+3×220+160 м),
- вариант 3 (18×154 м),
- вариант 4 (2×154+4×308+10×154 м).

Каждый вариант мостового перехода рассмотрен в двух подвариантах: с глухой правобережной дамбой и с отверстием в пределах Хаптагайской протоки. Каждый подвариант перехода рассмотрен с двумя расходами воды: 19 556 м<sup>3</sup>/с и 63 000 м<sup>3</sup>/с. В этой же серии экспериментов рассмотрены особенности прохождения редкого ледохода через мостовой переход по вариантам 1 и 3 и среднего ледохода через мостовой переход по варианту 1 при расходе воды 19 556 м<sup>3</sup>/с.

Весенний ледоход и заторы льда в условиях естественного состояния участка реки исследовались в экспериментах № 43–48. В этой серии опытов наблю-





Рис. 11.19. Общий вид гидравлической модели участка русла р. Лены у с. Табага

дались характер ледохода и формирование заторов в условиях естественного состояния участка реки. Заторная ситуация возникала на участке русла у Покровска выше по течению Табагинского мыса и на участке русла в районе перехода газопровода в 8 км ниже моста. Ледоход и заторообразование рассматривались с расходами воды  $19\,556\text{ м}^3/\text{с}$  и  $63\,000\text{ м}^3/\text{с}$ .

### **11.3.2. Анализ результатов опытов**

#### **11.3.2.1. Характеристика поля скоростей течения воды в пределах рассматриваемого участка р. Лены**

Скорость течения потока оказывает влияние на характер ледохода и заторообразование. В связи с этим знание структуры поля скоростей в естественных условиях участка реки и, тем более, при устройстве на реке мостового перехода той или иной конструкции важно для решения поставленной в исследовании

задачи, т. е. установления ледопропускной способности русла в подмостовых пролетах разной конструкции и оценки возможного затопления населенных пунктов, расположенных на пойме реки при заторных подъемах уровней воды.

Характеристика скоростного поля речного потока была выполнена для 6 расходов воды применительно к естественному состоянию русла и для 4 расходов воды (при которых вода выходит на пойму) применительно к 2 вариантам устройства мостового перехода.

Поле скоростей течения, измеренных поверхностными поплавками, было исследовано при расходах воды: 7500, 19 556, 30 000, 45 716, 52 000 и 63 000 м<sup>3</sup>/с.

Анализ полученных данных о скоростях течения на участке русла Лены от Покровска до Якутска обнаруживает следующее.

- В разных гидравлично-морфологических ситуациях скорости потока на транзитном течении в пределах рассматриваемого участка в диапазоне приведенных выше расходов воды варьируют от 0,42 м/с в 15 км ниже по течению Покровска до 3,36 м/с в районе перехода газопровода.
- С последовательным возрастанием расходов воды не обнаруживается последовательно-монотонного увеличения скоростей течения. Так, например, скорость течения 3,36 м/с (наибольшая) зафиксирована в районе газопровода при расходе воды 7500 м<sup>3</sup>/с, а при максимальном расходе воды, равном 63 000 м<sup>3</sup>/с, на этом же участке русла скорость течения составила только 2,96 м/с. Это явление связано с влиянием морфологии русла на структуру и величины скоростей. В частности, участок русла в районе перехода газопровода представляет собою перекат. На перекатных участках, как известно, скорости течения при низких уровнях воды обычно бывают большими, чем при высоких уровнях.
- Влияние морфологии русла на скоростное поле потока приводит к тому, что при каждом из рассмотренных расходов воды диапазон изменения скоростей течения в русле реки значителен. Так, при расходе воды 7500 м<sup>3</sup>/с он составляет 0,42–3,36 м/с; при расходе 19 556 м<sup>3</sup>/с — 0,72–3,19 м/с; при расходе 30 000 м<sup>3</sup>/с — 0,83–3,33 м/с; при расходе 45 716 м<sup>3</sup>/с — 0,77–3,28 м/с; при расходе 52 000 м<sup>3</sup>/с — 0,82–2,96 м/с; при расходе 63 000 м<sup>3</sup>/с — 0,79–3,21 м/с.
- Скорости течения в пойменных протоках с увеличением расходов воды и наполнением русла также увеличиваются и достигают при расходах 45 716–63 000 м<sup>3</sup>/с — 2,18–2,44 м/с в Хаптагайской протоке, и 1,18–1,26 м/с в Табагинской протоке.
- Скорости течения над затопленной поймой возрастают с увеличением расхода воды и составляют при расходе 30 000 м<sup>3</sup>/с 0,86–1,25 м/с, а при расходе 63 000 м<sup>3</sup>/с превышают 2,0 м/с.
- На участке Табагинского сужения русла (где и предполагается сооружение мостового перехода) скорости течения также значительны, однако почти при всех режимах (кроме максимального расхода) несколько меньшие по сравнению с таковыми на участке газопровода. Только при расходе 63 000 м<sup>3</sup>/с скорости течения здесь становятся наибольшими на всем участке, достигая 3,2 м/с.

Таким образом, выполненный анализ поля поверхностных скоростей течения приводит к выводу о том, что в естественных условиях они значительны как в пределах всего участка, так и особенно — на участках перехода газопровода через русло реки и перехода проектируемого моста у Табагинского мыса. Существенно, что большие скорости течения наблюдаются в широком диапазоне расходов воды: от 7500 м<sup>3</sup>/с до 63 000 м<sup>3</sup>/с.

#### **11.3.2.2. Поле скоростей течения в проектных условиях**

Чтобы оценить степень влияния проектируемого мостового перехода на структуру скоростного поля потока и на величины скоростей течения, на модели были установлены мостовые переходы по вариантам 1 и 4. Каждый из этих вариантов рассматривался в двух подвариантах: с глухой правобережной дамбой и с отверстием в ней в пределах русла Хаптагайской протоки.

Исследования скоростного поля потока выполнялись при расходах воды с затопленной поймой, т. е. при расходах 30 000, 45 716, 52 000 и 63 000 м<sup>3</sup>/с. Предполагалось, что при меньших расходах воды, наполняющих русло в пределах пойменных бровок, влияние мостового перехода в любом его конструктивном варианте на скоростное поле потока ничтожно и проявляется лишь в местных эффектах у мостовых опор.

Анализ полученных данных обнаруживает следующее.

- На участке проектируемого мостового перехода его возведение в исследованных вариантах приводит к некоторому увеличению скоростей течения в подмостовом сечении реки. Конкретно это увеличение выражается в следующих цифрах (табл. 11.2).

В табл. 11.2 видно, что в условиях свободного ото льда русла влияние мостового перехода на скоростное поле потока в подмостовом сечении реки незначительно и достигает лишь 23 % при максимальном расходе воды и при устройстве глухой дамбы, а также, что влияние собственно мостовых опор на увеличение скоростей течения практически отсутствует (это видно по ситуации с расходом 30 000 м<sup>3</sup>/с, при котором выход воды на пойму мал). Несколько меньшее в целом влияние мостового перехода по варианту 4 на скоростное поле потока объясняется большей его протяженностью (на 280 м) по сравнению с переходом по варианту 1.

- Устройство отверстия в правобережной дамбе несколько уменьшает скорости течения в основном русле по обоим вариантам мостового перехода. При этом в Хаптагайской протоке скорости течения составляют 2,2–2,4 м/с при расходах воды 52 000–63 000 м<sup>3</sup>/с.

#### **11.3.2.3. Характеристика поля скоростей течения в проектных условиях при заторах льда у мостового перехода**

Как отмечено выше, эксперименты с ледоходом и заторными ситуациями выполнялись при двух расходах воды, соответствующих варианту затяжного развития погодных и гидрологических процессов (расход воды 19 556 м<sup>3</sup>/с) и варианту дружного их развития (расход воды 63 000 м<sup>3</sup>/с).

**Таблица 11.2. Максимальные скорости течения на участке мостового перехода в естественных и проектных условиях**

Вариант перехода	Расход воды, м <sup>3</sup> /с	Максимальная скорость течения, м/с		В % от максимальной скорости в естественных условиях
		Естественные условия	Проектные условия	
Вариант 1 с проточной дамбой	30000	2,38	2,40	1
Вариант 4 с проточной дамбой	30000	2,38	2,38	0
Вариант 1 с проточной дамбой	45716	2,90	3,11	7
Вариант 4 с проточной дамбой	45716	2,90	2,81	-3
Вариант 1 с проточной дамбой	52000	2,85	3,25	14
Вариант 4 с проточной дамбой	52000	2,85	3,30	12
Вариант 1 с проточной дамбой	63000	3,21	3,54	10
Вариант 4 с проточной дамбой	63000	3,21	3,11	-3
Вариант 1 с глухой дамбой	30000	2,38	2,44	2,5
Вариант 4 с глухой дамбой	30000	2,38	2,40	2,5
Вариант 1 с глухой дамбой	45716	2,90	3,39	17
Вариант 4 с глухой дамбой	45716	2,90	2,95	2,0
Вариант 1 с глухой дамбой	52000	2,85	3,41	16
Вариант 4 с глухой дамбой	52000	2,85	3,32	14
Вариант 1 с глухой дамбой	63000	3,21	3,95	23
Вариант 4 с глухой дамбой	63000	3,21	3,56	11

При этих расходах воды на модели было исследовано 4 варианта мостового перехода, и каждый вариант в двух подвариантах: с проточной и с глухой правобережной дамбой. Таким образом, с заторами льда у мостового перехода было рассмотрено 16 ситуаций.

Скорости течения измерялись в непосредственной близости к голове затора, т. е. с нижней по течению стороны мостового перехода. Измерения выполнялись микровертушкой после стабилизации гидравлической обстановки в заторе, т. е. когда уровень воды достигал своего наибольшего значения и далее оставался неизменным. Всего в разных сочетаниях гидрологических и проектных условий было выполнено 204 измерения скорости течения.

В конкретных заторных ситуациях зафиксированы следующие максимальные значения скорости течения соответственно для расходов воды 19 556 м<sup>3</sup>/с и 63 000 м<sup>3</sup>/с:

- вариант 1 с проточной дамбой: 2,02 м/с и 3,89 м/с;
- вариант 1 с глухой дамбой: 2,44 м/с и 5,31 м/с;
- вариант 2 с проточной дамбой: 2,49 м/с и 3,84 м/с;
- вариант 2 с глухой дамбой: 2,27 м/с и 4,95 м/с;
- вариант 3 с проточной дамбой: 4,74 м/с и 4,34 м/с;
- вариант 3 с глухой дамбой: 4,17 м/с и 6,11 м/с;
- вариант 4 с проточной дамбой: 3,32 м/с и 4,98 м/с;
- вариант 4 с глухой дамбой: 3,70 м/с и 4,93 м/с.

Анализ полученных результатов, обнаруживает следующее.

- В целом в заторных ситуациях наблюдается существенное увеличение скоростей течения. Резко изменяется структура скоростного поля потока в подмостовом сечении реки. Скорости течения распределены по ширине русла крайне неравномерно, что вызвано специфической структурой укладки ледяных агрегатов в заторе: участки, плотно забитые льдом, чередуются с проранами, в которых и формируются компактные струи потока с большой скоростью.
- Наблюдается заметное увеличение скоростей течения в заторных струях в вариантах с глухой дамбой. Этот эффект особенно заметен при устройстве мостового перехода по варианту 3 при расходе воды 63 000 м<sup>3</sup>/с; когда скорости течения в подварианте с глухой дамбой превысили 6 м/с.
- Разновременные серии измерения скоростей течения в заторе с мостовым переходом по варианту 4 обнаруживают заметное изменение скорости течения во времени на одних и тех же вертикалях. Это свидетельствует о том, что в формирующемся заторе происходит активная перестройка его структуры: наряду с уплотнениями ледовой массы на одних участках происходит разрежение ее на других.
- В связи с отмеченным выше, размыв дна в подмостовом сечении на Лене будет существенно отличаться от такового на мостовых переходах беззаторных рек. На Лене наряду с обычными местными размывами речного дна у мостовых опор могут формироваться локализованные вымоины практически на любом участке подмостового сечения реки, где формируются высококинетические струи потока в проранах заторного скопления льда.
- При реализации мостового перехода по вариантам 1 и 2 скорости течения в отверстиях дамбы даже при расходе воды 63 000 м<sup>3</sup>/с немногим выше 1,6 м/с. Это свидетельствует о малой эффективности проточной дамбы в выполнении разгрузочной функции и связано, по-видимому,

с мелководностью начального участка Хаптагайской протоки и с формирующимся здесь ледяным скоплением, что в совокупности создает большое гидравлическое сопротивление потоку.

- В проектном решении мостового перехода по вариантам 3 и 4 скорости течения в начале Хаптагайской протоки при расходе воды  $63\,000\text{ м}^3/\text{с}$  существенно возрастают и достигают  $3,1\text{ м/с}$ . Отмеченное вызвано, по-видимому, спецификой формирования затора, когда входной участок в Хаптагайскую протоку остается свободным ото льда, т. е. характеризуется значительно меньшим, чем при вариантах 1 и 2 гидравлическим сопротивлением. Вместе с тем, большая скорость течения в протоке может вызвать размыв как собственно протоки, так и примыкающих к ней элементов дамбы-насыпи.
- В связи с отмеченным устройством отверстия в дамбе как разгрузочного элемента в заторной ситуации представляется нецелесообразным.
- При всех вариантах мостового перехода и при всех расходах воды в реке скорости течения на участке перехода газопровода в  $8\text{ км}$  ниже мостового перехода остаются на уровне значений, характерных для естественного состояния участка реки. Это свидетельствует о том, что собственно мостовой переход не окажет практически никакого влияния на гидравлические характеристики потока в районе газопровода.

#### **11.3.2.4. Характеристика уровней воды на исследуемом участке Лены**

Поскольку р. Лена характеризуется мощными ледовыми заторами, исследование режима уровней воды в рассматриваемой проблеме составляет особый интерес. Уровни воды, формирующиеся при разных расходах воды в естественном состоянии участка реки, могут измениться при тех же расходах воды после сооружения мостового перехода на реке даже в безледный период. Эти изменения уровня воды могут оказаться разными в разных вариантах конструктивного решения мостового перехода.

Мостовой переход представляет собою помеху весеннему ледоходу, и поэтому очевидно будет провоцировать образование заторов льда с соответствующим повышением уровня воды. Величина повышения уровня воды может быть различной в разных вариантах конструктивного решения мостового перехода. Следовательно, может быть установлен вариант перехода, при котором заторный подъем уровня воды оказывается наименьшим.

Возникает вопрос, в какой мере заторы, формирующиеся у мостового перехода, усугубляют обстановку на реке по сравнению с естественными условиями формирования заторных уровней.

Приведенный здесь ход рассуждений о возможных гидравлических ситуациях на реке в естественном ее состоянии и в проектных условиях по существу предопределил программу серии экспериментов, предусматривающих оценку уровней воды в разных гидрологических и проектных условиях.

Исследовались характеристики уровней воды (продольных профилей водной поверхности) в естественных условиях; в свободном русле в проектных

условиях; при наличии льда в русле в естественном режиме и в период весеннего ледохода в проектных условиях.

Применительно к естественным условиям участка реки уровни воды наблюдались на модели в 5-ти пунктах, соответствующих водомерным постам Росгидромета в Покровске, Табаге и Якутске; пункты 2 и 3 дополнительные, расположены в 12,6 и в 27,6 километрах вниз по течению от Покровска. Уровни воды наблюдались в диапазоне расходов воды от 7 250 м<sup>3</sup>/с до 63 000 м<sup>3</sup>/с. Результаты этих измерений приведены на рис. 11.20 в виде продольных профилей свободной поверхности потока и в виде табл. 11.3 со значениями уровня воды в указанных выше 5-ти пунктах при расходах воды 7250, 19 556, 30 000, 45 716, 52 000 и 63 000 м<sup>3</sup>/с.

**Таблица 11.3. Отметки уровня воды (м БС) в свободном от льда русле**

	Расстояние от Покровска, км	Q, м <sup>3</sup> /с					
		7250	19556	30000	45716	52000	63000
водпост 1	0	92,41	95,32	96,25	97,57	98,17	98,6
водпост 2	12,6	90,88	93,85	94,93	96,28	96,73	97,21
водпост 3	27,6	89,44	92,5	93,94	95,32	95,86	96,37
водпост 4	40,92	88,75	91,87	93,31	94,54	95,08	95,65
водпост 5	60,06	85,15	87,64	90,55	92,08	93,07	93,76

На рисунке видно, что продольные профили водной поверхности почти без изменения формы принимают все более высокие отметки с ростом расхода воды. Это свидетельствует об однородности морфологических условий на участке реки в целом. Иными словами, в пределах этого участка реки нет каких-либо обстоятельств, которые вызывали бы заметную трансформацию профиля водной поверхности в его пределах с изменением расходов воды.

Вместе с тем на рис. 11.20 показано, что с возрастанием расхода воды приращение уровня становится все меньше. Так, с переходом от расхода воды 7250 м<sup>3</sup>/с к расходу воды 19 556 м<sup>3</sup>/с разница в расходах составила 12 306 м<sup>3</sup>/с, а соответствующая ей разница в уровнях по Табаге составила 3,12 м. С переходом расхода воды от 30 000 м<sup>3</sup>/с (выход воды на пойму) до 63 000 м<sup>3</sup>/с приращение уровня по Табаге составило только 2,34 м: причина заключается в расплывании речного потока с выходом его на пойму.

Некоторый перелом продольного профиля водной поверхности в районе 42-го км от Покровска вызван с одной стороны Табагинским сужением долины, а с другой — перекатным участком реки в районе перехода газопровода. С наполнением русла влияние переката на уклон водной поверхности уменьшается, что и обнаруживается в последовательном уменьшении уклона на участке русла Табага — Якутск при расходах воды 30 000–63 000 м<sup>3</sup>/с.

Экспериментальная оценка влияния мостового перехода в проектных условиях на распределение уровней воды в пределах рассматриваемого участка в свободном русле (без льда) была выполнена применительно к мостовым пере-

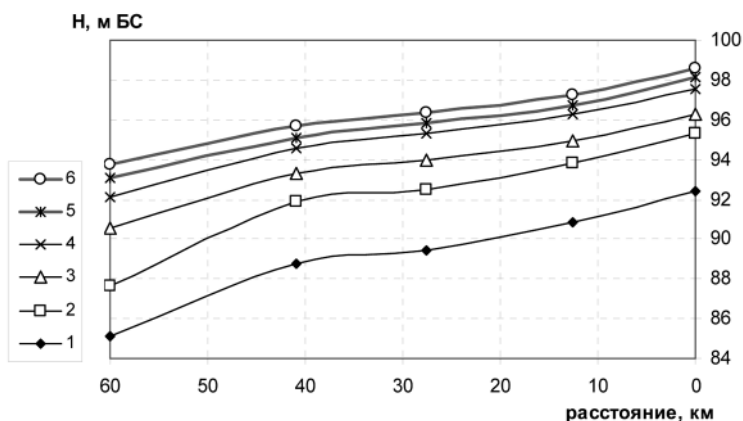


Рис. 11.20. Продольные профили свободной поверхности воды в естественных условиях:  
 1 –  $Q=7250 \text{ м}^3/\text{с}$ ; 2 –  $Q=19\ 556 \text{ м}^3/\text{с}$ ; 3 –  $Q=30\ 000 \text{ м}^3/\text{с}$ ; 4 –  $Q=45\ 716 \text{ м}^3/\text{с}$ ; 5 –  $Q=52\ 000 \text{ м}^3/\text{с}$ ;  
 6 –  $Q=63\ 000 \text{ м}^3/\text{с}$

ходам, устроенным по вариантам 1 и 4. Оба варианта рассматривались с глухой и проточной правобережной дамбой-насыпью при четырех расходах воды, при которых вода выходит на пойму.

Анализ этих результатов приводит к следующим выводам.

- Влияние мостового перехода на режим уровня воды в свободном русле проявляется в незначительном его увеличении, составляющем 0,1–0,2 м.
- Мостовые переходы с проточной правобережной дамбой вызывают несколько меньший подпор уровня, чем переходы с глухой дамбой.
- В условиях открытого русла преимущество какого-либо из рассмотренных вариантов не обнаруживается.
- Уровни воды, измеренные в дополнительных точках правобережной поймы, следуют в целом тем же тенденциям, что и уровни, измеренные в 5-ти опорных пунктах.

Как уже отмечалось, для характеристики уровней воды при наличии льда в русле в естественном режиме были выполнены эксперименты со «льдом» при двух расходах воды:  $19\ 556 \text{ м}^3/\text{с}$  и  $63\ 000 \text{ м}^3/\text{с}$ . Было также отмечено, что в естественных условиях весенние заторы льда в пределах рассматриваемого участка образуются в 7-ми местах. В разные годы заторы формируются как ниже по течению створа проектируемого мостового перехода, так и выше него.

На гидравлической модели заторы формировались в районе перехода газопровода через реку и на участке несколько выше по течению проектируемого мостового перехода.

Анализ выполненных экспериментов выявляет следующее.

- Образование затора при расходе воды  $19\ 556 \text{ м}^3/\text{с}$  на участке перехода газопровода приводит к подъему уровня воды в головной его части на 4 м над уровнем воды открытого русла. В этом случае продольный профиль водной поверхности формируется таким образом, что подпорная призма сокращается от 4 м в районе головы затора до 0,7 м у Покровска.



Абсолютные отметки заторного уровня составляют 93,7 м у перехода газопровода, 93,8 м — у водомерного поста Табага, 95,5 м — у Покровска.

- Образование затора при расходе воды 19 556 м<sup>3</sup>/с на участке русла несколько выше по течению створа проектируемого моста приводит к подъему уровня воды в головной его части на 1,3 м над уровнем открытого русла. В этом случае продольный профиль водной поверхности формируется таким образом, что подпорная призма увеличивается по глубине вверх по течению до 2,0 м у Покровска. Абсолютные отметки водной поверхности составляют 92,6 м в голове затора, 92,77 м — у Табага, 96,79 м — у Покровска.
- Существенно разный характер формирования подпорной призмы в зависимости от местоположения головы затора при расходе воды 19 556 м<sup>3</sup>/с вызван особенностями механизма формирования заторного скопления льда в этих двух случаях.

При формировании головы затора на участке перехода газопровода, т. е. на участке переката в русле реки, из-за сравнительно небольших глубин происходит арочно-многослойное формирование ледового скопления, что влечет за собой быстрое нарастание глубин и соответственное уменьшение скоростей течения на вышележащих участках русла. Последнее приводит к тому, что примыкающие последовательно к перемещающейся вверх по течению хвостовой части заторного скопления ледяные агрегаты ледохода останавливаются, не подныривая под кромку заторного скопления. Таким образом, останавливающееся и нарастающее вверх по течению ледяное скопление формируется здесь преимущественно в однослойной структуре на поверхности водного потока.

При формировании головы затора на участке русла выше предполагаемого створа проектируемого мостового перехода, т. е. на сравнительно более глубоководном участке реки, чем в районе газопровода, замок головной части затора формируется не послойным скоплением ледяных агрегатов, а арочным их скоплением преимущественно в один слой на поверхности водного потока. В этом случае уже не происходит быстрого уменьшения глубины, площади поперечного сечения и скорости течения в головной части затора. Поэтому входящие в контакт с верховой кромкой заторного скопления ледяные агрегаты либо подныривают под нее и проходят транзитом, минуя голову затора, вниз по течению реки, либо примыкают к верховой кромке затора, наращивая его хвостовую часть вверх по течению в однослойной структуре. Однако распространяясь таким образом вверх по течению, хвостовая часть заторного скопления достигает участка русла с малыми глубинами, с осередками и островами. Здесь подныривающие агрегаты уже не могут свободно транзитом проходить под заторным скоплением, они заклиниваются между нижней поверхностью заторного поля и дном и таким образом формируют внутренний или промежуточный затор многослойной структуры, вызывающий существенное сокращение поперечного сечения потока и в связи с этим соответствующий подпор речного потока. Это в конечном счете и приводит к формированию большего подпорного уровня у Покровска, чем от затора, образовавшегося на участке перехода газопровода через реку.

- Образование затора при расходе воды  $63\,000\text{ м}^3/\text{с}$  на участке перехода газопровода через реку приводит к подъему уровня воды в головной его части около 4 м над уровнем воды открытого русла. В этом случае продольный профиль водной поверхности формируется таким образом, что подпорная призма образует у Покровска подпорный подъем уровня около 1,3 м. Абсолютные отметки подпорных уровней составляют в этом случае в голове затора 98,2 м, в Табаге — 98,32 м, в Покровске — 99,85 м.
- Образование затора при расходе воды  $63\,000\text{ м}^3/\text{с}$  на участке русла выше по течению створа проектируемого мостового перехода приводит к подъему уровня воды в головной его части около 1,2 м над уровнем воды открытого русла. Подпорная призма в этом случае образует подъем подпорного уровня у Покровска 1,0 м. Абсолютные отметки подпорных уровней составляют в этом случае в голове затора 96,7 м, у Покровска — 99,49 м.
- Продольные профили подпорных уровней при расходе воды  $63\,000\text{ м}^3/\text{с}$  имеют в целом такой же характер, как и при расходе воды  $19\,556\text{ м}^3/\text{с}$ . Это свидетельствует о том, что механизм формирования заторного скопления льда, несмотря на существенно больший расход воды, сохраняет те же особенности, связанные с морфологией русла и гидравликой речного потока на тех или иных участках расположения головы затора. При формировании затора на участке перехода газопровода образуется арочно-многослойная структура его головной части и далее — наращивание хвостовой части вверх по течению, но уже в однослойной структуре. Поэтому большой подпорный подъем уровня воды в головной части затора монотонно уменьшается вверх по течению. При формировании затора на участке русла выше створа проектируемого мостового перехода (где оно относительно более глубокое и компактное) образуется арочная структура его головной части и далее — внутренние заторы многослойной структуры над осередками, небольшими островами и в истоках пойменных проток. Поэтому сравнительно небольшой подъем подпорного уровня в головной части (около 1,2 м) увеличивается в 13–15 км от Покровска до 1,75–1,5 м, а затем уже уменьшается монотонно к Покровску до 1,0 м.
- При расходе воды  $63\,000\text{ м}^3/\text{с}$  ряд населенных пунктов и других хозяйственных объектов, расположенных на пойме реки, оказываются подтопленными даже при отсутствии льда в русле реки. Очевидно, что с образованием заторных ситуаций и число объектов, и уровень воды при их подтоплении возрастут. Очевидно также, что подтопление некоторых населенных пунктов в заторной ситуации возможно даже при расходе воды  $19\,556\text{ м}^3/\text{с}$ .

Оценка влияния мостового перехода на уровни воды в период весеннего ледохода и на формирование заторов льда у моста выполнена применительно к четырем вариантам конструкции мостового перехода, с двумя подвариантами устройства правобережной дамбы-насыпи (глухой и проточной) при двух расходах воды:  $19\,556\text{ м}^3/\text{с}$  (условия вялой весны) и  $63\,000\text{ м}^3/\text{с}$  (условия дружной весны). Таким образом было выполнено 16 экспериментов. В качестве примера

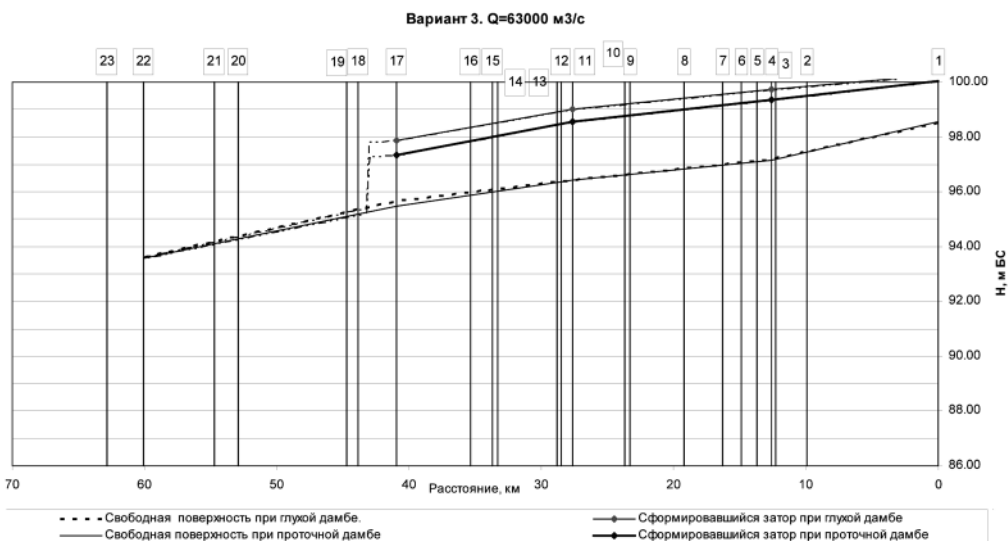


Рис. 11.21. Продольные профили водной поверхности при свободном состоянии русла и в условиях сформировавшегося затора при разных вариантах правобережной дамбы

на рис. 11.21 приведен результат одного из опытов в виде продольных профилей водной поверхности, а также в табл. 11.4 со значениями уровней воды по 5-ти опорным пунктам. В табл. 11.5 перечислены населенные пункты и другие хозяйственные объекты на пойме реки, с указанием абсолютных отметок

**Таблица 11.4. Отметки уровня воды при свободном состоянии русла и в условиях сформировавшегося затора при разных вариантах правобережной дамбы**

Вариант 3 (18×154), глухая дамба. Опыт 29, Q=63 000 м <sup>3</sup> /с. Затор образовался у моста			
Водпост	Расстояние, км	Свободная поверхность в свободном русле	Свободная поверхность в заторном русле
1	0	98,53	100,27
2	12,6	97,18	99,73
3	27,6	96,43	99,01
4	40,9	95,65	97,87
5	60,06	93,61	
Вариант 3 (18×154), проточная дамба. Опыт 28, Q=63 000 м <sup>3</sup> /с. Затор образовался у моста			
1	0	98,56	100,03
2	12,6	97,15	99,37
3	27,6	96,43	98,56
4	40,92	95,47	97,33
5	60,06	93,58	

Таблица 11.5. Отметки поверхности земли у населенных пунктов

№ п\п	Створы	Н, м БС
1	Водпост 1	
2	Хотточу	95–100
3	МТФ на острове	96
4	Водпост 2	
5	МТФ-правый берег	100
6	МТФ-левый берег	100
7	Дома-правый берег	97.5
8	Чапаево	≥100
9	МТФ-правый берег	≥95
10	Октемцы	95–100
11	Водпост 3	
12	Россолода	≥95
13	Техтюр	95–97
14	МТФ-правый берег	≥95
15	МТФ-левый берег	≥95
16	МТФ-правый берег	≥95
17	Водпост 4	
18	Табага верхняя	95–100
19	Табага нижняя	90–95
20	Хатассы	≥94
21	Павловск	90–100
22	Водпост 5	
23	Нижний Бестях	≥125

местности в их окрестностях. Сравнение приведенных в ней отметок с отметками подпорных уровней позволяет судить о возможном подтоплении указанных объектов.

Кроме этого было выполнено несколько экспериментов для выяснения условий ледохода разной густоты в подмостовых пролетах разного размера.

Рассмотрение полученных в этих экспериментах материалов с учетом материалов видеосъемки обнаруживает следующее.

- Редкий ледоход, состоящий из льдин, размер которых меньше размера подмостового пролета, беспрепятственно проходит под мостами любой из рассмотренных конструкций.
- Ледоход средней густоты, включающий отдельные более крупные льдины (размер которых превышает размер подмостового пролета), приводит периодически к образованию заторной ситуации. Возникающий затор в этом случае может прорываться, рассасываться, но в какой-то момент он все же формируется до устойчивого состояния.

- При прочих равных условиях ледоход средней густоты формирует чаще и быстрее затор в подмостовых пролетах меньшего размера.
- Густой ледоход разнофракционного состава, включающий льдины большего размера, чем подмостовой пролет, вызывает образование устойчивого заторного скопления у мостовых пролетов всех рассмотренных в этом исследовании вариантов мостов.
- Густой ледоход, состоящий из льдин меньшего, чем подмостовой пролет, размера (например, льдины 120×120 м, а пролеты моста по вариантам 1 или 2, т. е. размером в центральной части русла 600 м), также вызывает образование заторной ситуации с замком арочного типа и несколько выше по течению мостового перехода.
- Мостовой переход по варианту 3 (18×154 м) оказывается самым заторообразующим из рассмотренных вариантов при прочих равных условиях.
- В разных сочетаниях проектных решений мостового перехода получены величины подпорных уровней воды на момент стабилизации заторной ситуации. При расходе воды 63 000 м<sup>3</sup>/с величины подпора имеют следующие значения.
  - *Мостовой переход по варианту 1 с глухой дамбой:*  
(220+280+33×600+280+220 м)  
Табага ур. ест. 95,7 м, ур. проект 96,79 м, подпор 1,08 м.  
Покровск ур. ест. 98,68 м, ур. проект 100,0 м, подпор 1,32 м.
  - *Мостовой переход по варианту 1 с проточной дамбой:*  
Табага ур. ест. 95,62 м, ур. проект 96,37 м, подпор 0,75 м.  
Покровск ур. ест. 98,47 м, ур. проект 100,0 м, подпор 1,53 м.
  - *Мостовой переход по варианту 2 с глухой дамбой:*  
(220+280+2×600+280+3×220+160 м)  
Табага ур. ест. 95,59 м, ур. проект 97,00 м, подпор 1,41 м.  
Покровск ур. ест. 98,62 м, ур. проект 100,18 м, подпор 1,56 м.
  - *Мостовой переход по варианту 2 с проточной дамбой:*  
Табага ур. ест. 95,50 м, ур. проект. 96,58 м, подпор 1,08 м.  
Покровск ур. ест. 98,56 м, ур. проект. 100,18 м, подпор 1,62 м.  
Мостовой переход по варианту 3 с глухой дамбой: (18×154 м)  
Табага ур. ест. 95,65 м, ур. проект 97,87 м, подпор 2,22 м.  
Покровск ур. ест. 98,53 м, ур. проект. 100,27 м, подпор 1,74 м.
  - *Мостовой переход по варианту 3 с проточной дамбой:*  
Табага ур. ест. 95,47 м, ур. проект. 97,33 м, подпор 1,86 м.  
Покровск ур. ест. 98,56 м, ур. проект. 100,03 м, подпор 1,47 м.
  - *Мостовой переход по варианту 4 с глухой дамбой:*  
(2×154+4×308+10×154 м)  
Табага ур. ест. 95,68 м, ур. проект. 96,88 м, подпор 1,20 м.  
Покровск ур. ест. 98,78 м, ур. проект. 99,88 м, подпор 1,10 м.
  - *Мостовой переход по варианту 4 с проточной дамбой:*  
Табага ур. ест. 95,47 м, ур. проект. 96,91 м, подпор 1,44 м.  
Покровск ур. ест. 98,71 м, ур. проект. 99,94 м, подпор 1,23 м.

Из этого перечня видно, что мостовой переход по варианту 1 и с глухой, и с проточной дамбой создает наименьший заторный подпор уровня воды на при-мостовом участке реки, составляющий всего 1,08 м. Вместе с тем, у Покровска наименьший заторный подпор уровня воды формируется с мостом по варианту 4 и составляет 1,23 м. Некоторое несоответствие подпорных уровней у Табаги и Покровска следует воспринимать, по-видимому, как неизбежное следствие значительной случайной составляющей в процессе развития заторных ситуаций на участке (в данном случае — вверх по течению реки).

Наихудший результат по подпорному подъему уровня (2,22 м у Табаги) получил у мостового перехода по варианту 3. В этом случае у Покровска формируется наибольший подпор, составляющий 1,74 м.

#### **11.4. Гидравлическое моделирование заторных ситуаций у мостовых переходов разной конструкции в 20-метровом призматическом канале**

Для оценки правомерности результатов исследования, полученных на искаженной гидравлической модели участка Лены от Покровска до Якутска протяженностью 70 км, в Русловой лаборатории ГГИ были выполнены также специальные опыты на геометрически неискаженной модели фрагмента центральной части русла Лены в районе мостового перехода. С этой целью был сооружен экспериментальный призматический канал прямоугольного поперечного сечения шириной 5,0 м и длиной 20,0 м (рис. 11.22).

При назначенном горизонтальном и вертикальном масштабе модели 1:300 этот канал соответствует в натуре участку реки протяженностью 6000 м и шириной центральной зоны русла 1500 м. Это дало возможность в неискаженном варианте исследовать различные заторные ситуации у мостовых переходов разной конструкции в центральной части русла р. Лены и сопоставить результаты этих опытов с результатами, полученными на искаженной гидравлической модели.

При выбранном масштабе модельного канала 1:300, при соблюдении условия  $Fr=idem$  были получены следующие масштабные множители для пересчета модельных величин на натуру:

- для линейных величин в плане 300;
- для линейных величин по вертикали 300;
- для площадей в плане и по вертикали 90 000;
- для скорости течения 17,3;
- для расхода воды 1 557 000;
- для объемов 27 000 000;
- для уклона потока 1;
- для гидравлического масштаба времени 17,3.

В качестве имитатора льда также использовался листовая полиэтилен высокого давления низкой плотности 0,94 г/см<sup>3</sup> в виде квадратных плиток, нарезанных в соответствии с принятым линейным масштабом модели. На мо-



Рис. 11.22. Общий вид экспериментального стенда – 20-метрового канала прямоугольного поперечного сечения

дельном канале оценивались два вида мостовых опор: опора (шириной 8,5 м в натуре, соответствующая 2,83 см на модели) с вертикальным ледорезным ребром и опора такой же ширины с ледорезным ребром, наклоненным к горизонту под углом  $45^\circ$ .

С учетом линейного масштаба моделирования 1:300 в канале воспроизводилось 10 пролетов по первому варианту ( $18 \times 154$  м в натуре) и 4 полных пролета моста по второму варианту ( $2 \times 154 + 4 \times 308 + 10 \times 154$  м в натуре).

Сравнение результатов исследований ледопроектной способности мостовых переходов разной конструкции, полученных на гидравлической модели р. Лены и в призматическом канале прямоугольного поперечного сечения, обнаружило вполне удовлетворительную их сходимость.

Одинаковые варианты мостовых переходов в одинаковых гидравлических условиях привели к формированию заторов, вызвавших одинаковые или достаточно близкие по величине подъемы уровня воды и также близкие по величине скорости течения в заторных струях речного потока.

В качестве примера приведем результаты по вариантам мостовых переходов с пролетами 154 м и 308 м, которые в полном составе перехода представляются как  $18 \times 154$  м и  $2 \times 154 + 4 \times 308 + 10 \times 154$  м.

В опыте с проектным вариантом мостового перехода с пролетами 154 м, при расходе воды 0,33%-ной вероятности превышения на гидравлической модели подпорный подъем уровня воды составил 2,22 м, а максимальная скорость в заторном проране — 6,11 м/с; на призматическом канале прямоугольного поперечного сечения подпорный подъем уровня воды для этого же варианта составил 2,22 м, а максимальная скорость течения в заторном проране — 5,24 м/с.

В проектном решении с пролетами 308 м при расходе воды 0,33 %-ной вероятности превышения на гидравлической модели подпорный подъем уровня воды составил 1,2 м, а максимальная скорость течения в заторном проране — 4,72 м/с, а в призматическом канале прямоугольного поперечного сечения для этого варианта подпорный подъем уровня воды составил 1,05 м, а максимальная скорость течения в заторном проране — 3,59 м/с.

Если принять во внимание тот факт, что затор как природное явление со значительной случайной составляющей практически никогда не повторяется в точности, полученные на гидравлической модели и в экспериментальном канале результаты можно считать вполне сходящимися.

Анализ результатов лабораторного исследования льдопропускной способности мостовых переходов разной конструкции, выполненного в 20-метровом призматическом канале пятиметровой ширины, с привлечением для сравнения результатов аналогичных модельных исследований на жесткой пространственной гидравлической модели реки Лены, приводит к следующим основным выводам.

- Возведение мостового перехода на р. Лене в районе с. Табага по условиям заторообразования не усугубит гидравлико-морфологическую обстановку на реке, поскольку заторы льда, формирующиеся на этом участке реки почти ежегодно в естественном ее состоянии, приводят к подъему уровня воды, заметно превышающему таковые у мостовых переходов разной конструкции.
- Наилучшим вариантом мостового перехода по условиям пропуска весеннего ледохода и заторообразованию представляются мосты с пролетами 600 м в основном русле реки.
- В заторных ситуациях у этих мостов формируются наименьшие подпорные уровни воды и соответственно — меньшие скорости течения в заторных проранах.
- Близкими к этим лучшим показателями по величине подпорных уровней и величинам скоростей течения в заторных струях характеризуется мостовой переход с четырьмя пролетами по 308 м в центральной части русла.
- Наихудшими показателями по льдопропускной способности, величине подпорных уровней и скоростям течения в заторных проранах характеризуется мостовой переход с пролетами 154 м.
- Мостовые опоры с наклонным к горизонту и закругленным в плане ледорезным ребром облегчают пропуск ледохода, способствуя разлому льдин, уменьшению их заклинивания и аркообразования. Поэтому применение таких опор на мостовом переходе через Лену у с. Табага представляется предпочтительным.



## 11.5. Общие выводы по результатам исследований ледовых заторов на р. Лене у с. Табага на пространственной гидравлической модели и в 20-метровом призматическом канале

Совместный анализ результатов модельного исследования ледопропускной способности мостовых переходов разной конструкции через Лену у с. Табага с учетом полученного фото- и видеоматериала приводит к следующим выводам.

- Участок реки для сооружения на ней мостового перехода выбран удачно. Сочетание морфологических и гидравлических характеристик потока и русла в пределах этого участка реки таково, что образующиеся здесь в проектных условиях заторы льда приводят к существенно меньшим негативным последствиям по сравнению с таковыми в естественных условиях.
- Собственно мостовая часть перехода (опоры моста в русле реки) не вызывают заметного возрастания скоростей течения в подмостовом сечении реки. Увеличение скоростей течения проявляется только с момента затопления поймы и достигает 23 % (в условиях безледного периода) при расходе воды 63 000 м<sup>3</sup>/с исключительно за счет стеснения пойменного потока правобережной дамбой. При этом отверстие в правобережной дамбе вызывает уменьшение максимальных скоростей в основном русле на 10–13 %.

Наиболее сильное возрастание скоростей течения в подмостовом сечении реки наблюдается в ходе формирования заторного скопления льда у моста. Максимальные скорости течения в этом случае при всех вариантах мостового перехода составляют 3,5–4,5 м/с и могут достигать 6 м/с при устройстве мостового перехода по варианту 3 с глухой дамбой.

- Отверстие в правобережной дамбе в пределах русла Хаптагайской протоки не оказывает существенного разгрузочного влияния на заторную ситуацию ни по подпорным уровням, ни по уменьшению максимальных скоростей течения в заторе. Это вызвано высокими отметками дна в истоке Хаптагайской протоки и, в связи с этим, малой пропускной способностью ее русла.
- В связи с отмеченным, устройство отверстия в правобережной дамбе-насыпи в виде мостового перехода через протоку Хаптагайскую представляется малоэффективным и потому нецелесообразным. Вместе с тем, для обеспечения проточности Хаптагайской протоки (поддержания санитарного расхода воды в ней) рекомендуется заложить в теле дамбы-насыпи на участке пересечения ею русла Хаптагайской протоки несколько отверстий-проколов небольшого диаметра. Количество отверстий, их размер (и в целом суммарный расход воды), а также меры по обеспечению устойчивости русла Хаптагайской протоки у отверстий-проколов могут быть уточнены путем вариантных расчетов.
- Скорости течения в районе перехода газопровода через реку (в 8 км ниже мостового перехода) при всех фазах гидрологического режима и при всех заторных ситуациях у мостового перехода остаются на уровне

бытовых значений, и любая гидравлическая ситуация, складывающаяся у мостового перехода, не отражается на структуре течения в районе газопровода.

- Вместе с тем, при формировании затора на участке перехода газопровода скорости течения в его головной части могут достигать значений, аналогичных таковым в подмостовом сечении в условиях затора. Это обстоятельство, не связанное с влиянием мостового перехода, тем не менее должно быть принято во внимание службами, эксплуатирующими газопровод.
- Для пропуска весеннего ледохода, по значениям подпорных уровней воды, формирующихся в заторных ситуациях, наилучшим вариантом мостового перехода представляется вариант 1 по схеме  $(220+280+3\times 600+280+220)$  м), обеспечивающий при прочих равных условиях более эффективный пропуск ледохода, меньшую вероятность возникновения заторных ситуаций и меньшие подъемы уровня воды при формировании затора.
- Несколько худшими показателями, но все же близкими к варианту 1, характеризуются варианты 2 —  $(220+280+2\times 600+280+3\times \text{м})$  и 4 —  $(2\times 154+4\times 308+10\times 154)$  м). Существенно худшими показателями по условиям пропуска весеннего ледохода и величине подъема уровня воды в заторе характеризуется вариант 3 —  $(18\times 154)$  м).
- Угроза подтопления (частичного или полного затопления всей площади) возникает почти у всех населенных пунктов и хозяйственных объектов с отметкой поверхности земли 95,0 м БС и ниже. Вне опасности затопления в любых естественных и проектных ситуациях оказываются только населенные пункты Чапаево и Нижний Бестях.
- Наиболее подверженными возможному подтоплению в естественных и тем более в проектных условиях оказываются пункты Техтюр, Табага Нижняя, Хатассы.

## **ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И ГИДРАВЛИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ АВАРИЙНЫХ РАЗЛИВОВ НЕФТИ В РЕКАХ**

В последнем десятилетии XX века в России произошли крупные аварии на магистральных нефтепроводах, приведшие к выходу больших объемов нефти в окружающую среду и, в частности, в реки. Экологический, экономический и социальный ущерб от этих аварий оказались столь значительными, что заставили принять ряд незамедлительных мер административного, организационного и научно-технического характера, направленных на борьбу с этими явлениями.

Для научного обоснования комплекса технических мероприятий по предотвращению аварийных разливов нефти и ликвидации их последствий в Отделе русловых процессов ГГИ был выполнен большой объем научно-исследовательских работ, включающий гидравлическое моделирование аварийных разливов нефти в реках на физических моделях речных русел.

### **12.1. Причины аварийных разливов нефти**

Аварийные разливы нефти в реках на участках пересечения их нефтепроводами обусловлены следующими обстоятельствами.

Прежде всего, это несовершенство первоначальных проектов прокладки трубопроводов в реках, часто недостаточно учитывающих или совсем не учитывающих характер и возможные размеры деформаций речного русла, приводящих к разрыву труб речным потоком на участках размыва речного дна.

Во-вторых, практически исчерпанный к концу прошлого века технический ресурс большинства магистральных нефтепроводов, и в связи с этим участвовавшие случаи разгерметизации труб не только на участках переходов их через реки, но и в пределах линейной части на суше, в частности, на участках береговых склонов русел и склонов речных долин.

В-третьих, разгерметизация труб из-за дефектов, образовавшихся при их изготовлении, не обнаруженных в ходе дефектоскопии и испытаний трубопровода и проявившихся в рабочем режиме трубопровода. Это преимущественно свищевые и шовные нарушения целостности труб.

В зависимости от морфологии речного русла и поймы, сезона года, фазы водного режима, конкретных гидрометеорологических условий, объема вылившейся нефти, места и характера разгерметизации трубопровода распространение нефти в реке происходит в разных формах, с разной скоростью и разными путями, что предопределяет многовариантность организации рубежей ее перехвата, способов и технических средств локализации нефтяного разлива и состава оборудования для устранения нефти с водной поверхности.

## 12.2. Методы определения путей и скорости распространения аварийных разливов нефти в реках

В условиях открытого русла пространственная кинематическая структура потока определяется морфологией русла (его типом), фазой гидрологического режима (расходом и уровнем воды и погодными условиями (полем ветра)). Эти же факторы, а также форма излияния и объем вылившейся нефти определяют характер и скорость распространения нефтяного разлива в реке. Поэтому именно они должны оцениваться в предварительных проработках возможных гидрометеорологических и других отмеченных ситуаций.

Такие проработки осуществляются в основном тремя методами: расчетным методом, выполнением натурных наблюдений и экспериментов и методом лабораторного гидравлического моделирования участков рек в зоне пересечения их магистральными нефтепроводами.

Расчетный метод предусматривает построение плана течений при разных расходах и соответствующих им уровнях воды. На основе совместного анализа плана течений с полем ветра определяются возможные варианты пути и скорости распространения аварийного разлива нефти для разных начальных точек разгерметизации трубы: в левобережной, центральной, правобережной зонах русла, а также в приурезовых зонах при стекании нефти с суши в реку.

Метод натурных наблюдений и экспериментов предусматривает измерение скоростей течения в реке (в частности, поля поверхностных скоростей течения) при разных расходах и уровнях воды с фиксацией структуры вторичных течений (зон отрыва транзитного потока, водоворотных и застойных зон, сбойных течений, зон бифуркации). Каждая такая серия наблюдений и измерений сопровождается выпуском на воду какого-либо имитатора нефтяного разлива из разных точек по ширине реки над створом перехода нефтепровода.

В ходе отслеживания траектории имитатора нефти выполняются измерения скорости и направления ветра. Применительно к каждой гидрологической и погодной ситуации строится схема пути распространения нефтяного разлива с указанием времени достижения головной частью нефтяного пятна характерных участков реки.

Натурный метод отслеживания траектории «нефтяного разлива» оказывается значительно более надежным по сравнению с расчетным, но ограничен диапазоном действительно наблюдаемых гидрометеорологических ситуаций. В зимний период, в условиях ледостава полностью исключается ветер как определяющий фактор и диапазон изменения гидравлических характеристик (расход и уровень воды, скорость течения под ледяным покровом) незначителен. Вместе с тем, существенно варьирующим фактором в зимних условиях может быть состояние нижней поверхности льда: она может быть относительно гладкой и ровной, гладкой и волнистой, торосистой и сильно торосистой и этим оказывать существенное влияние на характер, форму, траекторию и скорость распространения нефтяного разлива.

Метод лабораторного гидравлического моделирования аварийных разливов нефти в реках применяется как расчетно-имитационный метод [122, 123].

Существо его заключается в том, что собственно рельеф русла и русловой поток воспроизводятся на модели с соблюдением требований геометрического, кинематического и динамического подобия, а аварийный разлив нефти на открытой воде или под ледяным покровом имитируется с помощью различных материалов-заменителей, достаточно надежно воспроизводящих суть исследуемых процессов и вместе с тем значительно упрощающих в технологическом отношении выполнение собственно эксперимента.

Требования геометрического, кинематического и динамического подобия выражаются следующими условиями.

Геометрическое подобие выражается условием:

$$\frac{B_H}{H_H} = \frac{B_M}{H_M} \text{ или } \frac{B}{H} = idem,$$

где  $B$  — характерная ширина потока,  $H$  — характерная глубина потока, индексы «н» и «м» обозначают принадлежность величины натуре или модели соответственно.

Кинематическое подобие выражается условием:

$$Re_M > Re_{кр},$$

где  $Re_{мод}$  — число Рейнольдса модельного потока, выражаемое формулой

$$Re_M = \frac{H_M v_M}{\nu}$$

(здесь  $v_M$  — характерная скорость модельного потока,  $\nu$  — кинематический коэффициент вязкости;  $Re_{кр}$  — критическое число Рейнольдса, разграничивающее потоки ламинарного и турбулентного режимов течения).

Динамическое подобие выражается условием

$$Fr_M = Fr_H \text{ или } Fr = idem,$$

где  $Fr$  — число Фруда, выражаемое формулой

$$Fr = \frac{v}{\sqrt{gh}}.$$

Поскольку нефть представляет собой поверхностно активное вещество, и ее распространение даже на покоящейся водной поверхности подчинено силам поверхностного взаимодействия, в числе критериальных условий должен бы фигурировать критерий Вебера, выражаемый зависимостью

$$We = \frac{\rho U^2 L}{C_K},$$

где  $\rho$  — плотность вещества,  $U$  — скорость распространения вещества под действием сил поверхностного взаимодействия,  $L$  — некоторый линейный размер,  $C_K$  — капиллярная постоянная. Подобие процесса распространения поверхностно активного вещества на модели водного объекта достигается выполнением условия

$$We = idem.$$

Однако, как выяснилось в ходе натуральных наблюдений распространения в реках аварийных разливов натуральной нефти и в ходе специально поставленных натуральных и лабораторных экспериментов, выполнение условия  $We=idem$  не требуется, поскольку подавляющая часть объема вылившейся в реку нефти распространяется, перемещаясь вниз по течению водотока, как консервативное вещество.

### **12.3. Основные свойства поведения нефти в водной среде**

Прежде чем приступить к исследованиям распространения аварийных разливов нефти на гидравлических моделях участков конкретных рек в Русловой лаборатории ГГИ, ее сотрудниками был изучен опыт наблюдений этого явления, сформировавшийся у очевидцев реальных аварий на магистральных нефтепроводах России, проанализированы материалы, опубликованные в разных научно-технических журналах отечественных и зарубежных издательств, а также выполнены собственные эксперименты в лабораторных и натуральных условиях.

Осмысление этих достаточно обширных и разносторонних материалов и сведений привело к установлению следующих основных видов взаимодействия нефти с водной средой в разных гидрометеорологических условиях и в разных случаях разгерметизации трубопровода.

#### **12.3.1. Нефть на открытой водной поверхности**

В Русловой лаборатории был создан небольшой замкнутый водоем в форме квадрата со стороной около 3 м. В центральную зону этого водоема на неподвижную чистую поверхность воды помещались мелкие бумажные поплавки компактной группой в форме круга диаметром около 5,0 см. Как только в центр этого поплавочного круга подавалась одна капля натуральной нефти, поплавки быстро перемещались по радиальным направлениям, образуя на поверхности воды кольцо диаметром около 1,0 м. Повторение этого эксперимента с новой порцией поплавков приводило к образованию нового кольца, вытеснявшего первое кольцо дальше на периферию и занимавшего его место.

Эксперимент по такому сценарию продолжался до тех пор, пока первое кольцо поплавков (т. е. тонкая, мономолекулярная пленка нефти) не достигало бортов водоема. После этого последующие капли нефти уже не распространялись в тонкую пленку, а оставались на том же месте в виде компактных линзочек.

В этом эксперименте акватория водоема была небольшой, и тонкая нефтяная пленка быстро уперлась в борта водоема. Вместе с тем, эксперимент подводил к предположению, что на достаточно большой водной акватории тонкая нефтяная пленка, распространившись по поверхности воды на большой площади, но в то же время не достигнув еще бортов водоема, способна оказывать сдерживающий эффект на последующие порции нефти, вносимой в центральную зону тонкослойного пятна.

Если приведенное предположение верно, то в этом случае порции нефти оставались бы в неизменной форме и неизменных размерах на поверхности по-

коящейся воды или же распространялись бы на поверхности речного потока под воздействием его турбулентной структуры.

Для проверки высказанных предположений эксперимент был вынесен из лаборатории на натуральный объект — реку Ждановку в Санкт-Петербурге (в районе Петровского стадиона). Река Ждановка здесь начинается по существу рукавом или протокой Малой Невы. Предполагалось вылить на поверхность реки в срединной ее зоне небольшое количество (около 250 см<sup>3</sup>) растительного масла, окрашенного пищевым красителем в голубой цвет, и далее наблюдать за его распространением по течению. Ожидалось, что вначале произойдет формирование тонкослойной структуры масляного пятна в виде круга достаточно большого размера, а затем какая-то часть вылитого масла останется в центральной зоне пятна в виде компактного элемента, перемещение которого по реке (равно, как и в целом тонкослойного пятна) будет происходить сообразно структуре поля актуальных скоростей течения в приповерхностном слое речного потока.

Однако оказавшись на водной поверхности, растительное масло сохраняло компактность первоначального разлива без образования тонкослойного пятна (хотя растительное масло характеризуется значительно большей, чем нефть, активностью как поверхностно активное вещество).

Наблюдение за масляным разливом на протяжении примерно 1,0 километра, обнаружило некоторое увеличение его размеров, но примерно в таких же пределах, как и других плавущих по реке предметов (опилок, древесных стружек, листьев и прочего сора).

Осмысление этого результата с учетом погодной обстановки и других внешних условий еще раз привело к выводу о том, что загрязненная нефтепродуктами водная поверхность не способствует образованию тонкослойной пленки вновь поданного на нее поверхностно активного вещества, оказывая сопротивление его пространственному распространению. Оказалось, что во время выполнения этого эксперимента, и даже несколько раньше его начала, наблюдавшийся тогда ветер южного направления, нагнал с акватории Малой Невы в Ждановку нефтяные и масляные загрязнения, создавшие в ней сплошной масляно-нефтяной покров, который и препятствовал тонкослойному распространению нашего имитатора нефти — подкрашенного растительного масла.

Ядро нефтяного разлива, оставшееся на тонкослойной пленке этого же разлива или фонового загрязнения водного объекта, формируется в виде мелколинзочных, крупнолинзочных, лоскутных и ковровых образований. Размеры лоскутных и ковровых образований варьируют в довольно широком диапазоне в зависимости от объема разлившейся нефти и размеров самого водного объекта.

Перемещаясь вниз по течению реки, нефтяное пятно увеличивается в поперечных размерах под влиянием продольной и поперечной компонент актуальной скорости речного потока.

Если нефть подается в речной поток в течение какого-то времени некоторым постоянным расходом, то на поверхности реки образуется нефтяной непрерывный шлейф с границами сложной (неправильной) формы, но с четкой тенденцией последовательного расширения в соответствии с зависимостью

$$b_{\text{шл}} = \frac{L}{\bar{V}_{\text{пов}}} 0,5 V_*, \quad (12.1)$$

где  $b_{\text{шл}}$  — ширина нефтяного шлейфа на расстоянии  $L$  от точки выпуска нефти на воду;  $\bar{V}_{\text{пов}}$  — средняя скорость речного потока в поверхностном слое на участке  $L$ ;  $V_*$  — динамическая скорость (или скорость турбулентного трения); 0,5 — коэффициент связи осредненного во времени и по глубине значения поперечной компоненты актуальной скорости с динамической скоростью потока.

На рис. 12.1 показан расширяющийся с удалением от судна шлейф растительного масла, выпущенного в р. Иртыш в качестве имитатора нефти на Учениях по борьбе с аварийными разливами нефти «Омск–95».

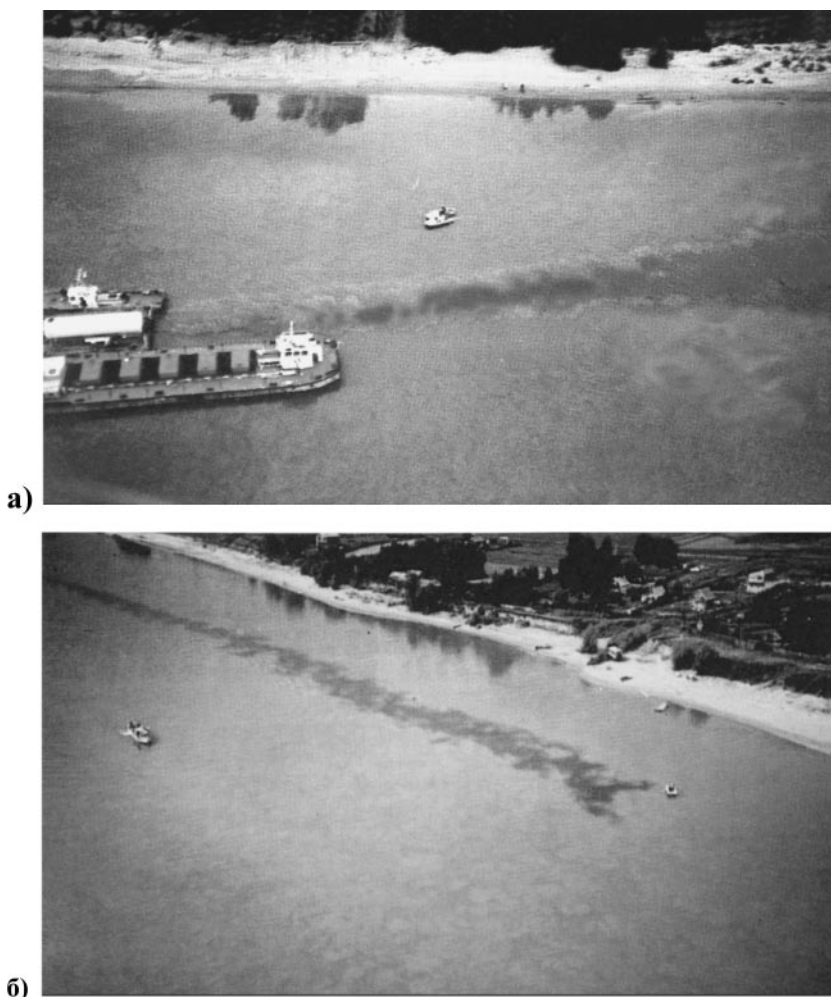


Рис. 12.1. Распространение имитатора нефти на р. Иртыш в ходе учений по борьбе с аварийными разливами нефти «Омск–95»: а — шлейф имитатора на начальном участке; б — шлейф имитатора на расстоянии 1,5 км от точки выпуска



Движение масляного шлейфа в реке на Учениях «Омск–95» проходило в безветренную погоду, поэтому траектория масляного шлейфа и другие его параметры были сформированы исключительно воздействием поля осредненных и актуальных скоростей течения в приповерхностном слое речного потока.

Форма и параметры масляных шлейфов на рис. 12.1 (а) (начальный участок) и на рис. 12.1 (б) (конечный участок) [252] соответствуют приведенному выше описанию и зависимости (12.1).

В ходе Учений «Омск–95» проявился замеченный ранее в экспериментах на малой реке процесс «истощения» (утраты) пигмента, которым подкрашивалось растительное масло. По этой причине ширина масляного шлейфа, достигая 20 м примерно на половине пути от точки выпуска до бонового заграждения (это около 900 м), оставалась далее по визуальной оценке неизменной, хотя по расчету по (12.1) должна была достичь 40 м на подходе к боновому заграждению. Такое несогласие расчета с фактическим наблюдением вызвано тем, что периферийные зоны масляного шлейфа утрачивают толщину слоя быстрее, чем его центральное ядро, и вместе с толщиной слоя утрачивают и интенсивность цвета из-за малого количества пигмента, в связи с чем периферийные зоны масляного шлейфа становятся визуально невидимыми.

Это свойство цветного индикатора нефти — окрашенного растительного масла, отчетливо проявляется на рисунке: на начальном участке выпуска (рис. 12.1 (а)) контраст масляного шлейфа с фоном речной воды значительно более заметен, чем на конечном участке (рис. 12.1 (б)).

Еще более убедительной иллюстрацией этого свойства является фотография растекания тоже окрашенного растительного масла на малой реке Юля-Йоки (Карельский перешеек).



Рис. 12.2. Распространение имитатора нефти (растительное масло) и алюминиевой пудры на открытой водной поверхности р. Юля-Йоки (течение справа налево). Белое обрамление неправильной формы — это алюминиевая пудра, перемещенная тонкослойным разливом масла на его внешнюю границу

На поверхность воды в течение некоторого времени одновременно подавались алюминиевая пудра и окрашенное растительное масло. Распространяясь по поверхности тонкой пленкой действием сил поверхностного взаимодействия, растительное масло раздвинуло алюминиевую пудру на внешнюю границу своего разлива (на рис. 12.2 это представлено полосами белого обрамления). В центральной части масляного тонкослойного разлива просматривается шлейф масляного ядра, проявляющийся по характеру распространения как консервативное вещество, а в лидирующей части масляного разлива (левый фрагмент на рис. 12.2) этого шлейфа уже совсем не видно из-за его слишком тонкого слоя.

Точно также распространяется на поверхности речного потока и натуральная нефть: ее первоначальный тонкослойный разлив воспринимается визуально как интерферирующая пленка (радужина); ядро или шлейф нефтяного разлива обнаруживается в виде линз разного размера, лоскутьев и ковров темно-коричневого цвета.

Перемещаясь по реке, обособленные линзы могут сливаться, превращаясь в более крупные элементы. В то же время лоскутья могут дробиться на меньшие элементы, равно как и от ковровых элементов могут отделяться периферийные их части. В целом ядро нефтяного разлива, распространяясь под влиянием турбулентности речного потока, распластывается, как и растительное масло, в тонкослойное состояние, утрачивая свойственный нефти темно-коричневый цвет.

Одинаковость поведения нефти и растительного масла на поверхности открытой воды послужила основанием для использования последнего в качестве имитатора натуральной нефти и в проведенных на разных реках учениях по борьбе с аварийными разливами нефти, и в многочисленных натуральных и лабораторных экспериментах.

Вместе с тем, поскольку тонкослойный разлив нефти препятствует дальнейшему распластыванию ядра как поверхностно активного вещества, это открыло возможность отказаться от использования в экспериментах в качестве имитаторов натуральной нефти поверхностно активных заменителей, а применять различные удобные для работы вещества, рассеяние которых осуществляется лишь механизмом речной турбулентности. Наиболее подходящим материалом для этих целей оказалась алюминиевая пудра, обладающая хорошей отражательной способностью и поэтому надежно фиксируемая фото- и видеосъемкой.

На распространение нефтяного разлива по поверхности потока существенное влияние оказывает ветер (скорость и направление воздушного потока). Оказавшись под действием ветра в той или иной зоне речного потока, нефтяной разлив с меньшей или большей скоростью переносится вниз по течению реки, достигая за разное время определенных объектов, требующих защиты от нефтяного загрязнения.

В ряде случаев траектория нефтяного разлива складывается под действием ветра таким образом, что, независимо от времени распространения, нефтяной разлив накрывает какую-либо охранную зону речной акватории (например, зону размещения водозабора). Поэтому учет ветра как фактора, определяющего тракт и скорость распространения нефтяного разлива, является обязательным элементом в программах модельных экспериментов, предпринимаемых для

разработки рекомендаций по выработке противоаварийных мер, включающих установление рубежей перехвата нефтяного разлива, приемы его локализации и последующего устранения с водной поверхности.

Даже в сравнительно простом в гидравлико-морфологическом отношении русле, каковым является верхний участок реки Невы, ветер скоростью 5–7 м/с (натурное значение) заметно изменяет положение «нефтяного» шлейфа на акватории реки и скорость его движения вниз по течению (рис. 12.3).

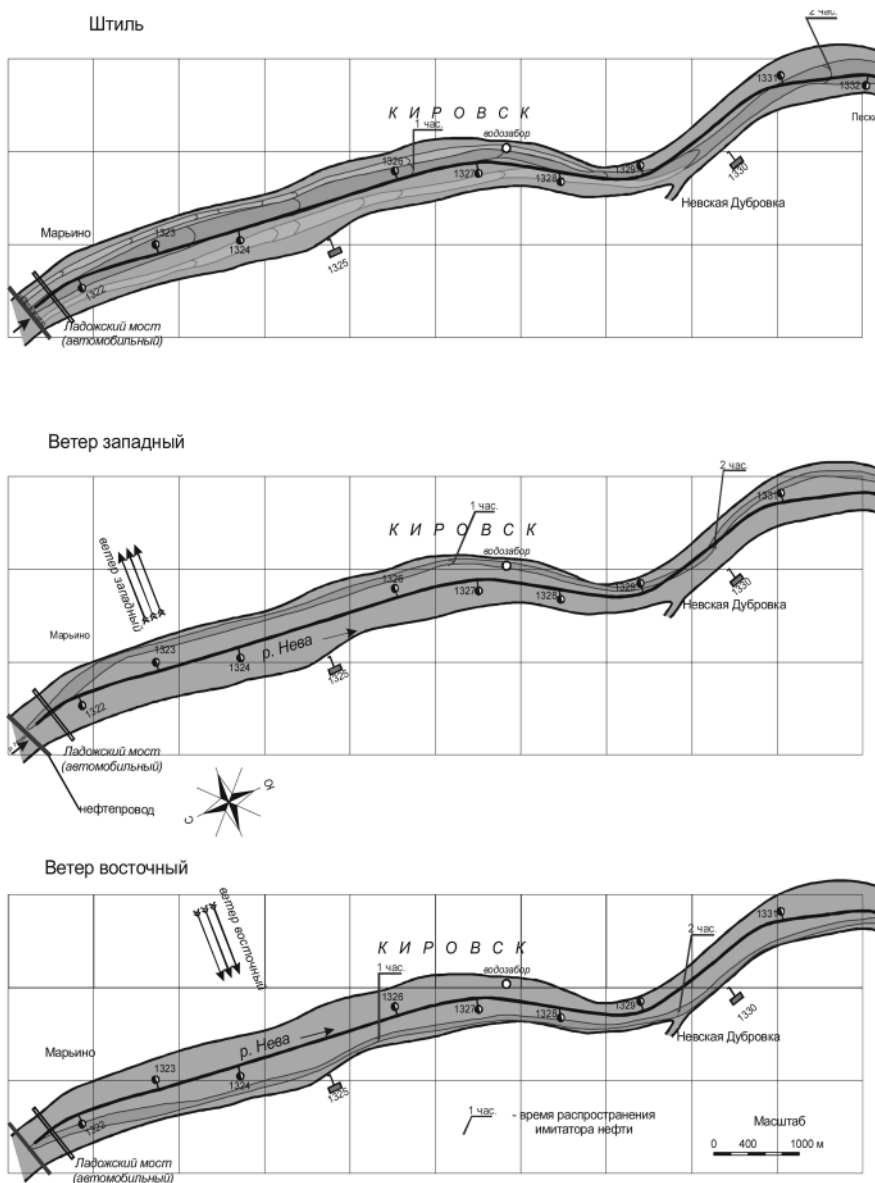


Рис. 12.3. Схема распространения имитатора нефти на модели р. Невы в разных погодных условиях

В штилевую погоду три шлейфа имитатора, выпущенного над нефтепроводом в левобережной, центральной и правобережной зонах реки, перемещаются вниз по течению «параллельно» друг другу и берегам реки и только в сужении русла у Невской Дубровки сливаются в единый шлейф. Голова центрального шлейфа, перемещаясь с относительно большей скоростью, чем прибрежные шлейфы, достигла поселка Пески (1331,6 километр судового хода по лоцманской карте) через 2 часа после выпуска.

При западном ветре центральный шлейф довольно быстро смещается в левобережную зону русла и через 2 часа достигает только 1330 километра судового хода, а при восточном ветре он оказывается в правобережной зоне реки и через 2 часа достигает только 1329,6 километра судового хода.

На рис. 12.3 видно, что даже при несильном ветре (5–7 м/с), при сравнительно нешироком русле (600–800 м) и довольно высоких берегах реки (6–8 м), экранирующих ветры поперечного к течению реки направления, разница в пути, пройденном центральным шлейфом всего на 10-километровом участке слабоизвилистого русла в штилевую и ветреную погоду за 2 часа распространения по реке «нефтяного» разлива, составила 2 км, т. е. 20 % протяженности этого участка реки.

На рис. 12.3 видно также, что «нефтяной» шлейф, выпущенный из центральной зоны русла над нефтепроводом, смещаясь под влиянием западного ветра к левому берегу реки, накрывает акваторию городского водозабора Кировска. А поскольку ниже по течению на Неве действуют десятки питьевых и технических водозаборов, проблема защиты их от загрязнения аварийными разливами нефти или нефтепродуктов, с учетом возможности различных ветровых ситуаций, оказывается чрезвычайно актуальной.

Возможные варианты распространения аварийных разливов нефти в реках более сложного морфологического типа рассмотрены ниже при описании некоторых Учений, состоявшихся в региональных производственных службах АК «Транснефть».

### **12.3.2. Нефть под ледовым покровом**

Поведение нефти в водной среде под ледовым покровом изучалось в ходе натуральных экспериментов на реках Сестра, Юля-Йоки, Белая у г. Уфы, Белая у д. Массадэ, Обь у с. Локосово, Нева у д. Марьино и в лабораторных гидравлических лотках Руслевой лаборатории ГГИ.

Натуральная нефть в водной среде сохраняет (в отличие от ее поведения на открытой водной поверхности) компактность объема. При выходе в водную среду у дна нефть утрачивает первоначальный импульс избыточного давления в зоне разгерметизации трубопровода и затем перемещается под действием архимедовой силы вверх, к нижней поверхности льда в виде отдельных элементов разных размеров и формы.

Преимущественно это элементы шарообразной формы размером от долей миллиметра до нескольких сантиметров. Более крупные элементы, вступая в контакт со льдом, уплощаются под действием архимедовой силы примерно до

размеров 8 мм по вертикали. При достаточно длительном поступлении нефтяных элементов к нижней поверхности льда в покоящейся водной среде происходит слияние отдельных элементов с образованием лоскутов разнообразной формы и более крупных ковровых скоплений.

При наличии приледного течения воды нефтяные элементы приходят в движение, и в этом случае наряду с объединением (слиянием) отдельных элементов происходит разделение элементов на части, отделение периферийных частей ковровых элементов. При этом вертикальный размер (толщина) крупных элементов остается близкой к 8 мм, т. е. увеличение объема элементов в процессе их слияния происходит за счет увеличения площади.

Под незначительно наклоненной поверхностью (около  $1^\circ$ ) нефтяные шарики и линзочки перекатываются, а ковровые элементы сползают (соскальзывают) в направлении более высоких отметок. В условиях торосистой нижней поверхности или куполообразных впадин и тупиковых трещин в ней нефть накапливается в этих элементах ледяного рельефа до значительных объемов (толщин) и может удерживаться в покое даже при наличии достаточно развитого течения в реке. При этом периферийные слои нефти, контактирующие с транзитным потоком, могут небольшими частями отделяться от общего объема и переноситься вниз по течению.

В целом механизм выведения нефтяных элементов из состояния покоя и последующего их движения в потоке весьма близок механизму переноса потоком частиц речного аллювия. Движение начинается под воздействием реальных мгновенных скоростей потока и далее совершается в соответствии со структурой его турбулентности.

Распространение нефтяных элементов по глубине подледного потока и форма их движения определяются соотношением гидравлической крупности нефтяных частиц и вертикальной компоненты мгновенной скорости потока.

Гидравлическая крупность (скорость всплывания нефтяных элементов) исследовалась И.Л. Калюжным. Результаты этой работы приведены в табл. 12.1, ранжированной нами по крупности капель нефти.

В табл. 12.1 прослеживается общая закономерность увеличения скорости всплытия капель нефти с увеличением их объема до некоторой величины. С увеличением объема от  $0,0001 \text{ см}^3$  до  $0,450 \text{ см}^3$  (соответственно радиуса капли от 0,2 мм до 4,75 мм) скорость всплытия возрастает от 0,91 см/с до 12,5 см/с. Дальнейшее увеличение крупности капель приводит к уменьшению скорости всплытия, вызванному заметным отклонением от прямолинейного движения по вертикали всплывающих крупных капель. Это свойство всплывающих капель проявляется и на каплях меньшего размера. Визуально отклонение таких капель из-за своей незначительности не обнаруживается, но именно оно является основной причиной несогласия скоростей всплытия с размером капель, обнаруживающегося в ряде строк табл. 12.1.

Если гидравлическая крупность самых мелких частиц нефти оказывается большей осредненного значения вертикальной компоненты актуальной скорости в приледной зоне речного потока (оцениваемой приближенно соотношением (3.10)), все нефтяные элементы, достигшие нижней поверхности льда,

**Таблица 12.1. Гидравлическая крупность (скорость всплытия) нефтяных капель в зависимости от их размера**

№ п/п	Объем капли, см <sup>3</sup>	Время всплытия, с	Скорость всплытия, см/с	Эффективный радиус капли, мм
1	0,0001	109,6	0,91	0,20
2	0,0002	25,5	3,92	0,75
3	0,001	19,6	5,10	1,10
4	0,006	19,8	5,05	2,30
5	0,047	10,4	9,61	2,24
6	0,050	10,4	9,61	2,28
7	0,052	10,0	10,0	2,33
8	0,055	10,1	9,9	2,36
9	0,065	9,6	10,4	2,49
10	0,070	10,0	10,0	2,55
11	0,072	11,0	9,1	2,58
12	0,085	9,6	10,4	2,74
13	0,125	9,2	10,9	3,10
14	0,145	9,0	11,1	3,26
15	0,150	8,7	11,5	3,29
16	0,150	8,0	12,5	3,30
17	0,155	8,6	11,6	3,33
18	0,155	8,6	11,4	3,33
19	0,190	8,6	11,6	3,57
20	0,200	8,5	11,8	3,63
21	0,220	8,5	11,8	3,76
22	0,238	8,4	11,9	3,83
23	0,277	8,0	12,5	4,05
24	0,290	8,3	12,0	4,11
25	0,300	8,4	11,9	4,16
26	0,300	8,3	12,0	4,15
27	0,305	8,5	11,8	4,16
28	0,320	8,2	12,2	4,18
29	0,370	8,2	12,2	4,45
30	0,370	8,1	12,5	4,45
31	0,390	8,1	12,3	4,54
32	0,400	8,1	12,4	4,50
33	0,400	8,1	12,3	4,57
34	0,450	8,0	12,5	4,75
35	0,450			
36	0,475	8,2	12,1	4,84
37	0,503	8,3	12,0	4,93
38	0,530	8,2	12,1	5,02
39	0,534	9,0	11,1	5,05

перемещаются по течению в контакте с нею или с очень кратковременными отрывами и на очень небольшое расстояние от нее.

Вместе с тем в процессе подъема из зоны разгерметизации нефтепровода к поверхности нефтяные элементы в некотором диапазоне крупности (и тем более частицы малого размера), оказываясь в зоне действия максимальных значений вертикальной компоненты актуальной скорости потока, движутся по сложным траекториям, а наиболее мелкие могут длительное время находиться в толще речного потока, не достигая нижней поверхности льда.

Если гидравлическая крупность наиболее крупных нефтяных частиц шарообразной формы оказывается меньшей осредненного значения вертикальной компоненты актуальной скорости в приледной зоне речного потока, все нефтяные элементы перемещаются вниз по течению с достаточно частым отрывом от нижней поверхности льда, т. е. скачкообразно. Высота и длина скачков увеличиваются с уменьшением размера частиц, а наиболее мелкие частицы нефти распространяются на всю глубину. Здесь, как и в первом случае в ходе подъема от дна, частицы нефти испытывают воздействие пульсирующей скорости речного потока, приводящее, однако, к существенно большему «искривлению» их траекторий.

Очевидно, что между этими предельными могут быть промежуточные ситуации в соотношениях гидравлической крупности нефтяных элементов и актуальных значений компонент скорости потока. В этих конкретных ситуациях формируется соответствующий им режим движения (скорость и форма переноса) нефтяных элементов разного размера.

Определенно установлено и в лабораторных, и в натуральных экспериментах, что мелкие нефтяные частицы перемещаются вниз по течению реки быстрее, чем более крупные, поскольку они чаще утрачивают контакт со льдом и оказываются в зоне относительно больших продольных скоростей потока, чем крупные частицы. Здесь также наблюдается полная аналогия с движением речных наносов.

В процессе перемещения нефтяных частиц по течению на них оказывает влияние и поперечная компонента актуальной скорости потока. В связи с этим частицы нефти распространяются не только по глубине, но и по ширине подледного потока.

Рассеяние нефтяных частиц по ширине подледного потока изучалось на р. Оби у с. Локосово [281]. Эксперимент выполнялся следующим образом. Во льду устраивалась прорезь длиной 50 м, ориентированная поперек потока. Из середины прорези по нормали к ней разбивался продольный створ, по которому просверливались пусковые лунки, удаленные от поперечной прорези на 10, 25, 50 и 100 м. Выпуск нефти в приледный слой речного потока начинался с ближней к прорези пусковой лунки.

Нефть подавалась в поток в полиэтиленовой бутылке с обрезанным дном, диаметр которой был несколько меньшим диаметра лунки. Благодаря этому удавалось аккуратно проталкивать в лунку бутылку с нефтью открытым концом вниз, сохраняя ее вертикальность, с тем, чтобы нефть не выливалась из бутылки преждевременно при проталкивании ее под лед. Выйдя из лунки в поток, бутылка опрокидывалась течением, нефть свободно всплывала к нижней поверхности льда и начинала перемещаться вниз по течению.

В экспериментах фиксировались следующие характеристики: толщина снега и льда вблизи пусковых лунок, время движения нефтяных частиц от пусковых лунок до поперечной прорези, ширина рассеяния нефтяных частиц в поперечной прорези, скорость течения в приледном слое. Визуально оценивался характер распределения нефтяных частиц разной крупности в поперечной прорези. Результаты этих экспериментов приведены в табл. 12.2.

**Таблица 12.2. Характеристики движения нефтяных частиц в приледном слое речного потока**

№ пусковых лунок	Расстояние от пусковых лунок до прорези, м	Толщина льда у пусковой лунки, см	Высота снежного покрова у пусковой лунки, см	Время движения нефтяных частиц от лунки до прорези, с	Ширина рассеяния нефтяных частиц в поперечной прорези, м
1	10	82	32	61	1,1
2	25	80	29	143	1,8
3	50	85	26	275	2,6
4	100	92	23	525	4,5

Приведенным в табл. 12.2 данным может быть дано следующее пояснение. Время движения нефтяных частиц от пусковой лунки до улавливающей поперечной прорези измерялось по появлению первых пятен, интерферирующих на поверхности воды в прорези. Такие пятна могли дать самые мелкие нефтяные частицы, движущиеся с относительно наибольшей скоростью. Их размер настолько мал, что в условиях слабого естественного освещения (эксперимент проводился в вечернее время), да еще на фоне темной воды они как частицы не воспринимаются невооруженным глазом, но хорошо заметны в интерферирующей пленке (радужине).

Дополнительными наблюдениями при выпуске нефти из третьей и четвертой пусковых лунок установлено, что более крупные частицы нефти появляются в улавливающей прорези заметно позже, чем радужина. Крупные частицы из третьей лунки появились в прорези через 330 с, а из четвертой лунки — через 580 с, т. е. почти на 1 минуту позже радужины.

Массовое появление крупных нефтяных частиц в улавливающей поперечной прорези при выпуске нефти из четвертой пусковой лунки наблюдалось через 645 секунд, т. е. на 2 минуты позже радужины. Эти результаты убедительно подтверждают описанный выше механизм движения нефтяных частиц в приледном слое речного потока.

Нарушение линейной зависимости в рассеянии нефтяных частиц по ширине подледного потока с удалением от пусковой лунки вызвано некоторым несовершенством способа введения нефти под нижнюю кромку льда. Бутылка с нефтью, выталкиваемая шестом под лед, всегда оказывается на некотором расстоянии от нижней поверхности льда, где поперечная компонента актуальной скорости речного потока существенно превышает ее значения в собственно



приледном слое. Кроме того, сама бутылка в процессе излияния нефти из нее является источником дополнительной турбулизации (возмущения) речного потока. Эти два обстоятельства вызывают значительно более интенсивное начальное рассеяние нефтяных частиц по сравнению с более удаленными от пусковой лунки участками, где нефтяные частицы перемещаются преимущественно в контакте с нижней поверхностью льда или в непосредственной близости от нее.

В связи с тем, что мелкие нефтяные частицы, перемещаясь подо льдом, совершают более часто и более высокие скачки, чем крупные нефтяные частицы, они формируют периферийные зоны факела рассеяния. Крупные частицы нефти формируют центральную зону факела рассеяния. Эта закономерность достаточно хорошо прослеживалась в улавливающей поперечной прорези (рис. 12.4).

На Оби были проверены результаты лабораторных экспериментов, направленных на установление наиболее эффективных способов локализации нефтяного разлива под ледяным покровом [220]. В лаборатории исследовались два варианта локализации: направляющая прорезь в ледяном покрове и направляющий экран под ледяным покровом. И прорезь, и экран ориентировались под некоторым углом к направлению осредненного течения ( $30\text{--}50^\circ$ ). В этом диапазоне углов и в прорези, и вдоль экрана образуется устойчивое продольно-винтовое течение, переносящее нефтяные частицы на удобный для их сбора участок водотока.

Эксперименты на Оби выполнялись при толщине льда  $90\text{--}108$  см. Вариант с направляющим экраном реализовывался деревянными щитами специальной конструкции, исключающей утечку нефти между ними. Длина направляющего экрана, установленного в центральной зоне русла под углом около  $30^\circ$  к направлению осредненного течения на этом участке реки, составила  $300$  м (рис. 12.5).

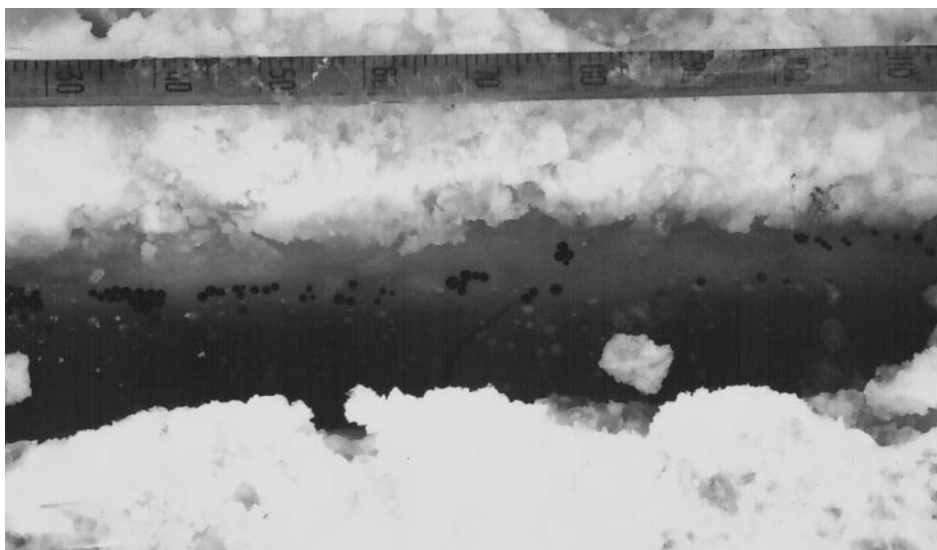


Рис. 12.4. Крупные нефтяные частицы, концентрирующиеся в центральной зоне улавливающей прорези



Рис. 12.5. Установка в ледяном покрове нефтенаправляющего экрана на р. Оби у с. Локосово, март 1999 г. (вид против течения)



Рис. 12.6. Изготовление 10-метровой направляющей нефтеулавливающей прорези на р. Оби у с. Локосово, март 1999 г. (вид по течению)

Направляющая прорезь длиной 10 м и шириной 0,5 м была выполнена также под углом  $30^\circ$  к направлению осредненного течения в реке (рис. 12.6). Несмотря на малую протяженность (поскольку уже заранее как основной был принят вариант с экраном), в прорези устанавливалось продольно-винтовое

течение, переносящее частицы нефти, перехваченные прорезью, к низовому ее концу.

Эксперимент, повторенный через сутки, когда в прорези образовался свежий прозрачный лед, показал, что и в замерзшей с поверхности прорези действует продольно-винтовое течение: поданная к верхней кромке прорези нефть, всплывала в ней к нижней поверхности вновь образовавшегося ледяного покрова и затем переносилась практически в контакте со льдом к нижней оконечности прорези.

Этот эксперимент убедительно подтвердил результаты лабораторных опытов и вместе с тем показал перспективность такого способа перехвата и локализации аварийных разливов нефти в зимних условиях. Если убедиться в устойчивости направляющей прорези в течение зимнего сезона, то, организовав ее в начальный период ледостава и несколько утеплив (например, снегом) для исключения промерзаемости, можно рассчитывать на надежный перехват нефтяного разлива и подачу его к нефтесборной майне (где устанавливаются нефтесборщики в случае аварийного разлива нефти) вплоть до разрушения ледового покрова в весенний период.

Лабораторными экспериментами в лотках с извилистым руслом и натурными наблюдениями на реках Белой и Неве установлено, что под ледяным покровом векторы осредненных скоростей течения в приледном слое потока направлены не к вогнутому берегу, как в открытом потоке, а от него (рис. 12.7).

Этот факт понятен, если принять во внимание, что ледяной покров оказывает такое же влияние на речной поток, как и дно русла. Под ледяным покровом речной поток оказывается расчлененным на два структурных кинематических образования, граница между которыми проходит в срединной зоне по глуби-



Рис. 12.7. Характер движения нефтяных частиц на изгибе лабораторного лотка в условиях «ледостава» (силикатное стекло). Вид сверху, течение слева направо

не, несколько варьируя в зависимости от состояния нижней поверхности льда (гладкая, торосистая, сильно торосистая).

С учетом описанной структуры приледного течения назначается такое местоположение направляющих прорезей или экранов, при котором их направление благоприятно сочеталось бы с направлением речного потока в приледном слое и таким образом способствовало бы эффективному движению нефтяных частиц к нефтесборной майне.

Направляющие прорези в ледяном покрове были успешно применены для перехвата и локализации движущейся подо льдом нефти в ходе ликвидации ее аварийного разлива на р. Белой в районе Уфы в январе 1996 г.

Натурные наблюдения на Белой, Оби, Неве, Юля-Йоки, Сестре позволили составить представление о некоторых свойствах льда, влияющих при его взаимодействии с русловым потоком и нефтяными частицами на характер их перемещения в реке.

Лабораторными экспериментами И.Л. Калюжного установлено, что в покоящейся водной среде нефтяные частицы, находящиеся в контакте со льдом (заменившимся в опытах силикатным стеклом), приходят в движение путем проскальзывания или качения при угле наклона плоскости стекла к горизонту менее  $1^\circ$ . Это значит, что при понижении уровня воды в реках в зимнюю межень и, как следствие, прогибании прилегающих к берегам участков ледяного покрова нефть может достаточно интенсивно перемещаться в прибрежные подледные пазухи с открытой водной поверхностью, накапливаться в них или очень медленно (из-за малости приурезовых скоростей течения) уходить вниз по течению реки.

Такой механизм распространения нефти подо льдом был обнаружен в экспериментах на р. Юля-Йоки. По-видимому, такой же механизм распространения нефти подо льдом проявился в ходе демонстрации локализации нефтяных частиц в нефтесборной майне с помощью направляющего экрана на Оби зимой 1999 г. Довольно тщательно подготовленный и предварительно опробованный демонстрационный стенд, состоящий из подледного направляющего экрана длиной 300 м, нефтесборной майны с нефтесборщиком и утепляющей палаткой над ними на концевом участке экрана, должен был убедить несколько десятков собравшихся специалистов в эффективности этого способа локализации нефтяного разлива под ледяным покровом. Однако нефть, выпущенная под лед в довольно большом количестве в 150 м выше по течению, по истечении контрольного времени в нефтесборной майне не появилась. Лишь небольшое число нефтяных частиц, вынырнувших все же в нефтесборной майне, было свидетельством «эффективности» направляющего экрана.

Когда же собравшиеся отправились на очередной демонстрационный стенд и вместе с ними ушли и технические механизмы (буровая машина, бульдозер, бураны, развозившие секции экранов), оператор, оставшийся у нефтесборщика, сообщил, что нефть интенсивно пошла в майну.

Этот эпизод может быть объяснен следующим образом. Прорезь для установки экрана нарушила целостность ледяного поля. Так случилось, что на той части ледяного поля, которая сопрягалась с прорезью с верхней по течению стороны, образовалась большая нагрузка: собранный в большой гурт с большой

площади снег, сложенный рядом с ним извлеченный при изготовлении майны лед и все технические средства (рис. 12.8). Когда к началу демонстрации на этот же участок сконцентрировались еще и наблюдатели и рабочие, готовившие этот эксперимент, лед, по-видимому, несколько просел. Образовавшийся наклон этой части ледяного поля способствовал отклонению приближающихся к направляющему экрану нефтяных частиц вправо по ходу их движения, т. е. в обход и самого экрана, и нефтесборной майны. После того как нагрузка была устранена и ледяное поле вновь выправилось, нефтяные частицы стали достигать экрана, перемещаясь вдоль него в нефтеулавливающую майну.



а)



б)

Рис. 12.8. Подготовка участка ледового поля для демонстрации действия нефтенаправляющего экрана: а – расчистка льда от снега и складирование его в гурт; б – извлечение льда из нефтесборной майны и складирование его у снежного гурта

Наблюдениями на р. Белой установлено, что даже гладкий кристаллический лед имеет на нижней поверхности многочисленные впадины разного размера. Кроме того, нижняя поверхность льда имеет волнистость, составляющую метры по протяженности вдоль потока и сантиметры по высоте. В таких элементах «ледового рельефа» останавливаются нефтяные частицы соответствующего им размера и при малых скоростях приледного течения могут длительное время удерживаться в покое.

На Оби при организации одного из демонстрационных экспериментов был прорезан ледяной покров в поперечном (от берега в сторону русла) направлении на 10,2 м и далее — в продольном на 17,0 м. По этим двум прорезам были выполнены промеры толщины льда, результаты которых приведены в табл. 12.3.

**Таблица 12.3. Толщина льда в поперечной и продольной к направлению течения прорезях. Река Обь, район с. Локосово, 23 марта 1999 г. Расстояние между промерными точками 1,7 м**

Вид прорези	Толщина льда, м										
	Поперечная	0,99	0,96	0,96	0,93	0,93	0,95	0,96			
Продольная	0,96	0,93	0,97	1,02	1,05	1,02	1,08	0,97	1,01	0,99	1,04

Из табл. 12.3 видно, что в продольной прорези толщина льда изменяется в значительных пределах на относительно небольших по протяженности отрезках: при расстоянии между второй и седьмой точками 8,5 м толщина льда (по ходу против течения) увеличилась на 15 см, а на следующих 5,1 м — уменьшилась на 9 см. При ровной верхней поверхности льда это свидетельствует о том, что нижняя поверхность имеет неровную волнистую форму и что при определенных гидравлических характеристиках речного потока во впадинах между волнами может накапливаться перемещающаяся подо льдом нефть.

Еще более значительные объемы остановившейся нефти образуются во впадинах торосистого льда. При отсутствии снежного покрова на льду стоячая под ним нефть под воздействием солнечных лучей способна перемещаться вертикально вверх, прогревая контактирующую с ней поверхность льда и превращая ее в воду. Таким образом, нефть может «пронизывать» всю толщу кристаллического льда и изливаться на его поверхность.

Описанные проявления нефти в речном потоке под ледяным покровом были замечены и исследованы наблюдениями на конкретных природных объектах и на специальных лабораторных установках. В этих природных и лабораторных экспериментах использовалась натуральная нефть.

Совсем другая ситуация возникает, когда исследуется распространение нефтяного разлива на гидравлической модели конкретного водного объекта, т. е. когда должен быть выполнен пересчет полученных на модели результатов в натуре. В этом случае приходится подбирать такие имитаторы нефти и ледяного покрова, которые обеспечивали бы динамическое подобие взаимодействующих сред и как следствие — возможность надежного пересчета геометрических и кинематических характеристик аварийного разлива «нефти» в натуре.

Нефть, контактируя в водной среде со льдом, проявляется как гидрофобная, несмачиваемая субстанция. Вместе с тем, собственно лед по природе своей гидрофилен (способен смачиваться). Эти свойства взаимодействующих сред должны воспроизводиться на модели. Но, как уже отмечалось, натуральная нефть не может быть использована на модели, поскольку она не может быть воспроизведена в геометрически подобных элементах (отдельностях). Соединение мелких элементов на модели в более крупные агрегаты вызывает нарушение динамического подобия, приводящее уже к полному нарушению подобия процесса распространения нефтяного разлива. Например, крупные элементы нефти подо льдом остаются неподвижными, поскольку сдвигающее усилие модельного потока, формируемое модельными скоростями приледного течения, оказывается существенно меньшим удерживающего нефть усилия, формируемого архимедовой силой.

Вместе с тем и натуральный лед тоже не может быть использован на гидравлической модели по чисто техническим причинам: в наших условиях невозможно наморозить и поддерживать длительное время на модели ледяной покров при существенно положительных температурах окружающего воздуха и воды.

Силикатное стекло, будучи гидрофильным материалом, могло бы быть имитатором ледяного покрова на модели. Однако и его использование исключается также по техническим причинам: стекло не может удерживаться наплаву из-за существенно большей, чем у воды, плотности и им практически невозможно воспроизвести идентичное сопряжение ледового поля с берегом из-за сложного очертания линии уреза воды (тем более, когда эксперимент выполняется при разных расходах воды и соответственно разных наполнениях модели).

После серии предварительных (поисковых) экспериментов в качестве имитатора ледяного покрова была использована полихлорвиниловая (ПХВ) прозрачная пленка толщиной 0,25 мм. Пленка хорошо удерживается на поверхности воды, достаточно четко повторяет конфигурацию урезной линии и позволяет наблюдать и фотографировать под нею распространение имитатора нефтяного разлива. Однако ПХВ пленка является гидрофобным материалом — она не смачивается водой и хорошо адгезирует (слипается) с нефтью, притормаживая ее движение в состоянии контакта.

Для обеспечения на модели взаимодействия гидрофобной и гидрофильной субстанций свойство гидрофильности было придано имитатору нефти. В качестве имитатора нефти использовался раствор этилового спирта в воде, окрашенной нигрозином в черный цвет. Соотношением спирта и воды достигалась плотность имитатора нефти, требуемая по масштабу модели.

#### **12.4. Основные черты и особенности распространения аварийных разливов нефти в реках**

Оказавшаяся в речной среде нефть перемещается русловым потоком в разных состояниях. Некоторые фракции перемешаются в полностью растворенном в воде виде (эти фракции относительно невелики по объему). Часть нефтяного

разлива перемещается в виде очень мелких частиц, образующихся в некотором количестве всегда, но в преобладающих объемах — при свищевых и узкошовных нарушениях трубы, способствующих, благодаря большему давлению в трубе и отсутствию реакции контролирующей аппаратуры, длительному выбросу мелкораспыленного облака нефти. И часть нефтяного разлива перемещается в виде крупнокапельного, лоскутного излияния, а также сплошным шлейфом в случаях большого поперечного или широкошовного раскрытия трубы.

Растворенные фракции и мелкораспыленные частицы нефти переносятся внутри речного потока на большие расстояния, полностью подчиняясь (в связи с очень малой величиной собственной гидравлической крупности) воздействию поля пульсационных и осредненных скоростей потока. Поэтому эти компоненты аварийного разлива нефти не могут быть каким-либо способом устранены из речной среды — они переходят в разряд фонового загрязнения, подлежащего удалению разработанными для этого технологическими приемами и техническими средствами.

Основная часть аварийного разлива нефти, вызванного большим раскрытием трубопровода, выходит на поверхность открытого речного потока или к нижней поверхности льда в условиях ледостава в виде крупных капель, лоскутьев и ковров.

На поверхности открытого потока небольшая часть первоначального объема нефти силами поверхностного взаимодействия превращается в мономолекулярную или тонкослойную пленку, относительно быстро покрывающую всю поверхность воды в пределах берегов и оказывающую «сдерживающее» влияние на последующие порции выходящей на поверхность потока нефти. Благодаря этому нефть проявляется уже не как поверхностно активное, а как консервативное вещество, распространение которого вниз по течению реки совершается воздействием поля поверхностных осредненных и пульсационных скоростей потока. В условиях штилевой погоды нефтяной разлив оказывается в зоне наибольших переносных скоростей потока в любой части речного русла.

Если аварийный разлив нефти произошел в условиях ледостава на реке, то, поднимаясь от дна к поверхности, нефть входит в контакт с нижней поверхностью льда и перемещается вниз по течению реки в зоне малых скоростей речного потока, испытывая воздействие пульсационных компонент актуальной скорости. В зимних условиях ветровой фактор воздействия на распространение нефтяного разлива исключается, но появляется фактор, связанный с состоянием ледяного покрова. Под гладким ровным льдом нефть перемещается в целом относительно быстрее и с меньшим рассеянием по ширине, чем, например, при торосистом.

Торосистый лед может аккумулировать в своих купольных нишах значительные объемы нефти и удерживать ее длительное время, вплоть до весеннего ледохода. Если на льду нет снежного покрова, то такие скопления нефти даже при отрицательных температурах воздуха могут под воздействием солнечной радиации пронизывать ледяную толщу и изливаться на поверхность льда. В дальнейшем такая нефть уходит вниз по течению реки с ледоходом.

В зимних условиях так же, как и в потоке с открытой водной поверхностью, часть аварийного разлива нефти уходит по реке в пределах всего или значительной части живого сечения в растворенном в воде виде или в виде очень мелких элементов, имеющих близкую к нулю гидравлическую крупность.



## 12.5. Методика гидравлического моделирования аварийных разливов нефти в реках

Выше отмечено, что моделирование аварийных разливов нефти в Русловой лаборатории ГГИ выполнялось расчетно-имитационным методом: рельеф речного русла и поймы воспроизводятся на модели путем пересчета натуральных характеристик русла и поймы в их модельные значения в соответствии с принятым масштабом модели.

Горизонтальный и вертикальный масштабы модели назначаются одинаковыми, благодаря чему рельеф на модели воспроизводится в неискаженном виде, а масштабный множитель для пересчета модельных скоростей течения в натуру сохраняется единым для осредненных и пульсационных значений и определяется соотношением, вытекающим из условия равенства на модели и в натуре чисел Фруда:

$$\alpha_{\bar{u}} = \alpha_{\bar{u}'} = \alpha_{\bar{v}'} = \alpha_{\bar{w}'} = \sqrt{\alpha_H},$$

где  $\alpha_{\bar{u}}$  — масштабный множитель для пересчета осредненных значений продольной компоненты скорости потока;  $\alpha_{\bar{u}'}$ ;  $\alpha_{\bar{v}'}$ ;  $\alpha_{\bar{w}'}$  — то же для пересчета пульсационных значений соответственно продольной, вертикальной и поперечной компонент актуальной скорости потока;  $\alpha_H$  — масштабный множитель для пересчета глубин с модельных значений в натурные.

Использование единого для осредненных и пульсационных скоростей масштабного множителя позволяет без каких-либо дополнительных коррективов и условий, непосредственно прямым путем оценивать характер рассеяния аварийного разлива нефти по ширине открытого потока или в приледном слое потока подо льдом и по его глубине, используя для этого соотношения 3.9–3.16.

Вместе с тем, поскольку основная часть аварийного разлива нефти перемещается в речном потоке как консервативное вещество, это ее свойство освобождает от необходимости использования на модели какого-либо поверхностно активного вещества, заменяя его каким-либо другим, подходящим по условиям эксперимента консервативным веществом.

Таким подходящим веществом оказалась алюминиевая пудра (краска себриянка) в сухом виде, подаваемая на поверхность воды из небольшого питателя-дозатора. Таким образом, нефть как поверхностно активное вещество не моделируется подобным ей другим поверхностно активным веществом, но распространение на модели имитатора нефти, его рассеяние, трасса следования и скорость движения совершаются образом, подобным ядру натурального нефтяного разлива в реке.

Выше уже было показано на примере модели участка р. Невы существенное влияние ветра на скорость и путь распространения «нефтяного» разлива. Воздушный поток, так же как и речной водный поток, оказывает силовое воздействие на нефтяной разлив, ускоряя или замедляя его движение при долевом ветре, смещая его к одному или другому берегу — при поперечном ветре.

Однако попытки использовать масштабный множитель, полученный для расчета модельной скорости речного потока, к воздушному потоку оказались

безуспешными: имитатор нефтяного разлива на модели не реагировал на рассчитанный таким образом воздушный поток. По-видимому, на моделях масштаба 1:400 или 1:500 расчетный ветер скоростью (от натурального ветра 5–7 м/с) около 0,20–0,30 м/с недостаточен для преодоления сил поверхностного натяжения воды и образования ветрового течения в поверхностном слое руслового потока.

Установлено также, что применять так называемый ветровой коэффициент для перехода от скорости ветра на метеостанции к скорости ветрового течения на конкретном участке реки неправомерно, поскольку такой переход сопряжен с соблюдением ряда условий (длина разгона, продолжительность действия, глубина воды и др.) обычно нереализуемых в речных потоках [258].

В связи с этими обстоятельствами ветер на гидравлической модели участка реки устанавливается не расчетным путем, а подбором такой ситуации с размещением вентиляторов, при которой воздушный поток над моделью производил бы смещение пятна имитатора нефтяного разлива, подобное натурному. Для этого в составе тарировочной серии натуральных измерений (уровень воды, глубины потока на участке реки, скорости течения, расход воды, русловая съемка, уклон водной поверхности) производится измерение траекторий имитатора нефти, выпущенного в поток в разных точках по ширине над нефтепроводом и при разных скоростях и направлениях ветра, измеряемых на береговом анемометрическом пункте.

Таким образом, воздушный поток, создаваемый над гидравлической моделью, является не расчетным фактором, определяющим скорость и трассу распространения «нефтяного разлива», а лишь имитацией реального натурального ветра.

Имитацией ледяного покрова на гидравлической модели полихлорвиниловой пленкой (гидрофоб), а нефтяного разлива раствором этилового спирта в воде, окрашенной нигрозином в черный цвет (гидрофильная среда) сохраняется свойственное натурному процессу взаимодействие смачиваемой и несмачиваемой сред. Несмотря на то, что в натурном процессе гидрофобной (несмачиваемой) средой является нефть, а гидрофильной (смачиваемой) средой — лед, на моделях участков разных рек достигалась вполне приемлемая одинаковость форм распространения имитатора с распространением натуральной нефти подо льдом.

В ходе эксперимента имитатор вводился медицинским шприцем проколом ПВХ пленки непосредственно в «приледный» слой модельного потока и благодаря очень малым скоростям течения в этом слое распространялся на значительное расстояние от начальной точки, постепенно рассеиваясь в потоке. Для получения непрерывных трасс распространения имитатора в его лидирующей зоне производилось дополнительное введение под пленку новой порции. Таким образом, подледные трассы распространения имитатора освещали все поле модели и далее, будучи зафиксированными фото- и видеокамерой, анализировались для принятия решений о местах перехвата, локализации и устранения из реки аварийного разлива нефти.

## 12.6. Некоторые примеры моделирования аварийных разливов нефти в реках

Изучение аварийных разливов нефти в реках путем гидравлического моделирования водных объектов предпринималось в двух направлениях. Основной целью первого направления является проработка на модели возможных вариантов гидрометеорологических ситуаций и установление наиболее подходящих мест на реке для организации перехвата, локализации и устранения нефтяного аварийного разлива в разных гидрологических и погодных ситуациях. На основании результатов модельных экспериментов разрабатываются технологические карты обустройства участка реки ниже по течению перехода магистрального нефтепровода.

Основной целью второго направления является создание учебного наглядного материала для предварительной подготовки персонала аварийных бригад к конкретным действиям в разных гидрометеорологических ситуациях на реке. Персонал аварийных бригад должен быть готов к принятию правильных решений и должен уметь быстро и качественно реализовать эти решения в конкретной гидрологической и погодной ситуации, которая состоится в установленный день Учений.

Под задачи обоих направлений в Русловой лаборатории ГГИ были выполнены модельные исследования распространения аварийных разливов нефти с применением рассмотренной в предыдущем пункте методики на участках рек, приведенных в табл. 12.4.

В табл. 12.4 приведены участки рек разного морфологического типа. Модельными экспериментами показано, что с усложнением морфологического типа русла возрастает вариантность распространения нефтяного разлива в реке, что значительно усложняет или даже делает невозможным отслеживание этого явления в натуральных условиях.

Применение на гидравлических моделях описанных способов воспроизведения ветра и ледовых условий позволяет быстро и многовариантно получить достаточно полное представление о характере и скорости распространения нефтяного разлива в сложных морфологических, метеорологических, гидравлических и кинематических ситуациях в разные сезоны года.

На рис. 12.9 приведены шлейфы распространения имитатора нефтяного разлива на фрагменте модели р. Оби в условиях штиля и ветра разного направления. Воздушный поток над моделью создавался настольными вентиляторами типа ВЭ-1, располагавшимися на такой высоте над водной поверхностью и на таком расстоянии от береговой линии, при которых обеспечивалось подобие силового воздействия ветра на нефтяной разлив на модели и в натуре.

На рис. 12.9 видно, что в безветрие «нефтяной» разлив, поданный над средней частью подводного перехода магистрального нефтепровода в протоке Локозовской, достигнув основного рукава Оби, распространяется по нему в соответствии со структурой поля поверхностных скоростей, в зоне, близкой к стрежню (но не на стрежне) потока, т. е., будучи вынесенным течением Локозовской

Таблица 12.4. Характеристика участков рек и гидравлических моделей

Река, пункт, протяженность моделируемого участка реки, км	Общая характеристика моделируемого участка реки	Масштабы модели плановый / вертикальный
Иртыш, г. Омск, 8	Русло слабоизвилистое с островами, шириной 300–500 м, берега высотой 2–3 м над меженным уровнем воды, поросшие лиственным лесом	1:150 / 1:150
Обь, с. Локосово, 35	Ширина русла до 1,0 км, тип русла — незавершенное меандрирование; высота берегов реки и островов над меженным уровнем воды 2–6 м; чередование открытых участков берега с участками, поросшими лесом	1:500 / 1:500
Белая, д. Массады, 15	Ширина русла до 1,0 км; тип русла — свободное меандрирование с искусственными спрямлениями излучин, участок реки в подпоре от Нижне-Камской ГЭС; высота берегов 2–3 м над меженным уровнем воды; чередование открытых участков с поросшими лесом участками	1:500 / 1:500
Белая, д. Массады II, 25	К предыдущей модели добавлен устьевой участок с островами, заросшими кустарником и тростником	1:500 / 1:500
Волга, д. Кадница, 17	Ширина русла 0,6–1,5 км; русло преимущественно однорукавное, слабоизвилистое, в конце участка с островами; левый берег пойменный высотой 3–5 м над меженным уровнем воды, правый берег — преимущественно коренной склон долины высотой более 100 м	1:500 / 1:500
Нева, д. Марьино, 25	Ширина русла 0,5–1,0 км; русло однорукавное, преимущественно слабоизвилистое с одним крутым поворотом вправо в средней части участка; берега — коренные склоны долины высотой 4–6 м, местами поросшие лиственным лесом	1:400 / 1:400

протоки в среднюю зону основного рукава, ниже по течению, на повороте русла вправо, шлейф «нефтяного» разлива почти вплотную приближается к левому вогнутому берегу.

Вместе с тем юго-восточный ветер относит «нефтяной» разлив к правому, островному берегу основного рукава, а северо-восточный ветер прижимает его к левому берегу реки сразу при выходе из устья Локосовской протоки.

В соответствии с плановым расположением «нефтяных» шлейфов в этих трех ситуациях изменяется и время распространения разлива до конкретных створов. На рис. 12.9 видно, что меньшее время перемещения головной части «нефтяного» разлива вниз по течению присуще ситуации с юго-восточным ветром, при котором «нефтяной» разлив пересекает основной рукав и поэтому оказывается

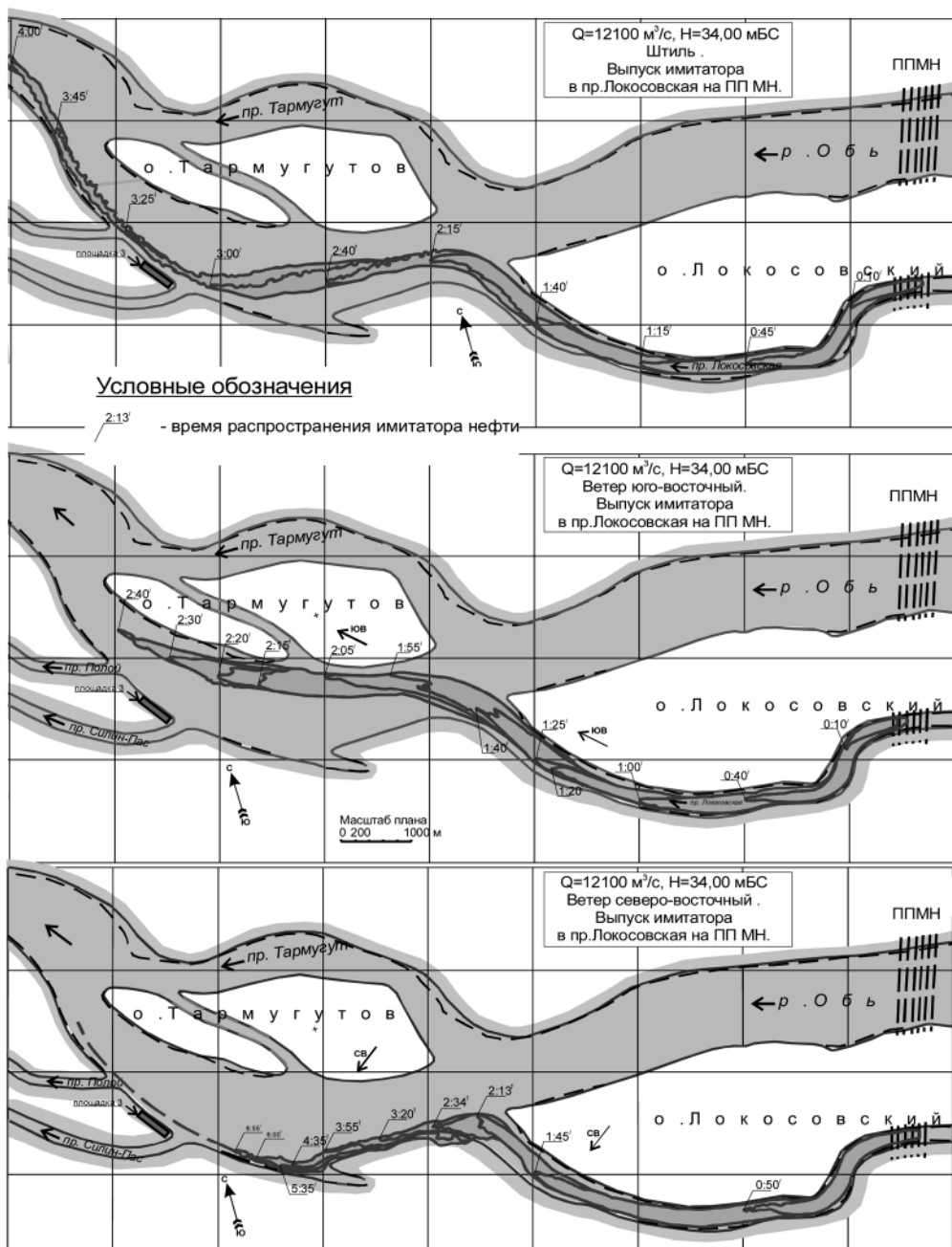


Рис. 12.9. Схема распространения имитатора нефти на модели Оби в разных погодных условиях

под воздействием наибольших поверхностных скоростей речного потока. Несколько большее время (даже при существенно большем расходе воды) присуще штилевой ситуации, когда «нефтяной» разлив, распространяясь в левобережной зоне потока, оказывается в стороне от его стрежня. Существенно большее время присуще ситуации с северо-восточным ветром, прижимающим «нефтяной» разлив к левому урезу воды, т. е. в зону весьма малых скоростей речного потока. Именно эта, последняя, ситуация случилась на Учениях, которые были организованы на Оби у с. Локосово в начале августа 1997 г. Нижневартовским районным нефтяным управлением [281]. Сильный северо-восточный ветер, сопровождаемый интенсивным, непрекращающимся дождем, вынудил руководителей учений перенести точку выпуска имитатора на воду из Локосовской протоки в центральную зону основного русла с тем, чтобы сократить время движения его до рубежей перехвата, которые намечалось выставить у левого берега реки.

На рис. 12.10 показан переход магистрального нефтепровода «Пермь – Альметьевск» через реку Белую. Свободное меандрирование русла осложнено на этом участке реки спрямлениями, устроенными в целях улучшения условий судоходства. Определенное осложняющее влияние на гидравлико-морфологическую обстановку оказывает и подпор уровня воды от Нижне-Камской ГЭС. Нефтепровод трижды пересекает реку: через основной рукав (Барсуковская воложка), через Барсуковское спрямление и через правобережную протоку, бывшую когда-то главным рукавом реки.

На рис. 12.10 видно, как сильно изменяются трассы и время распространения «нефтяного» разлива в зависимости от места разгерметизации трубопровода и от направления ветра. Этот пример достаточно наглядно характеризует возможности гидравлической модели в исследованиях распространения аварийных разливов нефти в реках. Здесь уместно заметить, что ситуации, приведенные на рис. 12.9 и 12.10, выполняются в лаборатории в течение одного рабочего дня, а в натуральных условиях их приходится ожидать неопределенно долгое время, и затрачивать на отслеживание интересующих процессов (если они все же реализуются) несоизмеримо больше материальных и финансовых ресурсов, чем на гидравлической модели.

Но насколько чутко и точно гидравлическая модель реагирует, казалось бы, на несущественные детали гидравлико-морфологической обстановки на водном объекте, показывает следующий эпизод.

В ходе Учений на Белой в октябре 1999 г. [263] был произведен, в частности, выпуск подсолнечного масла в начале Ямалинского спрямления (рис. 12.10). Южный ветер, довольно слабый, тем не менее загнал масляное пятно в северную оконечность оз. Сутле-Куль (пойменной старицы, перерезанной Ямалинским искусственным спрямлением). Зафиксированный результат этого натурального эксперимента не был тогда проанализирован до конца, а именно, почему слабый ветер оказал большее воздействие на масляное пятно, чем поверхностное течение в самом Ямалинском спрямлении.

Натурные выпуски имитатора нефтяного разлива были затем воспроизведены в лаборатории на гидравлической модели. В разных гидравлико-метеорологических ситуациях и с разным начальным местоположением выпуска

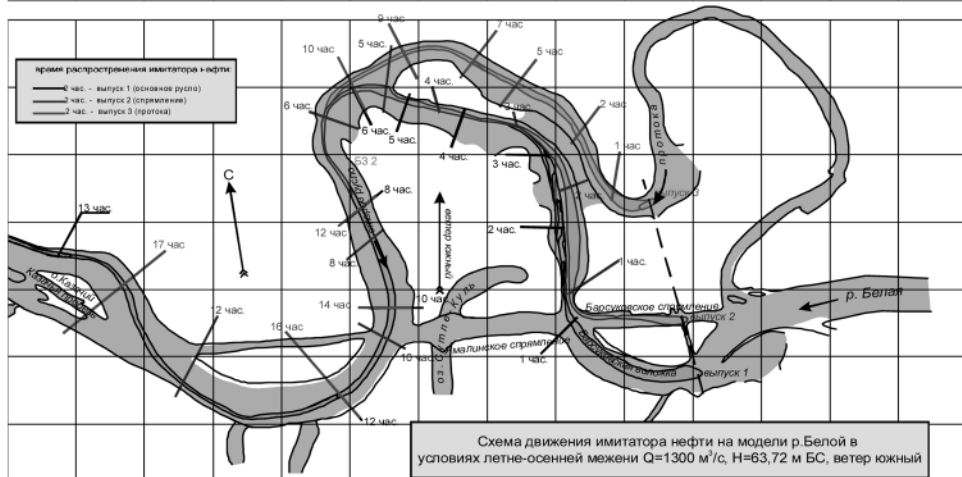
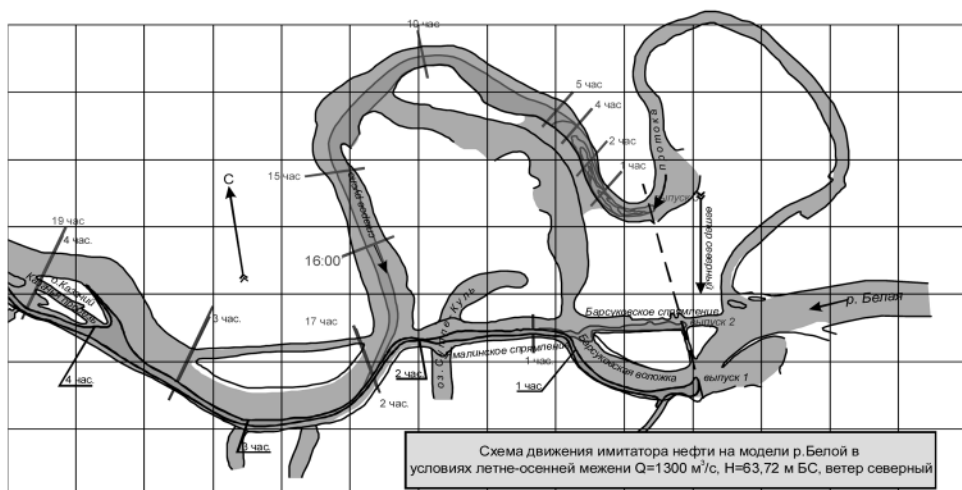
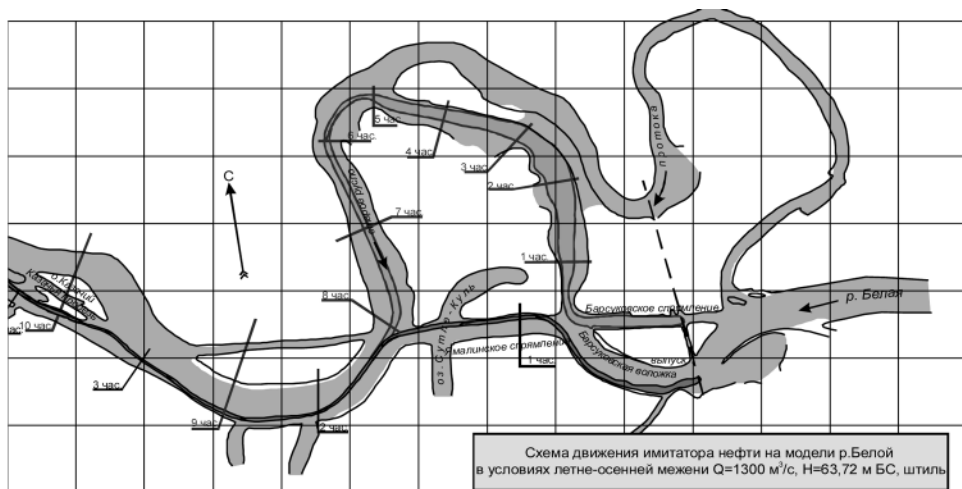


Рис. 12.10. Схема распространения имитатора нефти на модели р. Белой в разных погодных условиях

имитатора были зафиксированы его траектории, которые и по форме распространения, и по скорости распространения оказались подобными натурным.

Однако выпуск имитатора в начале Ямалинского спрямления (как это было сделано на реке) не привел к образованию подобной траектории на модели: имитатор проследовал по спрямлению мимо оз. Сутле-Куль. Причина этого несоответствия модели с натурой оказалась простой. Южная часть оз. Сутле-Куль (т. е. слева от Ямалинского спрямления) была воспроизведена на модели не полной ее протяженностью в 2 км, а лишь примыкающим к Ямалинскому спрямлению отрезком в 750 м длиной. Этого отрезка оказалось недостаточно для формирования модельным ветром дрейфового течения в оз. Сутле-Куль, подобного натурному. После того, как южная часть оз. Сутле-Куль была удлинена на модели до натуральных 2-х км, выпущенный в начале Ямалинского спрямления имитатор, достигнув оз. Сутле-Куль, полностью уходил под воздействием уже более сильного дрейфового течения в его северную оконечность. Гидравли-



Рис. 12.11. Модель р. Волги, покрытая ПХП пленкой для изучения трактов распространения аварийных разливов «нефти» под «ледяным» покровом



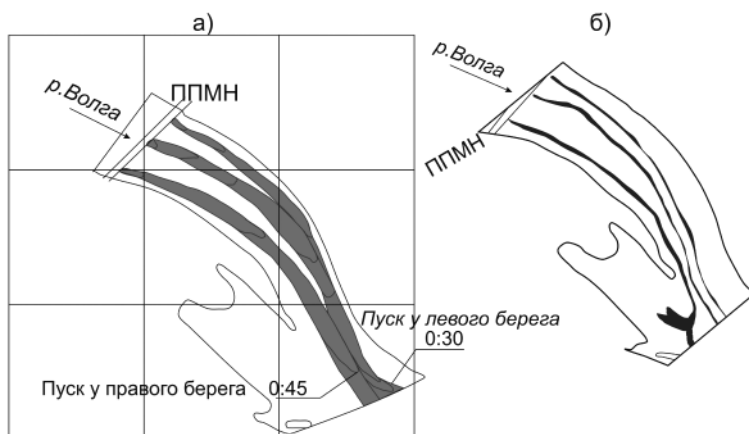


Рис. 12.12. Распространение имитатора нефти на модели Волги:  
а – на поверхности открытого потока, б – под «ледяным» покровом

ческая модель в данном случае «подала сигнал» экспериментаторам о дефекте в ее устройстве.

Моделирование нефтяных разливов в реках в зимних условиях выполнялось на моделях Оби, Белой, Волги и Невы. На рис. 12.11 показана модель участка р. Волги подо льдом. Во всех этих случаях «подледные» траектории «нефтяных» шлейфов заметно отличались по местоположению в русле от траекторий на поверхности открытого потока. Во всех экспериментах проявилось замеченное в лотковом извилистом русле и приведенное на рис. 12.7 свойство речного потока отклоняться в приледном слое от вогнутого берега к серединной зоне и переносить в этом направлении частицы нефти: точно так же проявили себя и шлейфы имитатора — раствора этилового спирта в воде под ПХВ пленкой, имитирующей ледяной покров на моделях.

Специфика русловой морфологии на некоторых участках рек, для которых было выполнено моделирование, даже усиливает отмеченное свойство приледного течения — отклоняться на повороте русла к выпуклому берегу. На рис. 12.12 приведен фрагмент модели участка Волги в нижнем бьефе Горьковской ГЭС в районе д. Кадницы, где расположен подводный переход через реку магистрального нефтепровода «Горький — Лисичанск». Непосредственно ниже по течению перехода русло разворачивается вправо, а у правого, выпуклого берега сформировался обширный затон. При сравнении шлейфов имитатора нефтяного разлива, выпущенного в условиях открытого потока (рис. 12.12 (а)) и в условиях «ледостава» (рис. 12.12 (б)), обнаруживается, что в первом случае шлейфы имитатора тяготеют к левому, вогнутому берегу, а во втором — к правому, выпуклому берегу. Выпуск имитатора из правобережной точки сформировал шлейф, развернувшийся ниже по течению непосредственно в правобережный затон.

## **НАТУРНЫЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ РУСЛОВОГО ПРОЦЕССА НА р. ПОЛОМЕТИ**

### **Введение**

Полевой экспериментальный комплекс ГГИ для изучения русловых процессов был создан на р. Полонети у с. Яжелбицы в 18 км от г. Валдая, в составе Валдайского филиала ГГИ. Первые измерения расходов воды на этом участке р. Полонети были выполнены в 1952 г., а первые специальные экспериментальные измерения поля осредненных скоростей потока были начаты в 1956 г.

Многолетние наблюдения за речным потоком, наносами и руслом р. Полонети, организованные в последующем по комплексной программе натуральных исследований, позволили получить обширный и разносторонний фактический материал по различным элементам руслового процесса на разных участках русла и поймы этой реки. На Полонети изучались следующие процессы и явления:

- макроформы речного русла (свободное меандрирование);
- структура поля осредненных скоростей и вторичных течений;
- механизм затопления и опорожнения поймы;
- микроформы руслового рельефа;
- макротурбулентность речного потока;
- режим взвешенных наносов;
- режим уровней и расходов воды;
- большие скопления наносов и неравновесные процессы в формировании русла р. Полонети.

Важнейшей особенностью этих исследований является их единая методология, базирующаяся на основных положениях гидролого-морфологической теории руслового процесса, сформулированных Н.Е. Кондратьевым и И.В. Поповым [132, 214, 215].

### **13.1. Морфология, плановые деформации и гидравлика потока на участках свободного меандрирования**

В составе программы натуральных исследований русловой станции Валдайского филиала ГГИ важная роль принадлежит изучению процесса меандрирования р. Полонети [50, 51]. Стационарный экспериментальный участок включает 20 последовательно расположенных излучин свободного меандрирования в районе д. Зеленый Бор. На этом участке изучались морфология и темпы плановых деформаций реки. На 10 излучинах было разбито 60 поперечников, на которых выполнялись промеры русла по продольным и поперечным профилям, измерялись скорости и направления течений в нескольких точках на вертикали, производилась нивелировка водной поверхности по поперечникам и урезам

воды у берегов, отбор и анализ донных отложений, фиксация вторичных течений, зон отрыва потока от берегов, вторичных вальцов и вихревых зон.

В результате многолетних комплексных исследований руслового процесса и руслового потока на экспериментальном меандрирующем участке русла р. Поломети получен обширный материал по морфологии речных макроформ, механизму развития руслового процесса при свободном меандрировании и дискретной структуре руслового потока [49, 50, 51].

Коэффициент извилистости русла на экспериментальном участке составляет 1,98. В половодье максимальные расходы воды достигают 100 м<sup>3</sup>/с, скорости течения 1,3–1,5 м/с. Ширина русла составляет 40–50 м на перекатных участках и 80–90 м на участках закруглений излучин. Максимальные глубины на перекатах равны 1,5–2,0 м, а на плесовых участках 3,0–4,0 м. В межень высота берегов составляет 3,0–3,5 м, а уклоны свободной водной поверхности — 0,0002–0,0004. Продолжительность половодья составляет 25–30 дней.

В табл. 13.1 представлены величины плановых деформаций русла р. Поломети на участке экспериментальных исследований.

**Таблица 13.1. Плановые деформации русла на экспериментальном участке р. Поломети, 1947–1968 гг.**

№ излучин	Площадь плановых деформаций, м <sup>2</sup> ·10 <sup>2</sup>	Длина фронта размыва, м	Величина смещения береговой линии, м	
			средняя	максимальная
I	137	340	40	75
II	70	250	28	50
III	108	300	36	75
IV	36	240	15	20
V	129	250	52	120
VI	38	150	25	40
VII	22	220	10	11
VIII	90	320	28	55
IX	32	150	21	30
X	30	180	17	30
XI	147	310	47	80
XII	122	420	29	70
XIII	35	200	18	35
XIV	25	150	17	38
XV	39	220	25	25
Средн.	2	246	27	54

В результате анализа картографического материала и морфометрических характеристик макроформ речного русла была установлена связь скорости разворота свободно меандрирующих излучин со степенью их развитости  $S/\lambda$  ( $S$  — длина излучины,  $\lambda$  — ее шаг). В условиях р. Поломети отмечается увеличение

скорости разворота излучин до значений  $S/\lambda < 1,4$  и ее уменьшение при  $S/\lambda > 1,4$ . Было также установлено, что угловая скорость развития отдельно взятой излучины зависит от интенсивности развития смежных с ней излучин.

Полевые работы, связанные с измерением гидравлических характеристик потока на экспериментальном участке р. Поломети, проводились в начале спада весеннего половодья. В результате этих исследований был получен богатый материал по структуре руслового потока на участках излучин речного русла и характеристикам циркуляции. Были обнаружены, количественно описаны и увязаны с морфологией русла зоны отрывных течений, вихревые структуры с вертикальной и горизонтальной осями вращения, пространственная структура осредненных и пульсационных скоростей потока и рельеф водной поверхности [51].

### **13.2. Исследования процессов затопления поймы и развития пойменных течений на р. Поломети у д. Заречье**

Работы по типизации руслового, а затем пойменного процессов, выполненные в Отделе русловых процессов ГГИ в конце 70-х годов XX века [63, 132, 215], выявили принципиальное несоответствие с действительностью принятых в гидравлике упрощенных схем протекания половодья в реках с выходом воды на пойму. Было высказано предположение о существенной зависимости процессов затопления и развития пойменных течений от морфологического строения речных пойм, свойственного различным типам руслового процесса, и от расхода воды в реке, т. е. от уровня наполнения русла и поймы водой.

С целью изучения качественных и количественных особенностей развития пойменных течений в руслах с поймами ГГИ был организован большой комплекс натурных и лабораторных исследований на реках Оке, Оби, Поломети и на Дону [63].

Целью натурных исследований, выполненных группой сотрудников Отдела русловых процессов ГГИ и студентов Ленинградского гидрометеорологического института на р. Поломети у д. Заречье в половодье 1969 г., было проследить последовательные стадии затопления поймы, выявить характер выхода воды на пойму и возникновение и дальнейшую трансформацию течений по мере хода половодья. В задачу исследований входило также измерение таких гидравлических и гидрометрических характеристик, как уровни воды, скорости потока, уклоны и расходы воды на пойме и на ее отдельных морфологических фрагментах (прорвах, бровке русла, в пойменных емкостях, в прикорневой протоке и др.) при разных уровнях затопления поймы.

Выполненные исследования позволили количественно описать весь процесс затопления и опорожнения поймы на участке р. Поломети с меандрирующим руслом во время весеннего половодья 1969 г. [135]. Было убедительно показано, что характер протекания половодья в условиях его выхода на пойму кардинально отличается от принимаемых в речной гидравлике схематизаций. Не было обнаружено единого сплошного потока по всей пойме. В плане пойменный поток

представлял собой единство сложных систем течений, разобщенных площадями поймы с нулевыми скоростями течений в застойных зонах, не участвующих в общем движении даже на пике половодья. Для конкретного половодья, соответствующего среднему по водности году, были определены характер и время затопления поймы, время существования потоков, заполняющих пойму и их изменчивость во времени, момент установления и продолжительность существования транзитного потока. Выявлена решающая роль прорв в затоплении пойм и возникновении на них течений. Определены количество прорв, величины скоростей и расходов воды в них по мере хода половодья [135].

Результаты описанных исследований наряду с выполненными в едином комплексе натурных работ на реках Оке и Оби, а также лабораторных исследований на гидравлической модели р. Дон и картографического материала по 15 другим рекам России легли в основу разработанного в Отделе русловых процессов ГГИ нормативного документа «Рекомендации по учету руслового процесса при проектировании ЛЭП» [226].

### **13.3. Исследования грядового движения наносов**

Грядовое движение является основной формой транспорта донных наносов в речных руслах.

Гряды-микроформы типа дюн с длиной 2–8 глубин потока определяют макрошероховатость речного дна, отражают турбулентную структуру руслового потока, формируют гидравлические сопротивления русла и расход донных наносов.

Преобладающее большинство имеющихся измерений геометрических и динамических характеристик гряд выполнено в лабораторных условиях. Все натурные исследования грядового движения наносов на различных реках, предпринимавшиеся в разное время зарубежными и отечественными исследователями, носили эпизодический характер.

На этом фоне уникальные, систематические исследования грядового движения наносов, организованные ГГИ на р. Полонети, по своей продолжительности (1960–1967 гг.), полноте, составу, подробности и точности измерений до сих пор не имеют аналога в мире [154]. Эти измерения выполнялись на экспериментальном участке, примыкающем к водомерному посту р. Полонеть — с. Яжелбицы, оборудованном специальной экспериментальной эстакадой, что позволяло обеспечить точность измерений, не отличающуюся от лабораторной.

Ширина русла на экспериментальном участке р. Полонети составляет 25,0 м. Русловая эстакада представляла собой стальную ферму пролетом 32,5 м, перекинутую через реку. Ферма эстакады передвигалась по рельсам, проложенным вдоль потока по обоим берегам реки на расстояние 100 м. Скорость перемещения фермы вдоль потока составляла 4,5 м/мин. По верху фермы поперек потока перемещалась рабочая площадка, на которой была смонтирована измерительная аппаратура.

В каждом опыте производились: промеры глубин по продольникам; определение скорости течения над гребнями гряд у дна и в точке 0,6H; измерение расхода

воды; отбор проб донных отложений; отбор проб на мутность для определения механического состава взвешенных наносов и измерение уклона водной поверхности.

С помощью промеров были получены геометрические размеры гряд и скорости их перемещения. Использовался эхолот ПЭЛ-2. В результате измерений за период 1960–1967 гг. были получены данные по 5000 гряд.

Диапазон изменения гидравлических характеристик потока и параметров гряд на р. Поломети у с. Яжелбицы по данным измерений составил [154]:

- по скорости потока:  $V=0,31–1,71$  м/с;
- по глубине потока:  $H=0,16–2,50$  м;
- по крупности донных отложений:  $d=0,6–7,5$  мм (относительная гладкость  $\frac{H}{d}=1416–333$ );
- по высоте гряд:  $h_r=0,03–0,80$  м (относительная высота гряд  $\frac{h_r}{H}=0,12–0,42$ );
- по числу Фруда:  $Fr = \frac{v}{\sqrt{gh}}=0,24–0,40$ ;
- по скорости перемещения гряд:  $C_r=0,018–0,089$  м/мин (относительная скорость перемещения гряд  $\frac{v}{C_r}=2500–1133$ ).

В результате анализа литературных источников и выполненных натурных исследований были получены расчетные зависимости для высоты гряд и скорости их перемещения.

В частности, было установлено, что при значениях отношения средней скорости потока к гидравлической крупности, соответствующей среднему диаметру наносов  $\frac{v}{W} < 12,0$ , высота гряд находится в прямой зависимости от скорости и глубины потока и в обратной — от диаметра наносов. При  $\frac{v}{W} > 12,0$  высота гряд с диаметром наносов и глубиной потока имеет прямую связь, а со скоростью потока — обратную:

$$\frac{h_r}{H} = 1,88 \left( \frac{v}{W} \right)^{0,165} - 2,30 \text{ при } \frac{v}{W} < 12,0 \quad (13.1)$$

и

$$\frac{h_r}{H} = 50 \left( \frac{v}{W} \right)^{-1,65} e^{-0,22 \frac{v}{W}} \text{ при } \frac{v}{W} > 12,0. \quad (13.2)$$

Для расчета скорости перемещения гряд было получено:

$$C_r = 0,685 v \sqrt{\frac{d}{h_r}} - 0,0109, \text{ м/мин.} \quad (13.3)$$

Результаты отмеченных исследований далее были использованы для обобщения и установления расчетных зависимостей высоты гряд и скорости их перемещения в реках в более широком, чем на р. Поломети, диапазоне существования гряд на малых, средних и больших реках [155, 248].

На рис. 13.1 представлена обобщенная зависимость относительной скорости перемещения гряд от числа Фруда с экспериментальными точками, полученными

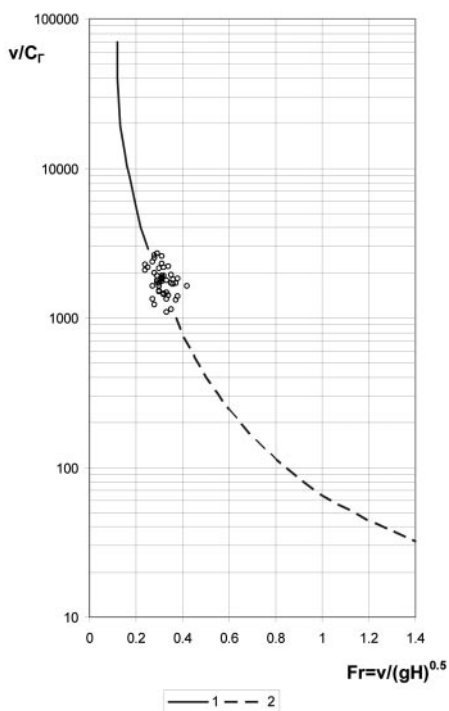


Рис. 13.1. Положение экспериментальных данных по р. Полонети на обобщенной кривой  $v/C_r=f(Fr)$ :  
 1 – область средних и крупных равнинных рек;  
 2 – область горно-предгорных рек и экспериментальных данных, полученных в лабораторных условиях (гидравлические лотки и модели)

ми на р. Полонети. Как следует из рисунка, эти точки занимают промежуточное положение между средними и крупными равнинными реками ( $Fr < 0,3$ ) и лабораторными лотками и горно-предгорными реками ( $Fr > 0,3-0,4$ ).

Данные измерений геометрических и динамических характеристик гряд на р. Полонети у с. Яжелбицы, как наиболее надежные для условий малой равнинной реки с песчаным ложем, были использованы для установления наиболее достоверной зависимости для расчета расхода донных наносов из числа предложенных в разное время различными зарубежными и отечественными исследователями для русел малых рек с песчаным дном [149]. Было проверено 88 формул, из которых наилучшими для условий р. Полонети и соответственно других рек с подобным гидрологическим, гидравлическим режимом и крупностью донных отложений оказались формулы Ю.М. Корчохи, ГГИ (Б.Ф. Снищенко, З.Д. Копалиани), К.В. Гришанина, Доу Го Женья, А.Ф. Кудряшова, Мейэр-Петера, Цубаки и Аккерса и Уайта.

#### 13.4. Натурные исследования макротурбулентности руслового потока

Еще в 1960-е годы в ГГИ был разработан лабораторный метод регистрации поля актуальных скоростей потока с помощью стационарной и скользящей обзорной фото- и кино съемки частиц полистирола нулевой гидравлической крупности, освещаемых щелевым фонарем в плоскости измерения. С помощью

этого метода была детально изучена кинематическая структура турбулентного потока в лабораторных условиях [112–114].

Продолжение этих работ в природных условиях на р. Поломети осуществлялось уже с применением контактного метода измерения актуальной скорости потока. Первоначально в качестве средства измерения использовалась вертушка ВЖМ-3 с дополнительными контактами, обеспечивавшими сигнал через 5 оборотов лопастного винта. Такими вертушками измерялась продольная составляющая скорости течения. Позже исследования структуры турбулентности потока на Поломети выполнялись разработанным в Русловой лаборатории ГГИ трехкомпонентным измерителем актуальной скорости, фиксирующим ее модуль и пространственное направление и таким образом позволившим вычислять все три пульсационные компоненты [247]. Результаты выполненных на разных участках Поломети измерений, дополненные данными измерений на реках Гороховке, Вычегде, на канале Шават и в лабораторных лотках, позволили установить идентичность (подобие) структуры макротурбулентности русловых потоков разного размера и построить простые соотношения для определения всех трех компонент актуальной скорости [120, 118]. Эти зависимости были приведены выше в главе 3. Они используются в инженерной практике для определения формы движения в речных потоках русловых и взвешенных наносов [225, 269].

### **13.5. Неравновесные процессы в формировании русла р. Поломети**

Многолетними наблюдениями на р. Поломети были обнаружены и детально описаны неравновесные процессы в формировании русла на большой протяженности этой реки, связанные с перемещением больших скоплений наносов [52, 53, 125, 465].

Основанием для выполнения этих исследований послужили значительные тренды кривых расходов на водомерных постах Поломети. Кривые расходов воды являются хорошим индикатором руслового процесса, происходящего на прилегающем к водомерному посту участке реки. Если в многолетнем разрезе участок реки находится в состоянии динамического равновесия, то ежегодные кривые расходов воды группируются очень тесным пучком. Если динамическое равновесие системы «поток-русло» почему-либо нарушено, то кривые расходов смещаются монотонно, или в сторону увеличения пропускной способности русла (в случае его размыва), или в сторону уменьшения пропускной способности русла (в случае его занесения и обмеления).

На первом графике рис. 13.2 (водомерный пост Дворец) видно, что за период с конца 30-х по начало 90-х годов XX века на участке реки протекал процесс, состоящий из двух ветвей неравновесности: в начале русло освобождалось от заполнивших его наносов, и пропускная способность его в связи с этим увеличивалась (при фиксированном уровне над нулем графика 100 см) с  $19 \text{ м}^3/\text{с}$  до  $35 \text{ м}^3/\text{с}$ , а затем русло вновь стало заноситься наносами и его пропускная способность сократилась при том же уровне с  $35 \text{ м}^3/\text{с}$  до  $21 \text{ м}^3/\text{с}$ .



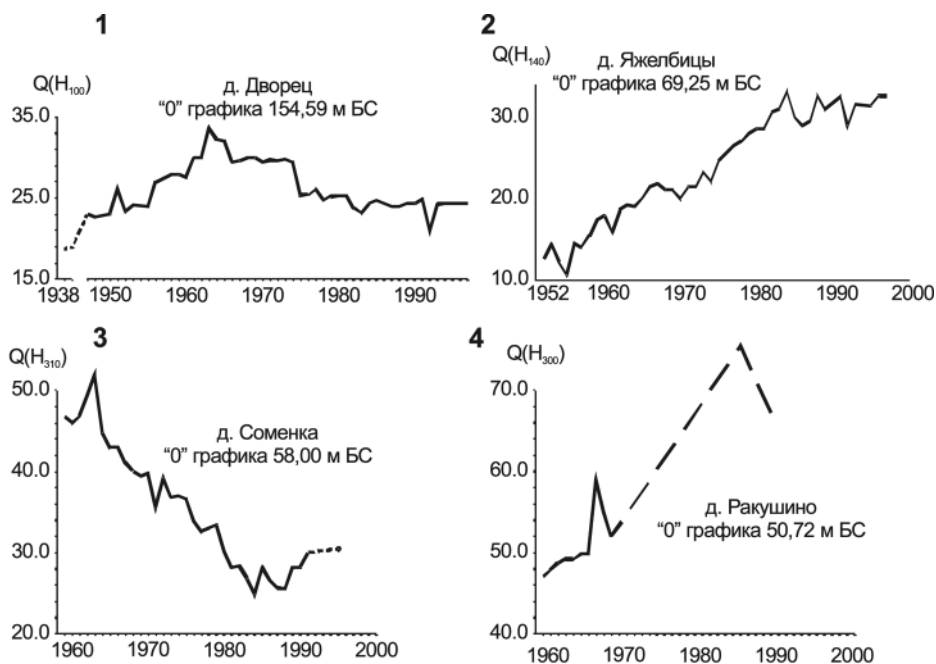


Рис. 13.2. Хронологические графики расходов воды при фиксированных уровнях на водомерных постах р. Поломети

Очевидно, что такие значительные изменения расхода воды при фиксированном уровне на водомерном посту не могут быть вызваны перемещением квазирегулярных форм руслового рельефа, каковыми являются микро- и мезоформы. Это может быть вызвано большими скоплениями наносов, образующимися в реке под воздействием естественных или антропогенных факторов (возможны случаи сочетания тех и других).

Более наглядно этот вывод иллюстрируется графиками 2 и 3 на рис. 13.2. Постепенное освобождение русла от наносов и увеличение его пропускной способности на Яжелбицком участке (график 2 на рис. 13.2) происходило одновременно с последовательным занесением русла и уменьшением его пропускной способности на Соменском участке реки (график 3 на рис. 13.2).

Расстояние между этими водпостами составляет 18 км, на протяжении которых русло в начале было занято головной частью скопления наносов, а затем — его хвостовой частью. Таким образом, протяженность этого скопления наносов вдоль реки составила более 18 км, что при ширине межженного русла на этом участке Поломети 20 м составляет более 1000 его ширин и около 100 длин излучин, являющихся макроформами речного рельефа и руслового процесса.

Существенна и степень заполненности наносами живого сечения русла. На рис. 13.3 видно, как изменялось поперечное сечение в створе Яжелбицкого поста в ходе освобождения участка реки от большого скопления наносов. Очевидно, что при таких размерах больших скоплений наносов они оказываются

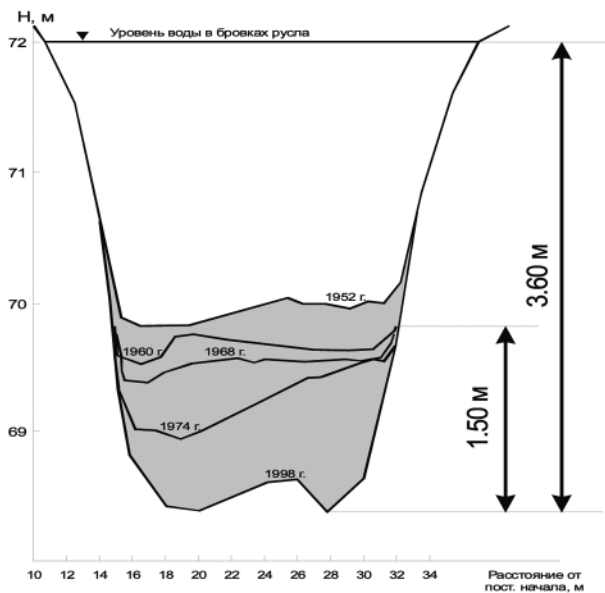


Рис. 13.3. Поперечный профиль р. Полонети у с. Яжелбицы

зафиксированном на Ракушинском водомерном посту (график 4 на рис. 13.2), и явилось причиной образования в конце 1950-х годов двухсотметровой протоки на правобережной пойме в 1,5 км ниже по течению водомерного поста, спрямившей семь последовательно расположенных излучин свободного меандрирования, три верхние из которых оказались заполненными наносами этого скопления (рис. 13.4).

В ходе обследования притоков Полонети и других рек Валдайской возвышенности были обнаружены и другие формы неравновесных процессов, например, фоновое для всех рек врезание их русел, а вернее — истощение современного руслового аллювия, обусловленное сокращением пахотных земель и, следовательно, сильным уменьшением эрозии водосборов и поступления наносов в речное русло.

Наблюдения на Полонети были дополнены материалами о неравновесных процессах на реках Юля-Йоки, Селенга, Зея, Амур, Иртыш, существенно расширившими представление и о пространственно-временных масштабах этого явления и о его генезисе [52].

Осмысление этих материалов совместно с базовыми материалами наблюдений на Полонети привели на современном этапе к следующим общим представлениям и выводам об этих явлениях.

Река как система «поток-русло», стремящаяся к состоянию динамического равновесия, тем не менее, значительные временные отрезки в ходе своего развития находится под воздействием неравновесных процессов.

В зависимости от условий возникновения (генезиса) неравновесные процессы и формы их проявления в развитии русел рек осуществляются в широком диапазоне пространственно-временных масштабов.

неким морфологическим фоном, на котором развиваются традиционные типы руслового процесса.

Наряду с большими скоплениями наносов на Полонети обнаружены и сравнительно небольшие формы подобного рода. Такое скопление наносов вышло в Полонеть из ее правого притока Ярыньи, где оно образовалось в результате размыва и обрушения в русло правобережного склона долины, сложенного моренными грунтами. Перемещение этого скопления вниз по реке проявилось в изменении пропускной способности русла,

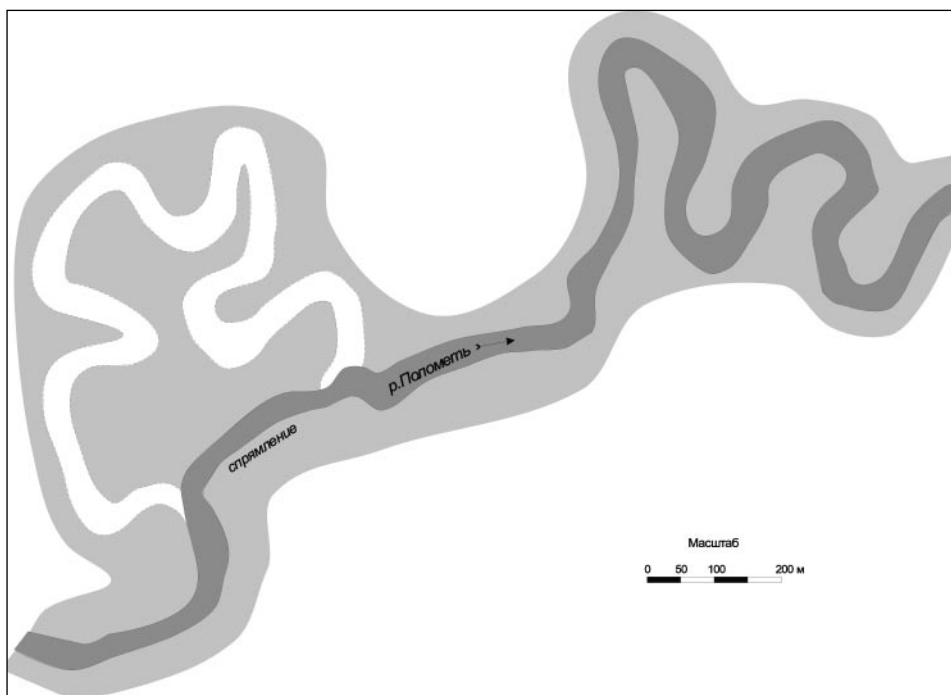


Рис. 13.4. Спрявление русла (серии излучин) р. Поломети  
в 1,5 км ниже Ракушинского водомерного поста

По характеру проявления неравновесные процессы могут быть отнесены к четырем категориям: долговременные сильные, долговременные слабые, кратковременные сильные и кратковременные слабые.

Долговременные неравновесные процессы благодаря большой продолжительности циклов формируют на определенный срок аллювиальную основу в руслах рек на участках большого протяжения. На этом аллювиальном более или менее мощном основании развиваются известные микро- и мезоформы руслового рельефа.

Неравновесные процессы и формы их проявления представляют собою нерегулярные явления в речных руслах в отличие от микро-, мезо- и макроформ руслового рельефа, являющихся квазирегулярными формами руслового рельефа и транспорта донных наносов. Генезис неравновесности связан с экзогенными определяющими факторами, а генезис регулярных форм — с эндогенными определяющими факторами.

Неравновесные процессы развиваются в двух направлениях, составляющих в целом цикл неравновесности: неравновесность наполнения, когда на рассматриваемый участок реки надвигается скопление наносов, и неравновесность истощения, когда скопление наносов уходит вниз по течению с рассматриваемого участка реки.

В первом случае кривая расходов смещается влево, к оси уровней (например, график 3 на рис. 13.2 и рис. 13.5), русло реки расширяется, увеличиваются уклоны

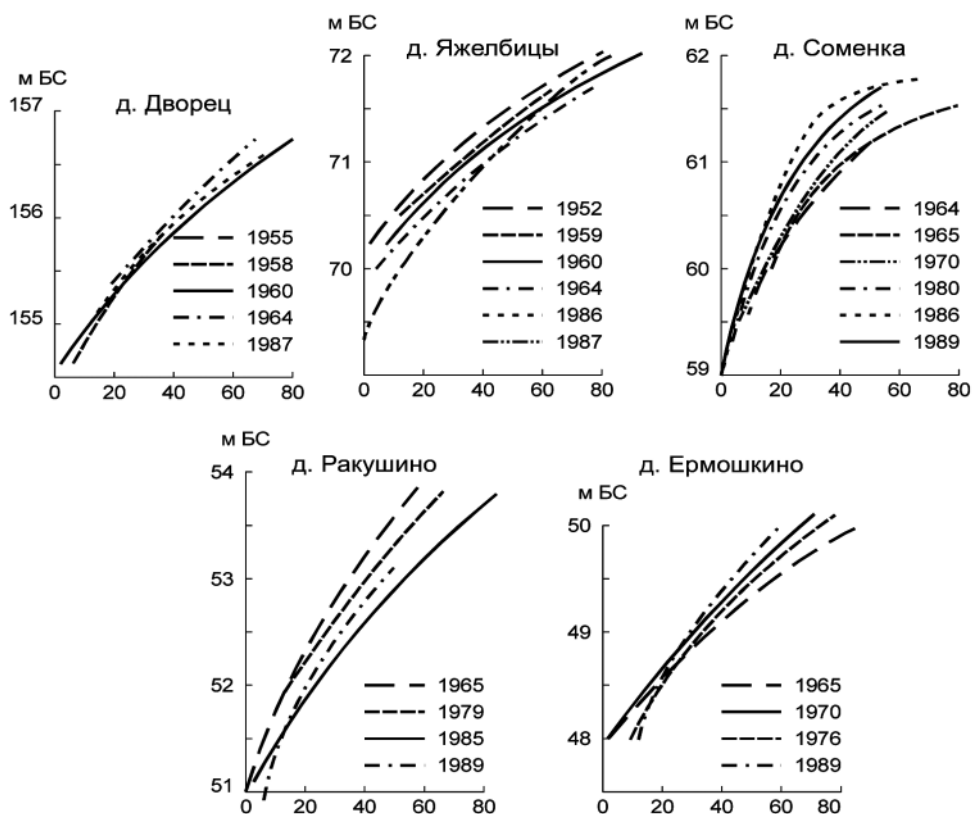


Рис. 13.5. Зависимости  $Q=f(H)$  для гидростворов р. Поломети за разные годы

водной поверхности меженного потока, чаще и на большую глубину затопливается пойма полыми и паводковыми водами, увеличивается объем ежегодного наилка на пойме и укрупняется его состав, образуются спрямления излучин и в целом однорукавное русло может трансформироваться в двух- и многорукавное.

Во втором случае кривая расходов смещается вправо от оси уровней (например, график 2 на рис. 13.2 и рис. 13.5), русло реки становится более компактным и более глубоким, многорукавное русло перестраивается в однорукавное, реже, на меньший срок и с меньшими глубинами затопливается пойма, меньшим слоем и меньшей крупностью наносов откладывается пойменный наилок, уменьшаются уклоны водной поверхности меженного потока.

Неравновесные процессы оказывают существенное влияние на режим грунтовых вод поймы, вызывая в одних крайних случаях ее заболачивание (подтопление), а в других — иссушение (обезвоживание). Поскольку неравновесные процессы вызывают значительные колебания отметок дна, они существенно влияют на состояние гидротехнических сооружений и, в частности, инженерных коммуникаций. Водопроводный дюкер, проложенный под руслом Поломети в районе устья р. Гремячей в 1950-х годах, теперь в период летней межени находится выше уровня воды в реке.

В дополнение к материалу, изложенному в предшествующих шести разделах настоящей главы, следует указать также на внушительный объем полевых, методических и теоретических исследований, выполненных на Поломети по стоку наносов, их гранулометрическому составу и эрозии, а также морфометрии и динамике русла, изложенных в работах [108, 300].

## **Заключение**

В настоящей главе представлена краткая информация о комплексных, натуральных и экспериментальных исследованиях различных характеристик руслового процесса, организованных на Поломети за последние 55 лет. Эти исследования носили систематический характер и выполнялись с целью развития теории и методологии гидролого-морфологической концепции руслового процесса, разрабатываемых в ГГИ, в части изучения особенностей характеристик руслового процесса малых рек, а также для изучения антропогенного воздействия на русловой процесс Поломети.

В результате этих исследований были получены подробные, оригинальные полевые материалы и научные выводы по меандрированию, механизму затопления и опорожнения поймы при свободном меандрировании, структуре руслового потока и его макротурбулентности, транспорту донных наносов, геометрическим и динамическим характеристикам русловых микроформ-гряд. Эти данные в едином комплексе с лабораторными исследованиями послужили связующим звеном для перехода к условиям больших рек и позволили создать обобщенные методы расчета плановых и высотных русловых деформаций, геометрических и динамических характеристик микроформ речного русла, расхода донных наносов и кинематических характеристик турбулентного руслового потока, широко используемых в инженерной практике [225, 226, 269].

Обнаруженные и описанные на Поломети неравновесные процессы в формировании русла в результате движения в реке больших скоплений наносов естественного или антропогенного происхождения впервые освещают еще не исследованные в мировой науке новые аспекты руслового процесса и ставят вопрос об актуальности выполнения подобных исследований и на других реках в контексте необходимости разработки и реализации широкомасштабных программ по мониторингу речных русел и пойм.

55-летняя история изучения руслового процесса на Поломети в Валдайском филиале ГГИ свидетельствует о высокой эффективности этих работ в комплексе с другими гидрологическими исследованиями, выполненными в ВФ ГГИ, и демонстрирует тесную связь и взаимообусловленность руслового, гидрологического и гидравлического режимов на всем речном водосборе, особенно динамично и часто с негативными последствиями проявляющихся в связи с хозяйственной деятельностью человека. Отсюда вытекает необходимость продолжения натуральных исследований руслового процесса Поломети по обновленной программе с учетом опыта уже выполненных работ и задач, представляющих наибольший методический, теоретический и практический интерес для этой реки, как типичного представителя малых рек.

## **О СООТНОШЕНИИ ФИЗИЧЕСКОГО И МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ, ФИЗИЧЕСКИХ И МАТЕМАТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ИССЛЕДОВАНИЙ В ЗАДАЧАХ РЕЧНОЙ ГИДРАВЛИКИ И РУСЛОВОГО ПРОЦЕССА**

Вопрос о роли и преимуществах одного из двух видов моделирования — физического или математического — в развитии знаний о природе, обществе и русловом процессе в том числе, является частью более общей проблемы соотношения физических (эмпирических, экспериментальных, натуральных) и математических (рациональных, формализованных) методов исследований в естествознании и в конкретных естественно-научных дисциплинах.

Существуют два диаметрально противоположных мнения о роли математики в развитии естественных наук.

С одной стороны считается, что научность и достоверность знания определяется степенью его математизации. И здесь обычно ссылаются на Г. Галилея («Книга природы написана на языке математики») или И. Канта («В каждом знании столько истины, сколько есть математики»).

С другой стороны, В. Гейзенберг считал, что «физические проблемы никогда нельзя разрешить, исходя из чистой математики» [57, с. 181].

Согласно А. Эйнштейну, «все познание реального мира исходит из опыта и завершается им» и там же «самая блестящая математическая теория не дает сама по себе никакой гарантии истины и может не иметь никакого смысла, если она не проверена наиболее точными наблюдениями, возможными в науке о природе» [297, с. 124].

И наконец, В.И. Вернадский, говоря о стремлении «охватить науку математикой», писал, что «математические символы далеко не могут охватить всю реальность, и стремление к этому в ряде отраслей знания приводит не к углублению, а к ограничению силы научных достижений» [47, с. 427].

Как известно, в естествознании и в конкретных науках различают эмпирический и теоретический уровни и стадии научного познания. На эмпирическом уровне познания преобладает чувственное познание: сбор фактов, их первичное обобщение, описание наблюдаемых явлений и экспериментальных данных, их систематизация, классификация, установление эмпирических законов. На эмпирическом уровне отражаются внешние стороны и связи объекта.

Теоретический уровень познания характеризуется преобладанием рациональных (основанных на разуме) методов анализа (понятий, допущений, постулатов, аксиом, описывающих идеализированный объект), широким использованием таких познавательных приемов и средств, как абстрагирование, идеализация, формализация, синтез, в результате чего теоретическое познание способно отражать явления и процессы со стороны их универсальных внутренних связей и закономерностей. На основе установленных зако-

нов и теоретического объяснения осуществляется предсказание и научное предвидение.

Эмпирический и теоретический уровни познания взаимосвязаны, и граница между ними условна. Эмпирические исследования, получая новые данные и факты об явлениях и процессах, стимулируют развитие теоретического познания, которое, в свою очередь, ориентирует и направляет эмпирические исследования на поиск новых фактов и эмпирических обобщений.

Естественное развитие наук и расширение в них таких методологических средств и приемов, как идеализация, абстрагирование, формализация, на определенном этапе развития этих наук неизбежно приводит к возникновению и развитию процесса их математизации и компьютеризации. Одним из основных инструментов математизации становится математическое моделирование. Однако искусственное форсирование этого процесса, поспешность в математизации, игнорирование качественного анализа явления и необходимости его тщательного исследования средствами и методами, прежде всего конкретных наук, может оказаться неэффективным.

Математика может стать мощным средством развития частной природоведческой дисциплины только после того, как в данной науке достаточно четко сформулированы основные положения, касающиеся специфики ее предметной области, выяснены и изучены качественные стороны исследуемых явлений. Поэтому успешность применения математических методов в частных научных дисциплинах зависит от специфики предмета данной науки, степени ее теоретической зрелости (эмпирический и теоретический уровни познания в конкретной научной дисциплине) и от совершенства и возможностей самого математического аппарата отображать количественно явления и процессы, однозначно описанные в конкретной научной дисциплине на качественном уровне.

Теория руслового процесса находится на эмпирическом уровне познания. По этому поводу Н.Е. Кондратьев в 1972 г. отмечал:

«Иногда под теорией понимают не полноту охвата явления логическими связями, а развитость математического аппарата. Известно, что математика становится все в большей степени языком науки, и это относится к разным наукам. Но самой наукой математика остается лишь там, где, кроме нее, нет другой науки. В прочих же науках она только язык науки, прекрасное средство для создания логических конструкций, но не сама наука. Роль ее весьма почтенна, иногда приближается к той роли, какую играет наш человеческий язык, выразитель всякого знания и всякой логики. Значит, признак теории не в развитости математического аппарата, хотя эта развитость зачастую (однако не всегда) говорит о степени развитости данной науки. Непонимание этого положения иногда приводит к развитию математического пустословия, которое не только существует, но и вызывает восхищение тех, кто склонен умиляться непонятному.

На мой взгляд, наши знания в какой-либо области тогда обращаются в науку, когда вырабатываются основные положения, определяющие сущность предмета в целом и способные стать основой для разработки деталей. В точных науках эта часть называется аксиоматикой, за которой следует логика. Всем известны аксиомы и постулаты геометрии Эвклида. Свои постулаты имеет

теоретическая механика и гидродинамика. А вот теория руслового процесса до сих пор не имеет общепризнанных постулатов. Постулаты гидродинамики никак не являются постулатами теории руслового процесса, хотя иногда и полагают, что с добавлением уравнения баланса наносов они могут выдаваться за таковые. М.А. Великанов в качестве исходных выдвигал три принципа: взаимовлияние русла и потока, принцип минимума диссипации энергии и принцип ограниченности комплексов. Такие широкие положения можно приспособить к любой науке. В них мало русловой специфики, и поэтому они не конструктивны.

Слабым местом современной теории руслового процесса является недостаточная изученность самого процесса и отсутствие основных формулировок, отображающих его сущность. Отсюда противоречия в разработке деталей, дискуссии по форме, при потере интереса к строгости исходных позиций. Отсюда же и несколько преувеличенный интерес к аппарату, которым подменяется теория» [130, с. 110–111]

Основные положения (постулаты) гидролого-морфологической теории руслового процесса, предложенные Н.Е. Кондратьевым совместно с И.В. Поповым, были представлены выше, в разделе 1.3.

Выдающийся русский гидротехник-путеец, по праву считающийся основоположником учения о речном русле, В.М. Лохтин, свой классический труд «О механизме речного русла», изданный в Санкт-Петербурге в 1897 г. завершает словами «Поменьше формул и побольше наблюдательности» [169, с. 49]. Эту фразу он адресует «специалистам в интересах дальнейшего развития знаний в деле изучения рек». Удивительно, но это предостережение Лохтина оставалось актуальным все XX столетие и в известной степени остается справедливым и в наши дни. Негативное отношение к математическим методам в теории и методологии руслового процесса имеет объективные причины, главные из которых — несовершенство этих методов и их низкая эффективность при решении конкретных теоретических и практических задач.

Использование математических моделей для исследования проблем речной гидравлики, морфологических процессов и транспорта наносов в реках началось в 60-е годы XX века. Подробный обзор работ, выполненных в период 1960–1980 гг. за рубежом и в СССР (в основном в Сибирском отделении АН СССР и в ГГИ) [38, 39, 74], состояние и опыт использования математических (численных) методов в задачах речной гидравлики, включая моделирование течений в естественных речных руслах, транспорта наносов и деформаций русла, представлены в монографии Ж.А. Кюнджа, Ф.М. Холли и А. Вервея [160]. Ими достаточно подробно и объективно описаны научно-методические основы, приемы и примеры решения разнообразных практических задач, а также недостатки, ограничения и перспективы использования численных методов в решении проблем речной гидравлики. В частности, в качестве основных сложностей при реализации численных моделей течения воды в руслах и поймах рек, характеристик транспорта наносов и деформаций речных русел отмечены ограничения одномерной и двухмерной схематизаций гидравлических явлений, проблемы, связанные с моделированием гидравлических сопротивлений раз-



мываемых русел и выбором подходящих формул расхода донных наносов для описания изменений в продольном профиле русла реки в одномерной модели его трансформации, а также затруднения, связанные с корректным воспроизведением в моделях пространственных течений в руслах с поймами.

К настоящему времени наиболее полный и обстоятельный анализ состояния разработки и использования современных компьютерных моделей в задачах математического моделирования речных потоков, транспорта наносов и морфологических процессов в речных руслах выполнен руководителем Национального компьютерного центра США по водным наукам и гидротехнике при университете Миссисипи (NCCHE) С. Вонгом в соавторстве с У. Ву [475]. Рассмотрено 77 работ, охватывающих период 1960–2004 гг., преобладающее большинство этих работ выполнено после 1991 г. В обзоре описаны уравнения движения воды и наносов, используемые в одномерных, двухмерных и трехмерных математических моделях. Представлены эмпирические и полуэмпирические формулы для расчета гидравлических сопротивлений подвижных, аллювиальных русел, расхода донных и взвешенных наносов, а также их суммарного стока. Подчеркивается, что, имея в виду эмпирический характер указанных зависимостей и их неоднозначность, для установления и использования в математических моделях надежных зависимостей, для калибровки и верификации моделей (установления их пригодности) принципиальное значение имеет получение необходимых натуральных данных для моделируемого участка реки. Для калибровки и верификации численных моделей рекомендуется также использовать физические эксперименты. Обсуждаются численные схемы решения одномерных, двухмерных и трехмерных уравнений движения потоков со свободной водной поверхностью, а также транспорта наносов. Со ссылкой на работу Мак Анелли с соавторами [403], в обзоре представлены соображения относительно совместного использования физических и компьютерных гидравлических моделей (гибридное моделирование). В обзоре приведены также некоторые удачные примеры использования компьютерного моделирования для решения задач трансформации продольного профиля дна малой реки Гудвин и стока наносов этой реки в период 1978–1992 гг., а также примеры расчета местных размывов русла у опор и устоев моста и математического описания процесса меандрирования русла. В заключение обзора очерчены сферы приложения и перспективы развития одномерных, двухмерных и трехмерных компьютерных моделей и их различных комбинаций для решения разнообразных инженерных задач в размываемых речных руслах.

Одной из основных сложностей при математическом моделировании течений в речных руслах и поймах, деформаций речных русел и транспорта наносов в реках является моделирование гидравлических сопротивлений размываемых русел. В настоящее время для описания гидравлических сопротивлений в руслах и поймах рек в речной гидравлике используют такие показатели, как коэффициент Шези  $S$ , коэффициент шероховатости  $n$  и коэффициент Дарси — Вейсбаха  $\lambda$ , с помощью которых пытаются в недифференцированном виде выразить всю совокупность русловых сопротивлений.

В отличие от традиционно рассматриваемого в гидравлике случая обтекания потоком жестких границ и назначения коэффициента шероховатости  $n$  на

основе качественного, интегрального описания условий обтекания потоком граничной поверхности, теория руслового процесса, имея дело с русловыми потоками, деформируемыми границами водотоков и транспортом наносов, вынуждена подходить к проблеме гидравлических сопротивлений на основе принципа саморегулирования и самоорганизации в природе процесса транспорта наносов и морфологического строения русла в ходе руслового процесса.

Как отмечалось в главе 6, согласно фундаментальному положению М.А. Велликанова [43], в русловом потоке при его взаимодействии с руслом следует различать два режима взаимодействия: руслоформирующие (паводочные) условия, когда поток формирует русло динамического равновесия — «поток управляет руслом», и условия обтекания потоком «реликтового» русла оставленного предшествовавшим, руслоформирующим расходом воды — «русло управляет потоком». Это положение предполагает существование двух качественно различных законов сопротивления русла потоку: в режиме формирования русла динамического равновесия и в режиме обтекания потоком русла, сформированного предшествовавшим руслоформирующим расходом воды. При этом отмеченное никак не учитывается традиционной гидравликой.

Развитие физических представлений о гидравлических сопротивлениях при движении жидкости в реальных руслах рек требует углубленного изучения механизма руслоформирования и режима транспорта донных наносов, оценки раздельного, группового и суммарного вклада в гидравлические сопротивления в различные фазы водного режима (половодье, межень) плесов и перекатов, русловых макроформ (речных излучин), мезоформ (побочней, осередков), микроформ-гряд, механизма турбулентности.

Некоторые результаты лабораторных исследований, выполненных в Отделе русловых процессов ГГИ с целью изучения раздельного и совокупного вклада в гидравлические сопротивления речных и русловых форм (излучин, мезоформ и микроформ речного русла) и пропускной способности русла меандрирующих рек и побочного типа были представлены выше в том же разделе.

В частности, из рис. 6.3 следует, что пропускная способность русла в зависимости от форм и режима транспорта наносов в реке меняется в широких пределах. Она увеличивается в следующей последовательности: от побочной с микроформами на их поверхности (наименьшая пропускная способность) к руслу с микроформами без побочной, далее от побочной без микроформ на их поверхности к гладкому, безрядовому руслу (наибольшая пропускная способность).

Описанные эксперименты указывают на сложный характер формирования гидравлических сопротивлений в реках с различным типом руслового процесса с присущим каждому типу морфологическим строением русла. Величина сопротивления меняется в зависимости от конкретного вклада в потерю энергии в русловом потоке конкретных речных и русловых форм (излучин, плесов, перекатов, побочной, осередков, гряд) в различные фазы водного режима (половодье, межень).

Выше также отмечалось, что в математических моделях используются традиционные представления и методы определения гидравлических сопротивлений на основе коэффициента шероховатости  $n$  (принимаемого постоянным) и

анализа кривых  $Q=f(H)$ , которые, как известно, отличаются своей неоднозначностью и наличием петель гистерезиса при разных наполнениях русла и поймы [88, 90]. Эта неоднозначность и закон изменения гидравлических сопротивлений с наполнением русла и при его взаимодействии с инженерным сооружением никак не может быть корректно описана математической моделью с ее крайне упрощенными представлениями о гидравлических сопротивлениях. Физическая же модель, отражающая реальную морфологию русла (и поймы) с ее реальными морфологическими фрагментами (изгибы и излуины русла, русловые формы, русловые и пойменные протоки и т. д.), являющимися источниками гидравлических сопротивлений (местных и по длине потока) при всех наполнениях русла самовоспроизводит фрагменты и в целом закономерности изменения гидравлических сопротивлений во всем диапазоне изменения гидравлических характеристик потока.

Неадекватность метода математического моделирования описываемому явлению четко проявляется также при попытках использования этого метода в гидравлических задачах, связанных с наличием поймы (затоплением пойм, пропуском половодий и паводков, освоением пойм, отчуждением их частей, обвалованием пойм дамбами, разработкой противопаводковых мероприятий, оценкой возможных последствий техногенных аварий гидротехнических сооружений и др.).

Натурными, лабораторными и теоретическими исследованиями ГГИ [63, 99, 100, 135, 216, 226] убедительно показано, что при выходе воды на пойму характер течения потока на пойме зависит от типа руслового процесса, рельефа поймы и уровня наполнения русла и поймы водой. При этом течение на пойме в реальных условиях кардинально отличается от представлений о едином «русло-пойменном потоке» и упрощенных схем, принятых в современной гидравлике [19, 88]. И.В. Попов впервые увязал характер и механизм течения на пойме с типом руслового процесса [215]. На основе анализа аэрофотосъемок было обнаружено, что в ходе затопления и включения поймы в процесс пропуска высоких вод наблюдаются три качественно различающиеся друг от друга фазы. При первой фазе, связанной с выходом воды на пойму, поток поступает на пойму по отдельным фрагментам ее рельефа. При свободном меандрировании — это верхняя и нижняя прорвы. При дальнейшем подъеме уровня воды, во время второй фазы половодья, происходит поступление воды на пойму по всему периметру пойменных берегов реки и затопление отрицательных форм емкостей пойменного рельефа. При дальнейшем подъеме уровня воды в реке, в третьей фазе, на пойме формируются транзитные течения, редко захватывающие всю ширину пойменных массивов. Этот «русло-пойменный» поток сильно фрагментирован в зависимости от рельефа поймы и уровня ее наполнения. Он представляет собой единство сосредоточенных течений, зон с нулевыми скоростями и водоворотных областей.

При уменьшении расходов и уровней воды, при спаде половодья происходит опорожнение поймы со сменой характера пойменных течений в обратном порядке. На смену транзитным течениям приходит фаза слива воды с пойменных емкостей по отдельным, сосредоточенным трактам стока на пойменных массивах и в прорвах.

Таким образом, течение на пойме во время фаз ее затопления и опорожнения представляет собой пеструю картину, фрагментированную в различных частях поймы, с постоянно меняющимися размерами этих фрагментов, направлением течений, глубинами, уклонами и скоростями потока в зависимости от уровня наполнения поймы водой.

В математических моделях описанная здесь картина генерализована в пространстве и во времени и далека от реальной. Кроме того, в математических моделях как правило используют в лучшем случае топографическую съемку поверхности поймы масштаба 1:25 000, на которой высотные горизонталы проходят через 5,0 м, что не дает возможности отразить описанные выше детали механизма пропуска половодья по пойме. Кроме того, схематизированный рельеф поймы при его сеточном изображении разрывает целостность и реальную дискретную морфологическую структуру поймы, являющуюся собственно источником гидравлических сопротивлений. В математических моделях гидравлические сопротивления задаются искусственно с помощью интегрального коэффициента шероховатости и не могут отразить не только детали, но и общую картину течений на пойме.

Из отмеченного выше ясно, что математические модели, используемые в задачах, связанных с пойменными потоками, совершенно неадекватны реальной картине. Преимущества физических методов (эмпирические, натурные, лабораторные исследования) для решения описанных выше задач очевидны.

Еще одним типичным примером полной зависимости результатов математического моделирования от физических методов исследований может служить работа аргентинского исследователя Х. Прендеса [417], который в связи со строительством гидроузла на р. Паране и водохранилища Чепетон выполнил математическое моделирование трансформации морфологии русла в нижнем бьефе этого гидроузла. Средний многолетний расход воды в реке на этом участке в естественных условиях составляет  $16\,000\text{ м}^3/\text{с}$ , а средняя крупность донных отложений — 0,30 мм (0,12–1,00 мм). В математической модели для прогноза характеристик общего размыва русла и трансформации водной поверхности потока на участке реки длиной 55 км через 25 лет после ввода в строй гидроузла, были использованы различные формулы для расчета расхода донных наносов (Г.И. Шамова, К.Н. Россинского, Ф. Енгелунда, Ф. Тофалетти, Е. Мейер-Петера). На рис. 14.1 представлены результаты расчетов трансформации русла р. Парана по одной и той же одномерной математической модели Прендеса при использовании перечисленных выше формул. Как следует из рисунка, использование в этой модели формулы Шамова, наиболее распространенной в СССР, дало максимальную величину размыва в нижнем бьефе всего 1,0 м и максимальную величину намыва дна 2,2 м в створе, удаленном от плотины на 27 км, тогда как использование наиболее популярной на западе формулы Мейер — Петера дало величину наибольшего размыва 9,2 м. Намыв в том же створе, в 27 км ниже плотины, составил 6,1 м.

Расчетные величины понижения уровня воды в нижнем бьефе при расходе воды  $16\,000\text{ м}^3/\text{с}$  за прогнозируемый период при использовании формул Шамова и Мейер — Петера составили соответственно 0,36 и 0,85 м.

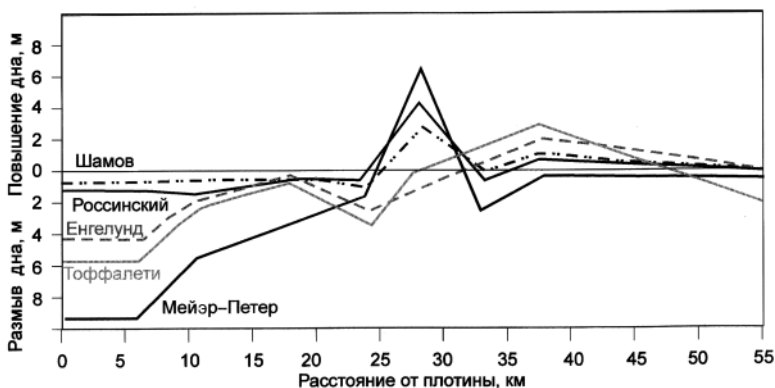


Рис. 14.1. Прогноз переформирования русла в нижнем бьефе плотины Чепетон на р. Паране, согласно математической модели Х. Прендеса

Приведенный пример показывает, что добиться однозначности в подобных математических моделях возможно только на основе более детального физического анализа формул, используемых для расчета расхода донных наносов и проведения тщательных натурных исследований.

В работе [149] выполнен подробный анализ около 200 расчетных методов, зависимостей и рекомендаций, разработанных к настоящему времени зарубежными и отечественными исследователями для оценки расхода и стока донных наносов в реках, демонстрирующих при их практическом использовании результаты, различающиеся между собой в десятки и сотни раз. Детально проанализированы основные причины неудовлетворительного состояния этой проблемы (несогласованность терминологии, отсутствие однозначных общепринятых зависимостей для разграничения влекомых, сальтирующих и взвешенных наносов, недостаточный учет специфики движения песчаного и гравийно-галечного материала и структурных форм перемещения донных наносов, ограниченность качественных натурных данных и др.).

Из работы З.Д. Копалиани, А.А. Костюченко [149] следует, что возможности дальнейшего совершенствования методов решения комплекса проблем и важнейших вопросов, связанных с транспортом наносов в реках, лежат в плоскости физических методов исследований, а не математического моделирования.

Современные математические (компьютерные) модели, предназначенные для описания течений в реках, прогнозирования русловых деформаций, ледовых явлений и взаимодействия речных русел с инженерными сооружениями и мероприятиями в российской специальной литературе представлены работами [21, 22, 41, 42, 54, 76]. Они продолжают традиции советской научной школы [38, 39, 74, 171, 172, 292], и для них в полной мере характерны те ограничения и недостатки, о которых шла речь выше: чрезмерно упрощенный способ задания гидравлических сопротивлений «подбором коэффициентов шероховатости», неопределенности при выборе расчетных зависимостей для оценки расхода и стока донных наносов в моделях трансформации речного русла, упрощения

и искажения реальных физических процессов при их одномерной и двухмерной схематизациях и реализации в компьютерных моделях.

Наряду со сложившейся в некоторых известных научных школах оценкой численных моделей как «дешевой альтернативы физическим моделям», якобы способной заменить физические модели при решении задач прогнозирования русловых деформаций [473], в последнее время в литературе все больше стали звучать и более реалистические суждения и оценки возможностей и роли современных компьютерных моделей, используемых в речной гидравлике и гидротехнике.

Так, А. Раудкиви, авторитетный новозеландский ученый, автор популярной книги «Гидравлика потоков в подвижных границах» [421], выдержавшей четыре издания, в своем ключевом докладе на седьмом международном симпозиуме по речной седиментации, состоявшемся в 1998 г., заявил (через сто лет после В.М. Лохтина!):

«...Агрессивно наступает рынок математических моделей, посвященных проблеме русел с подвижными границами. Заказчики редко осознают существующие ограничения, а интерпретация результатов моделирования обычно опускается. Модельеры преимущественно являются специалистами по программированию и компьютерам с ограниченными знаниями в области физики процессов, происходящих в руслах с подвижными границами. Но красочный продукт компьютерного искусства производит гипнотизирующее воздействие на многих заказчиков, особенно из управленческой среды» [428, с. 3, 10].

И далее он заключает:

«Мы являемся свидетелями быстрого роста программной продукции, предназначенной для решения разнообразных задач, связанных с потоками в деформируемых границах, и эта продукция оформляется красочно. Существует опасность, что эти результаты будут рассматриваться как воплощение физической истины. Теряется восприятие того, что результаты покоятся на недостаточных знаниях и несовершенных физических представлениях, лежащих в их основе. Отмеченное не является критикой моделей. Мое намерение — подчеркнуть, сколь ограничены наши знания физики процессов с подвижным руслом, многие аспекты которой являются “terra incognita” (неизведанной землей) по сравнению с хорошо разработанными для этих моделей утонченными численными методами. К сожалению, численное моделирование переключило многих талантливых исследователей к клавиатуре компьютера. Конечная продукция при этом не является вкладом ни в компьютерную науку, ни в понимание физики процессов на границе раздела двух сред: потока и подвижного русла. Вызывает озабоченность, что во всем мире сегодня так мало людей занимается исследованием физики этой сложной и увлекательной проблемы» [там же].

Еще раньше, в 1994 г., С. Фан, председатель межведомственной группы экспертов по оценке наиболее популярных русловых компьютерных моделей, разработанных и использовавшихся в США, на тот момент, в результате взаимосравнения 11 подобных моделей сделал следующее заключение: «Хотя компьютерные модели являются полезным инструментом в руках исследователей и инженеров, они могут быть также и источником дезинформации для тех поль-

зователей и экспертов проектов, которые не отдают себе полного отчета в допущениях, ограничениях и реальных возможностях компьютерных моделей». По его мнению «компьютерные модели находятся в начальной стадии своего развития» [340, с. 141–142]

И, наконец, С. Вонг в работе [476], датированной 2007 г., подводя итоги деятельности упомянутого выше национального компьютерного центра США при университете Миссисипи (NCCHE) за последние 10–15 лет в области разработки и использования компьютерных «речных» моделей, подробно проанализировав и оценив различные методологические подходы, используемые в настоящее время для описания и решения задач речной гидравлики и гидротехники, в качестве наиболее перспективной выдвигает и обосновывает концепцию интегрированной методологии, включающей целостный комплекс физических и математических методов исследований (эмпирические обобщения, натурные исследования, физические эксперименты и моделирование, компьютерное моделирование).

Таким образом, мы становимся очевидцами того, что традиционное противопоставление методов физического и математического моделирования, физических и математических методов исследований при решении задач речной гидравлики, руслового процесса, транспорта наносов, морфологии русла и взаимодействия инженерных сооружений и мероприятий с руслами и поймами рек, постепенно теряет былую остроту. Методы физического и математического моделирования нельзя рассматривать далее в качестве альтернативных, поскольку они могут взаимно дополнять друг друга.

Процесс неизбежного сближения, взаимопроникновения и интеграции указанных двух видов исследований и моделирования следует ожидать на пути дальнейшего развития методологии и практики гибридного моделирования с учетом многолетнего, богатого опыта «проб и ошибок», накопленного методами физического и математического (численного, компьютерного) моделирования на предшествующих стадиях их самостоятельного развития. По нашему твердому убеждению, математические методы и компьютерное моделирование в едином комплексе с физическими методами и натурными исследованиями в области речной гидравлики и руслового процесса в ближайшие десятилетия будут играть все более заметную, но все же подчиненную роль по отношению к физическим методам исследований, до того момента, пока мы не будем иметь математических уравнений, адекватно описывающих русловый процесс.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Использование экспериментального метода (гидравлических лабораторных установок и моделей) для изучения морфологических и гидравлических процессов, происходящих в речных руслах, и применение полученных знаний в практических целях имеет более чем 110-летнюю историю уже в условиях существования стационарных русловых гидравлических лабораторий. Еще раньше пионерные, эпизодические исследования на гидравлических русловых моделях, как отмечалось, были выполнены Л. Фаргом (1875 г.), О. Рейнольдсом (1885 г.) и Вернон Гаркутом (1886 г.)

В период 1900–2010 гг. в десятках крупнейших экспериментальных гидравлических центров Европы, Америки и Азии выполнено большое число фундаментальных и прикладных исследований речных потоков, русловых процессов и транспорта наносов на лабораторных установках и русловых моделях с целью решения многочисленных и разнообразных инженерных задач, связанных с руслами и поймами рек. В силу недостаточной изученности процессов, происходящих в речных руслах, и отсутствия замкнутой системы уравнений, описывающих русловую процесс, в различных научных школах и лабораториях наблюдается большая пестрота взглядов как в принципиальном подходе к проблеме гидравлического моделирования морфологических и гидравлических процессов на жестких и деформируемых, физических моделях речных русел, так и по большинству частных методических вопросов и практике моделирования, обусловивших неоднозначность и разнообразие методов расчета гидравлических моделей и соответственно получаемых на основе моделирования результатов экспериментов и решений.

Поэтому обмен опытом и информацией между различными лабораториями в этих условиях приобретает важное значение, имея к тому же в виду большую времяемкость и значительные трудовые и финансовые затраты, выделяемые на организацию и выполнение экспериментальных и модельных исследований.

В настоящей монографии представлены результаты экспериментальных исследований и гидравлического моделирования речных потоков и руслового процесса, выполненных авторами в Русловой лаборатории ГГИ с целью развития теории руслового процесса, разработки методики гидравлического моделирования на жестких и деформируемых моделях речных русел и решения практических инженерных задач. Монография не является отчетом о деятельности Русловой лаборатории ГГИ. Она не является также учебником или справочником по лабораторным исследованиям и гидравлическому моделированию речных потоков и руслового процесса. В ней изложен лишь опыт авторов по использованию лабораторного метода и гидравлического моделирования речных русел в Русловой лаборатории ГГИ.

В соответствии с постулатами гидролого-морфологической концепции руслового процесса, принятыми в этой работе в качестве методологической основы экспериментальных исследований и гидравлического моделирования, в лабораторных исследованиях как научно-методического, так и практического (производственно-



го) направлений, выполненных авторами, основное внимание уделено типам руслового процесса, дискретной структуре турбулентного потока и руслового рельефа, а также транспорту наносов в форме дискретных форм различного иерархического уровня (отдельных частиц, микро- и мезоформ руслового рельефа).

На основе перечисленных методических принципов гидролого-морфологической теории руслового процесса выполнены экспериментальные исследования турбулентной структуры руслового потока, процесса формирования русел с различным типом руслового процесса и исследован механизм их функционирования. Изучен механизм взаимодействия турбулентного потока с подрусловым потоком и сформулирован комплекс дополнительных критериальных условий подобия для деформируемых моделей, обеспечивающий качественно одинаковый механизм взаимодействия турбулентного потока с подстилающей сыпучей средой в натуре и в лабораторных условиях.

Исследованы закономерности и механизм формирования гранулометрического состава донных отложений на деформируемых моделях речных русел с учетом морфологии руслового рельефа, структуры потока и характеристик подвижности донных отложений.

Выполнены лабораторные исследования гидравлических сопротивлений и пропускной способности русел с различным типом руслового процесса и формами транспорта донных наносов, в которых, в отличие от утвердившейся в речной гидравлике традиции оценивать гидравлические сопротивления интегрально «подбором» коэффициента шероховатости  $n$  на основе качественного описания условий обтекания потоком граничной поверхности, подробно изучался индивидуальный, групповой и суммарный вклады в гидравлические сопротивления речных и русловых форм: излучин, плесов и перекатов, микро- и мезоформ руслового рельефа. Установлено, что при руслоформирующих расходах воды плесы и перекааты в меандрирующем русле не являются формами сопротивления и не вносят дополнительного вклада в гидравлические сопротивления потоку, что следует считать экспериментальным подтверждением Великановского принципа «русла наименьшего сопротивления» — минимума диссипации энергии в русловом потоке [43, с. 73–74] (рис. 6.2).

Экспериментами в 82-метровом гидравлическом лотке, выполненными при различных состояниях дна (гладком безгрядовом; покрытом микроформами; с побочными, на поверхности которых движутся микроформы; с побочными без микроформ), установлено, что гидравлические сопротивления и пропускная способность русла меняются в широких пределах в зависимости от форм и режима транспорта донных наносов.

Гидравлические сопротивления увеличиваются в следующей последовательности: от гладкого (безгрядового) дна (наименьшие гидравлические сопротивления) к побочным без микроформ и далее к руслу, покрытому микроформами и к побочным с микроформами на их поверхности (наибольшие гидравлические сопротивления) (рис. 6.3).

Наибольшую сложность при моделировании речных русел на жестких и деформируемых моделях представляет случай моделирования крупных равнинных рек с песчаным руслом. Основные сложности здесь связаны с невозмож-

ностью моделировать песок в линейном масштабе модели и большой разницей плановых и вертикальных размеров этих русел. Отмеченное, как правило, не позволяет в условиях ограниченной экспериментальной площади воспроизводить моделируемый участок реки требуемой протяженности без искажения линейных масштабов модели и обеспечивать на ней подобную натурной подвижность руслового материала.

В связи с этим, в практике Русловой лаборатории ГГИ, да и других лабораторий мира, чаще используются жесткие, чем деформируемые гидравлические модели с отдельными размываемыми фрагментами русла, или производится приближенное моделирование на деформируемых моделях, дающее качественные ответы на интересующие исследователя вопросы. Это требует большой осторожности при интерпретации результатов модельных исследований. При этом, гидравлическое моделирование равнинных рек выступает как один из составных методических приемов (вспомогательного инструмента) в комплексе с другими методами (натурные исследования, гидроморфологический анализ, гидравлические расчеты, лабораторные эксперименты, математическое моделирование).

Место и роль модельных исследований в комбинации с другими методами в случае крупных равнинных рек определяется в зависимости от специфики объекта и решаемой на этом объекте конкретной задачи. Именно с помощью такой модели удастся получить важную недостающую информацию для решения исследуемой задачи и разработать обоснованные рекомендации для их реализации в проекте.

Примеры решения практических задач на жестких моделях речных русел приведены в главе 8. Это — сокращенные версии результатов, выполненных в Русловой лаборатории ГГИ типовых НИР. В более полном виде эти результаты изложены в отчетах о выполненных работах, переданных заказчикам (Приложение 1), и в статьях, опубликованных в периодической печати [59, 116, 141, 157].

При физическом моделировании крупных равнинных рек с песчаным дном в силу отмеченной невозможности воспроизведения на деформируемой модели донных отложений в геометрическом масштабе, неизбежно возникает вопрос об использовании легких заменителей донных наносов, с помощью которых добиваются соблюдения на модели подобия подвижности и других характеристик транспорта донных наносов без искажения геометрических масштабов моделей или при их наименьшем искажении.

Современная практика использования заменителей наносов на деформируемых моделях также ограничивается лишь выводами качественного характера, не располагая надежными количественными зависимостями для расчета моделей и пересчета динамических характеристик транспорта наносов, рельефа дна и руслового процесса с модели на натуру.

На основе экспериментов в 8-метровом гидравлическом лотке с пятью разновидностями заменителей песка с различной плотностью  $1,19-1,85 \text{ г/см}^3$  и крупностью  $0,33-1,82 \text{ мм}$ , а также с естественным песком тех же крупностей (всего более 100 опытов), выполненных авторами в Русловой лаборатории ГГИ, получены зависимости (9.15) и (9.17), позволяющие при использовании легких заменителей песка на деформируемых гидравлических моделях речных русел подбирать и количе-

ственно пересчитывать с модели на натуру динамические характеристики рельефа дна и руслового процесса с учетом перемещения донных наносов в форме гряд.

Наиболее определенный и удобный для изучения в лабораторных условиях случай представляют реки горно-предгорной зоны, сложенные из крупного аллювия. Эти реки из-за относительно небольших абсолютных размеров и крупного руслового материала, допускающего их воспроизведение на гидравлической деформируемой модели в масштабе глубины потока, представляется возможным моделировать с соблюдением всех трех видов гидравлического подобия: геометрического, динамического и кинематического. Авторами разработана методика гидравлического моделирования этой категории рек в естественных и проектных условиях при структурной (грядовой) и бесструктурной формах транспорта донных наносов и приведено 5 примеров решения практических задач на реках горно-предгорной зоны (глава 10).

На основе изложенного в монографии опыта авторов по использованию экспериментальных гидравлических методов исследований как научно-методического, так и производственного характера, можно с уверенностью сделать общий вывод о том, что метод лабораторных исследований и гидравлического моделирования морфологических и гидравлических процессов, происходящих в речных руслах, представляется эффективным, незаменимым средством развития теории руслового процесса, экспериментального изучения и количественного описания структуры руслового потока, механизма и деталей взаимодействия турбулентного потока с подстилающей, сыпучей зернистой поверхностью дна и подрусловым потоком, гидравлического сопротивления русла потоку, разработки методов расчета и прогноза характеристик транспорта наносов и русловых деформаций, совершенствования методов гидравлического моделирования на жестких и деформируемых моделях речных русел и решения многочисленных и разнообразных практических задач в области речной гидравлики, руслового процесса и гидротехники.

Касаясь роли математических методов и математического моделирования в развитии знаний о речных потоках и русловом процессе и в решении практических задач в этой области, с сожалением приходится констатировать, что в настоящее время их возможности по сравнению с физическими методами все еще весьма ограничены, а реальный вклад в решение практических задач чрезвычайно скромнен. Бытующие представления и оптимистические суждения о высокой эффективности и перспективах математических методов исследований и математического моделирования в развитии теории руслового процесса и ее прикладных аспектов, как о методах, альтернативных физическим методам исследований, к тому же обладающих якобы такими «преимуществами», как дешевизна, удобство и быстрота выполнения исследований, в настоящее время представляются весьма иллюзорными, не выдерживающими серьезной критики.

Эти методы не могут рассматриваться в качестве конкурентоспособной альтернативы лабораторно-экспериментальному методу исследований, как наиболее эффективному инструменту изучения гидравлических и морфологических явлений и процессов, происходящих в речных руслах, механизма и деталей этих процессов (главы 3–6, 9, 10 настоящей монографии).

Существующие методы и результаты математического моделирования, все чаще и энергичнее предлагаемые и шире используемые в настоящее время для «научного обоснования» и учета в ответственных и дорогостоящих проектах при оценке характеристик руслового процесса, транспорта наносов, режима русловых деформаций и гидравлических характеристик потока в бытовых и проектных условиях, как правило, сами еще в большей степени нуждаются в научном обосновании правомерности их использования и достоверности предлагаемых на их основе решений.

Дальнейшее развитие лабораторного дела и методов гидравлического моделирования речных потоков и русловых процессов представляется возможным лишь в комплексе с развитием общей теории руслового процесса и речной гидравлики, а также гибридного моделирования, сочетающего в себе преимущества физических и математических методов исследований, физического и математического моделирования. Отмеченное потребует прежде всего качественного прогресса в развитии систематических натурных исследований речных русел, расширения существующей сети стандартных гидрологических наблюдений в направлении создания специализированной сети русловых станций и организации массового мониторинга водных объектов, их дна и берегов, в соответствии с Водным кодексом Российской Федерации 2006 г. и постановлением Правительства «Об утверждении Положения и осуществлении Государственного мониторинга водных объектов» (2007 г.).

Еще раньше, согласно своду правил СП 11–103 «Инженерно-гидрометеорологические изыскания для строительства», русловые процессы включены в перечень опасных гидрометеорологических процессов и явлений, способных оказывать негативное аккумулятивно-эрозионное воздействие на дно, берега русла и пойму реки, нарушающее устойчивость или нормальные условия эксплуатации размещаемых здесь инженерных сооружений.

Как показал уже довольно обширный опыт, значительное число участков рек разной величины оказывается выведенными из состояния динамического равновесия различными причинами естественного и антропогенного характера. Предвидение таких процессов, их отслеживание и принятие соответствующих мер для нормализации гидрологического и руслового режимов рек, а также для защиты объектов экономики предопределяет ведение мониторинга руслового процесса в пределах всей площади речных водосборов.

Важнейшим условием развития методов лабораторных исследований и гидравлического моделирования речных потоков и руслового процесса является обобщение богатого международного опыта и оперативный обмен информацией между гидравлическими лабораториями различных стран, а также оживление международного сотрудничества в этой области. При этом особенно ценным представляется призыв профессора Г. Вольмерса из Мюнхенского университета Бундесвера, «иметь мужество» публиковать и негативный опыт исследований на деформируемых моделях речных русел [466, с.140].

В заключение — об экономической эффективности работ, выполняемых с помощью экспериментальных исследований и физических гидравлических моделей.

Стоимость научных исследований с использованием гидравлических моделей речных русел в абсолютном выражении может составлять значительную сумму. Однако относительно стоимости проектов, для обоснования которых они проводятся, эти расходы, как правило, составляют незначительную долю, часто менее одного процента. При этом социальная, экономическая и экологическая эффективность выполнения модельных исследований оказывается чрезвычайно высокой, поскольку эти работы помогают из множества альтернативных проектных предложений и вариантов обосновывать выбор социально приемлемого, технически наиболее надежного, экономически выгодного и экологически ответственного решения.

Так, экономический эффект от выполнения НИР в Отделе русловых процессов ГГИ с использованием физических моделей, согласно многочисленным справкам, подтвержденным заказчиками работ, составляет 5–30 рублей на один рубль затрат на НИР.

Как отмечалось в главе 1, большинство крупнейших зарубежных гидравлических лабораторий мира, в которых широко представлена русловая тематика за последние два-три десятилетия, претерпели радикальные изменения или находятся в стадии реорганизации. Русловая лаборатория ГГИ, функционирующая с середины прошлого века, также нуждается в кардинальной модернизации, прежде всего, технической и технологической. Необходимо реконструировать существующие и предусмотреть новые лабораторные площади больших размеров с более мощными энергетическими установками, оснастить лабораторию новейшими средствами измерения гидравлических и морфологических характеристик потока и русла, предусмотреть приобретение современного оборудования, плавсредств и средств измерения характеристик потока и русла для работы на реках. Представляется также целесообразным вернуться к первоначальному проекту Русловой лаборатории, предусматривавшему перекрытие плотиной р. Юля-Йоки для создания водохранилища, предназначенного для подачи (при необходимости) на модели водных объектов больших расходов «дешевой» воды.

И наконец, авторы считали бы целью, поставленную ими при написании этой монографии, в основном достигнутой, если изложенный в ней материал внесет реальный вклад в объективную оценку современного состояния лабораторного дела и знаний о речном русле, а также будет способствовать эффективному поиску предпочтительных методов и путей дальнейшего развития этих знаний для решения на глобальном, региональном и локальном уровнях задач рационального хозяйственного использования, охраны, восстановления и мониторинга речных русел и пойм и всей гидрографической сети в целом — важнейшего и уязвимого компонента окружающей природной среды. Решение перечисленных проблем в условиях все возрастающей хозяйственной деятельности на речных водосборах и в руслах и поймах рек, а также естественных и антропогенных изменений климата превращается в одну из приоритетных задач устойчивого развития современной цивилизации.

## CONCLUSIONS

The history of the use of the experimental method (hydraulic laboratory facilities and models) for investigation of morphological and hydraulic processes occurring in the river channels and practical application of obtained knowledge covers the period of more than 110 years — the period of stationary river hydraulic laboratories operation.

Earlier, pioneer episodic investigations on the base of hydraulic channel models were performed by L. Fargue (1875), O. Reynolds (1885) and L.F. Vernon-Harcourt (1886).

During the period of 1900–2010 a lot of fundamental and applied investigations for the river flows, channel processes and sediment transport were performed in tens of the largest experimental hydraulic centers of Europe, America and Asia with the use of laboratory facilities and the channel models in order to find a decision for the wide range of engineering problems related to the river channels and flood plains.

Because of insufficient level of knowledge about processes occurring within the river channels and lack of closed system of equations describing channel processes, in various scientific schools and laboratories great difference is typical in principle approaches to the problem of hydraulic modeling of morphological and hydraulic processes on the base of fixed and mobile bed physical models of the river channels, and particular methodological issues and practice of modeling. All this determines multiplicity and variety of methods for calculations of hydraulic models and, consequently, experimental results and decisions obtained on the base of such modeling.

Thus, under these conditions the exchange of experience and information between various laboratories acquires great importance taking into account long period of time and significant labour and financial expenses connected with organization and execution of experimental and model investigations.

The monograph presents the results of experimental investigations and hydraulic modeling of the river flows and the channel processes performed by the authors in the Channel Laboratory of the SHI with the purpose of development of the channel processes general theory; creation of methods for hydraulic modeling with the use of fixed and mobile scale models of the river channels, and substantiation of decisions to practical engineering problems. This monograph is not a report about studies performed in the SHI Channel Laboratory. It is also neither a textbook nor a manual on laboratory investigations and on hydraulic modeling of the river flows and channel processes. This monograph just presents the authors' own experience on the use of laboratory methods and hydraulic modeling in the Channel Laboratory of the SHI.

In agreement with the postulates of the hydrological and morphological conception of the river channel processes taken in the monograph as methodological base for experimental studies and hydraulic modeling, main attention in laboratory investigations both of scientific and methodological as well as a practical (industrial) directions performed by the authors was paid to 1) types of the channel processes, 2) discrete structures of the turbulent flow and the channel relief, and 3) sediment transport as discrete forms of various hierarchical levels (separate particles, micro- and mesoforms of the channel relief).

On the base of the above mentioned methodological principles of the hydrological and morphological theory of the channel processes laboratory investigation of turbulent structure of the channel flow and generation of channels of various types were performed and mechanism of such channels' functioning was studied. Mechanism of interaction between turbulent flow and underflow is studied and complex of additional similarity criteria for mobile models was developed that provides qualitatively equal mechanism of interaction between turbulent flow and underlying loose material both in the natural and in laboratory conditions.

Regularities and mechanism of formation of the bed material granulometric composition at the river channels mobile models was studied taking account of the channel relief morphology, flow structure and characteristics of sediments' mobility.

Laboratory investigations of hydraulic resistance and discharge capacity of the river channels with various types of the channel processes and forms of sediment transport were performed to identify individual, group and total contributions to hydraulic resistance of the river and channel forms (bends, pools, riffles, micro- and mesoforms of the channel relief). These investigations differ from the tradition accepted in the river hydraulics to assess hydraulic resistance integrally by "selection" of roughness coefficient  $n$  on the base of qualitative description of conditions for the pass over boundary surface by flow. It was established that pools and riffles in the meandering channels are not the forms of resistance at the channel forming discharges and don't make additional contribution to the hydraulic resistance of the flow. It should be considered as experimental confirmation of Velikanov's principle of the «least resistance river bed» — minimum rate of energy dissipation in the streamflow [43, p. 73–74] (Fig. 6.2).

Experiments with the use of 82-meters long hydraulic flume with various river bed conditions (smooth without dunes, covered with microforms, and with sidebars over which surface microforms migrate, and with sidebars without microforms) revealed that hydraulic resistance and discharge capacity of the river channels are widely dependent on forms and regimes of sediment transport.

Hydraulic resistance values increase in the following sequence: from smooth (without dunes) river bed (minimal hydraulic resistance) through sidebars without microforms and river channel covered by microforms to sidebars with microforms at their surface (maximal hydraulic resistance) (Fig. 6.3).

Maximal problem of modeling of river channels with the use of fixed and mobile models is the case of the large plain rivers with the sand channels. In this case main difficulties are related to impossibility of the sand modeling in linear scale of the model and to great difference between horizontal plan and vertical dimensions of such river channels. In general, all this does not allow to reproduce river reach of required length without the distortion of the linear model dimensions and to provide mobility of the bed material similar to natural one in conditions of limited experimental area.

In this connection, in the Channel Laboratory of the SHI and in other laboratories of the World as well, either fixed models are used more often than mobile hydraulic models or approximate modeling on the base of mobile models is performed that allows investigators to get qualitative answers to questions of their interest. Interpretation of such model results should be made with great care. Moreover, hydraulic modeling of plain rivers is one of the methodical components (support means) within the complex

of methods that includes field investigations, hydromorphological analysis, hydraulic modeling, laboratory experiments, mathematical modeling and others.

Place and role of model investigations among the complex of other methods when modeling of the large plain rivers are defined depending on the specific features of the study object and on the definite problem stated for this object. Exactly with such models it is possible to obtain important deficient information for solution to the study problem and to develop reasoned recommendations for its solution.

Examples of practical problems' solution at fixed models of the river channels are given in the Chapter 8. All of them are cutdown versions of results obtained in the River Channel Laboratory of the SHI during typical scientific investigations. These results are also described in more details in the Reports on the performed investigations and passed to clients (Annex 1) and in publications [59, 116, 141, 157].

By reason of impossibility of bed material modeling in geometric scale at mobile models, under physical modeling of the large plain rivers with sand bed there inevitably arises the problem of using of light weight material for bed sediments that can help to keep similarity of mobility and other characteristics of sediment transport in models either without distortion of model geometric scales or with these scales minimum distortion.

Modern practice of the light weight material use in the scale mobile models allows to make only qualitative conclusions due to lack of reliable quantitative dependences for models' calculations and for conversion of dynamic characteristics of sediment transport, bed relief and channel processes from models to the prototype.

Based on experiments performed by the authors in the Channel Laboratory of the SHI at 8-meters long hydraulic flume with five types of light weight material of various density ( $1.19\text{--}1.85\text{ g/cm}^3$ ) and with particles of different size ( $0.33\text{--}1.82\text{ mm}$ ) and also with natural sand consisting of particles of the same size (more than 100 experiments), relationships (9.15 and 9.17) were defined that allow to fit and convert dynamic characteristics of bed relief and channel process from model to the nature in case of the bed sediments moving in the form of dunes.

Rivers of mountain and piedmont zone composed of coarse alluvium are the most well-defined and easy object for laboratory investigations. Due to relatively small absolute dimensions and coarse channel material, it is possible to reproduce such rivers in hydraulic mobile models in the scale of flow depth. Thus, modeling of these rivers can be made maintaining of all types of similarity: geometric, dynamic and kinematic ones. The authors developed method for hydraulic modeling of rivers of such kind in natural and project conditions at structural (dunes) and structureless forms of bed sediment transport (Chapter 10). In this chapter five examples of practical problems' solution for rivers of mountain and piedmont zone are presented as well.

Basing on the authors' experience, described in the monograph, on the use of experimental hydraulic methods for scientific-methodological and industrial investigations general conclusion can be definitely made that method of laboratory investigations and hydraulic modeling of morphological and hydraulic processes in the river channels seems to be effective and indispensable means for 1) development of the theory of river channel processes, 2) experimental studies and quantitative description of flow structure, mechanism and details of interaction between turbulent



flow and both underlying loose granular river bed and underflow, hydraulic resistance of the channel, 3) creation of methods for computation and forecast of characteristics of sediment transport and the river channel deformations, 4) improvement of methods for hydraulic modeling on the base of fixed and mobile models of river channels, and 5) solution of numerous practical problems in the fields of river hydraulics, channel processes and river engineering.

In reference to the role of mathematical methods and mathematical modeling in the development of knowledge about river flow and channel processes and in solution of practical problems in this field, it should be regretted that their potential are still limited at present if to compare with physical methods, and real contribution of mathematical methods and modeling into solution of practical problems is quite modest. Current ideas and optimistic judgments about high efficiency and prospects of mathematical methods and mathematical modeling in the development of the theory of river channel processes and its applied aspects as about methods of investigation alternative to physical ones and the ones allegedly possessing such “advantages” as cheapness, simplicity and high speed of their realization seem to be quite delusive and not standing up to serious criticism.

Mathematical methods and mathematical modeling cannot be considered as competitive alternative to laboratory-experimental method of investigations which proved itself as an effective instrument for the study of hydraulic and morphological phenomena and processes occurring in the river channels, and mechanisms and details of these processes (chapter 3–6, 9, 10 of the monograph).

Existing methods and results of mathematical modeling at present are increasingly and more actively suggested and widely used for “scientific substantiation” and adoption in responsible and expensive projects for assessment of the river channel processes, sediment transport, and regime of channel deformation in the natural and design conditions. However, these methods and results themselves require scientific substantiation of their use legitimacy and reliability of solutions made on their basis.

The further development of laboratory investigations and methods of hydraulic modeling of river flows and channel processes seem to be possible only in complex with the development of the general theory of the river channel processes and river hydraulics and of hybrid modeling as well that combine advantages of physical and mathematical methods of investigations and physical and mathematical modeling. Firstly all this will require qualitative progress in development of systematic natural investigations of the river channels, extension of existing network of standard hydrological observations for creation of special network of the river channel stations and organization of the large scale monitoring of water bodies, their bottoms and banks in accordance with the Water Code of the Russian Federation of 2006 and Government decree “On approval of the Provision and execution of the state monitoring of water bodies” (2007).

Earlier, in accordance with Handbook of Instructions (HI) 11–103 “Engineering and hydrometeorological surveys for construction”, the river channel processes were included in the list of hazardous hydrometeorological processes and phenomena that can have negative accumulative and erosional impacts on river beds, channel banks and river flood plains disturbing stability and normal conditions of operation of engineering structures installed there.

As sufficiently extensive experience showed, considerable number of river reaches of various lengths appears to be with upset dynamic equilibrium due to various processes of natural and anthropogenic characters. Forecast of such processes, their monitoring and development of appropriate measures for normalization of hydrological and channel regimes of the rivers and for protection of riverside economic objects predetermine monitoring of the river processes over the whole area of river basin.

The most important factors for development of methods for laboratory investigations and hydraulic modeling of streamflows and the river channel processes are the synthesis of vast international experience and on line exchange of information between hydraulic laboratories in various countries as well as revival of international cooperation in this area. At this, especially important is appeal of professor G. Wolmers from the University of Bundeswehr in Munich to “have the courage” to publish as well negative experience of investigations on the base of mobile models of the river channels [466].

In conclusion it should be mentioned about economical effectiveness of studies performed with the use of experimental investigations and physical hydraulic models.

Cost of scientific investigations with the use of hydraulic models of the river channels in absolute terms may amount to substantial sum. However, such expenses usually amount to insignificant part (more often less than one percent) of the projects' cost for which these investigations were performed. At this, social, economic and ecological effectiveness of model investigations performing appears to be exceedingly high because such studies help to substantiate the selection of socially acceptable, the most technically reliable, economically and ecologically responsible solution among numerous alternative suggestions and design variants.

Thus, economical effect from scientific investigations performing in the Department of channel processes of the SHI on the base of physical models amounts to 5–30 rubles per one ruble of expenses for these investigations according to numerous certificates confirmed by clients.

As it was noted in chapter 1, majority of the largest foreign hydraulic laboratories of the World, where the river channels' investigations are widely presented, underwent radical changes during the past two-three decades or are in the process of reorganization. The Channel Laboratory of the SHI operating from the middle of the past century also requires principal modernization firstly in engineering and technological aspects. It is necessarily 1) to reconstruct existing laboratory areas and to provide new ones of larger size with more high-energy power installations, 2) to equip laboratory with modern instruments for measuring of hydraulic and morphological characteristics of river streamflows and channels, 3) to provide acquisition of modern equipment, floating crafts and instruments for characteristics measuring of river streamflow and channel used for observations at rivers. It seems also appropriate to return to the original project of the SHJ Channel Laboratory that provided damming out the Iulyoki river for reservoir construction meant for transport (when it is necessary) of cheap high discharges for model water objects.

Finally, the authors would consider that purpose stated in the monograph is almost fulfilled, if the presented material would make practical contribution to the objective assessment of the present state of laboratory studies and knowledge on the river channels, and would assist effective search of preferred methods and ways for the further

development of such knowledge for solution of problems at global, regional and local levels concerning practical utilization, protection, rehabilitation and monitoring of the river channels and flood plains and hydrographic system as a whole being the most important and vulnerable component of the environment. Solution of all these issues in conditions of increasing economic activities at river basins in river channels and flood plains under natural and anthropogenic climate changes becomes one of the most priority challenges for the sustainable development of the modern civilization.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Абальянец С.Х., Каранетян М.Р.* Моделирование русловых процессов в легкоразмываемых руслах с применением натурального песка // *Водные ресурсы.* М., 1976. № 5. С. 127–134.
2. *Абрамов М.Э.* Моделирование рек, несущих наносы. IV Гидрологическая конференция Балтийских стран. Л., 1933. 19 с.
3. *Аверкиев А.Г.* Новый метод гидравлических модельных исследований // *Изв. ВНИИГ.* 1952. Т. 47. С. 3–19.
4. *Айвазян О.М.* Основы гидравлики равномерных течений. РГУ нефти и газа им. И.М.Губкина. М., 2006. 151 с.
5. *Алтунин С.Т., Орлов И.Я.* О моделировании размываемых русел // *Гидротехническое строительство.* 1949. № 12. С. 11–16.
6. *Алтунин С.Т.* Регулирование русел. М., 1956. 335 с.
7. *Алтунин С.Т.* Моделирование размываемых русел и речных сооружений // *Русловые процессы.* М.: Изд. АН СССР, 1958.
8. *Алтунин В.С.* О моделировании размываемых русел // *Доклады Всесоюзной академии сельскохозяйственных наук.* 1967. № 4. С. 39–41.
9. *Алтунин В.С.* Деформации русел каналов. М., 1972. 118 с.
10. *Алтунин В.С.* Мелиоративные каналы в земляных руслах. М., 1979. 256 с.
11. *Альтшуль А.Д., Киселев П.Г.* Гидравлика и аэродинамика. М., 1975. 326 с.
12. *Ананян А.К., Назарян А.Г., Тер-Аствацатрян М.И.* Методы и результаты модельных исследований по русловым процессам // *Результаты комплексных исследований по Севанской проблеме.* Т. 2. Ереван, 1962. С. 193–220.
13. *Ананян А.К.* О моделировании русловых процессов при непрерывном понижении отметки базиса эрозии реки // *Гидротехническое строительство.* 1962. № 11. С. 37–39.
14. *Андреев О.В., Ярославцев И.А.* Русловые деформации на участках рек с мостовыми переходами // *Русловые процессы.* М., 1958.
15. *Андреев О.В., Ярославцев И.А., Малютин Г.А.* Моделирование русловых процессов. М., 1958. 49 с.
16. *Андреев О.В.* Масштабные множители для моделирования русловых деформаций // *Гидравлика дорожных водопропускных сооружений.* Киев, 1969. С. 9.
17. *Артамонов К.Ф., Талмаза В.Ф., Макбетова Т.Б.* Некоторые результаты лабораторных исследований движения воды на повороте открытого русла // *Вопросы водного хозяйства.* Фрунзе, 1968. Вып. 2. С. 33–56.
18. *Артамонов К.Ф., Крошкин А.Н., Калиниченко Г.В.* Вопросы регулирования русловых потоков бетонными стенками // *Вопросы водного хозяйства.* Фрунзе, 1969. Вып. 17. С. 3–17.
19. *Барышников Н.Б., Попов И.В.* Динамика русловых потоков и русловые процессы. Л., 1988. 454 с.
20. *Базилевич В.А., Гайдученко В.И.* Экспериментальное исследование формирования гравийно-галечных русел // *Водные ресурсы.* 1978. № 3. С. 169–184.
21. *Беликов В.В., Зайцев А.А., Милитеев А.Н.* Компьютерные модели русловых процессов // *Доклады VI Всероссийского гидрологического съезда. Секция 6: Проблемы русловых процессов, эрозии и наносов.* М., 2006. С. 134–140.
22. *Беликов В.В., Ковалев С.В.* Численные исследования при решении гидравлических задач // *Гидротехническое строительство.* 2009. № 8. С. 61–67.

23. *Берденников В.П.* Физические характеристики заторов и зажоров льда // Труды ГГИ. 1965. Вып. 129. С. 19–43.
24. *Берденников В.П.* Модельные исследования механизма заторообразования для обоснования схемы ледозадержания на р. Днепр и определения ледовых нагрузок // Труды ГГИ. 1974. Вып. 219. С. 31–56.
25. *Береза А.И., Высоцкий Л.И., Золотарев И.В.* О моделировании медленных водных потоков // Изв. ВУЗов, Строительство и архитектура. 1967. № 7. С. 136–143.
26. *Близняк Е.В.* Река Енисей от Красноярска до Енисейска. Ч. II: Зимнее состояние реки. СПб., 1916. 79 с.
27. *Боголюбова И.В.* Селевые потоки и их распространение на территории СССР. Л., 1957. 150 с.
28. *Боголюбова И.В.* Результаты полевых исследований и расчет стока влекомых наносов р. Мзымты // Тр. ГГИ. Вып. 156. Л., 1968. С. 39–63.
29. *Болотников Г.И.* Исследование ледовых явлений на гидравлических моделях речных участков // Тр. ГГИ. Вып. 345. Л., 1989. С. 3–17.
30. *Болотников Г.И.* Математическое и гидравлическое моделирование заторов льда. Обзорная информация, сер. Гидрология суши, № 1– Обнинск. ВНИГМИ–МЦД. 1989. 28 с.
31. *Боровков В.С.* Русловые процессы и динамика речных потоков на урбанизированных территориях. Л., 1989. 288 с.
32. *Брукс Э.В.* О законах подобия, применяемых в гидротехнических лабораториях. Записки Государственного гидрологического института, 1932.
33. *Бузин В.А.* Заторы льда и заторные наводнения на реках. СПб., 2004. 204 с.
34. *Бузин В.А.* Математическое моделирование в решении задач расчета и прогноза заторов льда // Метеорология и гидрология. № 2 ГУ НИЦ космической гидрометеорологии «Планета». 2009. С. 68–79.
35. *Бутаков А.Н.* Гидравлика развития мезоформ речного русла. М., 1999. 215 с.
36. *Бутаков А.Н.* Воспроизведение побочного процесса на лабораторной микро-реке // Тр. IV Всесоюзного гидрологического съезда. Т. 10. Л., С. 99–110.
37. *Бухин М.Н.* Переформирование русел предгорных участков рек при регулировании их защитно-выправительными сооружениями типа полузапруд; Автореф. дис. ... докт. техн. наук. Киев, 1966.
38. *Васильев О.Ф., Годунов С.К., Притвиц И.А., Темноева В.А.* Численный метод расчета распространения длинных волн в открытых руслах и приложение его к задаче о паводке // Докл. АН СССР. 1963. Т. 151. № 3.
39. *Васильев О.В. и др.* Применение современных численных методов и цифровых ЭВМ для решения задач гидравлики открытых русел // Гидротехническое строительство. М., 1965. № 8. С. 44–48.
40. *Васильченко Г.В.* Исследование связи между турбулентными характеристиками потока в придонной области и подстилающим его несвязном грунте // Динамика и термика рек. М., 1973. С. 118–126.
41. *Векслер А.Б.* Основные уравнения одномерного руслового потока в размываемом русле // Известия ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева. 1969. Т. 90. С. 169–179.
42. *Векслер А.Б., Доненберг В.М., Мануилов В.А., Коротков Н.И.* Некоторые аспекты расчета трансформации русла в нижних бьефах гидроузлов // Доклады VI Всероссийского гидрологического съезда. Секция 6: Проблемы русловых процессов, эрозии и наносов. М., 2006. С. 155–160.
43. *Великанов М.А.* Русловой процесс. М., 1958. 395 с.
44. *Великанов М.А.* Динамика русловых потоков. 3-е изд. М., 1954–1955. Т. 1. 323 с.; Т. 2. 326 с.
45. *Великанова З.М.* Лабораторные исследования речной излучины // Тр. ГГИ. Вып. 147, Л., 1968. С. 40–51.

46. *Великанова З.М.* Грядовое движение наносов на модели речной излуины // Тр. ГГИ. Вып. 169. Л., 1969. С. 87–95.
47. *Вернадский В.И.* О науке. Т. 1: Научное творчество. Научная мысль. Дубна, 1997. 427 с.
48. *Винников С.Д.* Исследование формирования ледяного затора на модели русла // Тр. Координационных совещаний по гидротехнике. Вып. 111. Л., 1976. С. 68–72.
49. *Виноградов В.А.* Некоторые закономерности формирования русла и поймы р. Поломети // Тр. ГГИ. 1962. Вып. 95. С. 156–172
50. *Виноградов В.А.* Натурные исследования морфологии и гидравлики излучин свободного меандрирования // Тр. ГГИ. 1970. Вып. 183. С. 119–137.
51. *Виноградов В.А.* Некоторые особенности структуры потока и морфологии излучин при свободном меандрировании // Тр. ГГИ. 1978. Вып. 209. С. 39–59.
52. *Виноградов В.А., Клавен А.Б., Никитин В.Н.* Об иерархической структуре руслового рельефа // Метеорология и гидрология. 1999. № 7. С. 92–99.
53. *Виноградов В.А., Клавен А.Б.* О скоплениях наносов в русле р. Поломети и их влияние на элементы гидрологического режима // Тр. ГГИ. 2002. Вып. 361. С. 196–215.
54. *Воеводин А.Ф., Никифоровская В.С., Остапенко В.В.* Анализ численных моделей неустановившегося течения в руслах и поймах // Доклады VI Всероссийского гидрологического съезда. Секция 6: Проблемы русловых процессов, эрозии и наносов. М., 2006. С. 115–119.
55. *Гачечеладзе Г.А.* О структурном механизме турбулентного потока // Гидрофизические процессы в реках и водохранилищах. М., 1985. С. 5–11.
56. *Гвеселиани Л.Г., Шмальцель Н.П., Прибыль Б.М.* Исследование заиления и занесения верхних бьефов в водохранилищах ГЭС на горных реках. ВНИИГ. Аннотация законченных в 1964 г. НИ работ по гидротехнике. М.; Л., 1965.
57. *Гейзенберг В.* Шаги за горизонт. М., 1987. С. 180–181.
58. *Гендельман М.М., Копалиани З.Д.* Опыт моделирования русловых процессов по гидравлическим сопротивлениям // Тезисы докладов научно-технической конференции «Повышение эффективности транспортного строительства и качества строящихся объектов». М., 1979. С. 174.
59. *Гендельман М.М.* Исследование пропуска половодий по поймам рек // Гидротехническое строительство. 1981. № 11. С. 32–36.
60. Гидравлическое моделирование / Пер. с англ., под ред. Е.В. Близняка. М.; Л., 1947. 135 с.
61. Гидравлико-морфологические исследования рек и водоемов // Труды ГГИ. 1969. Вып. 169. 208 с.
62. Гидравлические лаборатории СССР: Краткий справочник. М.; Л., 1965. 276 с.
63. Гидроморфологические исследования пойменного и руслового процессов // Тр. ГГИ. Вып. 183. Л., 1970. 204 с.
64. Гидротехническая лаборатория ведомства путей сообщения. СПб., 1912. 11 с.
65. *Гиляров Н.П.* Моделирование речных потоков. Л., 1973. 199 с.
66. *Гиргидов А.Д., Троицкий В.П., Лаксберг А.И.* О методах гидравлического расчета земляных каналов // Научные исследования при проектировании канала «Сибирь — Средняя Азия» В./о. «Союзводпроект». М., 1985. С. 112–124.
67. *Гончаров В.Н.* Движение наносов. Л.; М., 1938. 311 с.
68. *Гончаров В.Н.* Динамика русловых потоков. Л., 1962. 376 с.
69. *Гринвальд Д.И., Никора В.Н.* Речная турбулентность. Л., 1988. 152 с.
70. *Гринвальд Д.И., Зайцев Н.И., Клавен А.Б., Никора В.И.* Оценка характеристик русловой турбулентности по измерениям трех компонентов вектора скорости // Метеорология и гидрология. 1986. № 2. С. 69–74.

71. *Гришанин К.В.* Динамика русловых потоков. Л., 1979. 312 с.
72. *Гришанин К.В.* Гидравлическое сопротивление естественных русел. СПб., 1992. 182 с.
73. *Гришанин К.В.* Устойчивость русел рек и каналов. Л., 1974. 144 с.
74. *Грушевский М.С.* Неустановившееся движение воды в реках и каналах. Л., 1982. 288 с.
75. *Данелия Н.Ф.* Водозаборные сооружения на реках с обильными донными наносами. М., 1964. 335 с.
76. *Дебольская Е.И.* Динамика водных потоков с ледяным покровом. М., 2003. 278 с.
77. *Деев Ю.А., Попов А.Ф.* Весенние заторы льда в русловых потоках. Л., 1978. 110 с.
78. *Дейнека В.И.* Гидравлические исследования водозабора для предгорных рек Украины: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Киев, 1968. 28 с.
79. *Доброклонский С.В., Михайлова И.А., Мулюкова Н.Б.* Влияние фильтрационного потока на интенсивность отрыва твердых частиц от дна // Гидротехническое строительство, Энергоиздат. 1976. № 11.
80. *Донченко Р.В.* Ледовый режим рек СССР. Л., 1987. 248 с.
81. *Донченко Э.Г.* К вопросу о связи критериев подобия при моделировании пульсации и скорости в области автомодельности // Сб. докладов по гидротехнике. Л., 1966. С. 27–31.
82. *Дудукал Д.А., Дудукал В.С.* Лабораторный ультразвуковой профилограф // Тр. ГГИ. 1972. Вып. 195. С. 89–94.
83. *Дудукал В.С., Клавен А.Б., Ломунов Р.И., Теплов В.И.* Лабораторный измеритель расхода донных наносов // Тр. ГГИ. 1983. Вып. 306. С. 94–99.
84. *Егиазаров И.В.* Моделирование горных потоков, влекущих донные наносы // Докл. АН Арм. ССР. 1948. № 5. С. 193–202.
85. *Егиазаров И.В.* Обмен опытом гидравлических исследований и работы лабораторий за рубежом // Тр. III Всесоюзного гидрологического съезда. 1960. С. 256–262.
86. *Егиазаров И.В.* Обмен опытом гидротехнического экспериментирования // Гидротехническое строительство. 1935. № 6. С. 1–7.
87. *Железняков Г.В., Дебольский В.К.* О грядовом движении наносов при их различной плотности // Докл. ВАСХНИЛ. 1971. № 2. С. 42–45.
88. *Железняков Г.В.* Теория гидрометрии. Л., 1976. 343 с.
89. *Железняков Г.В.* Вопросы теории натурального гидравлического моделирования // Тр. МИИТ. М., 1996. Вып. 900. С. 29–33.
90. *Железняков Г.В.* Гистерезисные явления в гидравлике и гидрологии // Тр. МИИТ. М., 1996. Вып. 900. С. 50–54.
91. *Зайцев Н.И., Клавен А.Б.* Кинематическая структура руслового потока над крутыми песчаными грядами // Тр. ГГИ. 1983. Вып. 288. С. 86–96.
92. *Зайцев Н.И., Клавен А.Б.* Прибор для измерения характеристик макротурбулентности в лабораторных русловых потоках // Тр. ГГИ. 1983. Вып. 288. С. 117–125.
93. *Зайцев Н.И., Клавен А.Б.* Гидравлическая защита гидрометрических приборов от воздействия взвешенных наносов // Тр. ГГИ. 1983. Вып. 306. С. 131–133.
94. *Зайцев Н.И., Клавен А.Б., Ломунов Р.И., Сибилев В.В., Теплов В.И.* Измеритель полного вектора актуальной скорости и оборудование для его установки в потоке // Тр. ГГИ. 1983. Вып. 306. С. 35–43.
95. *Зайцев А.А., Кочетков В.В., Савельев Р.А., Третьюхина Е.С.* Основы численного моделирования наводнений, вызванных заторами льда // Тр. VI конференции «Динамика и термика рек, водохранилищ и прибрежной зоны морей». 2004. С. 143–146.
96. *Зегжда А.П.* Теория подобия и методика расчета гидротехнических моделей. М., 1938. 163 с.
97. *Зегжда А.П.* Гидравлические потери в каналах и трубопроводах. М.; Л., 1957. 277 с.

98. *Знаменская Н.С.* Анализ потерь энергии в потоке с грядовым дном // Тр. ГГИ. 1961. Вып. 88. С. 125–136.
99. *Знаменская Н.С., Филаретова М.М.* Экспериментальное исследование гидравлики пойменных русел при ограниченном меандрировании // Тр. ГГИ. 1970. Вып. 183. С. 54–69.
100. *Знаменская Н.С.* О формировании рельефа пойм меандрирующих рек // Тр. ГГИ. 1973. Вып. 209. С. 91–102.
101. *Знаменская Н.С.* Донные наносы и русловые процессы. Л., 1976. 189 с.
102. *Знаменская Н.С.* Гидравлическое моделирование русловых процессов. СПб., 1992. 239 с.
103. *Избаиш С.В.* Основы лабораторного опытного дела в гидротехнике. ОНТИ, 1938.
104. *Каган М., Хынку С.* Изучение движения наносов на воздушно-напорных установках // Новые методы и аппаратура для исследования русловых процессов. М., 1959. С. 130–136.
105. *Калиниченко Г.В.* Некоторые результаты сравнения расчетных и измеренных концентраций влекомых наносов // Вопросы водного хозяйства. Фрунзе, 1968. Вып. 9. С. 18–24.
106. *Кантуэлл Б.Дж.* Организованные движения в турбулентных потоках // Вихри и волны: Сб. ст. / Под ред. В.Н. Николаевского. М., 1984. С. 9–79.
107. *Караушев А.В.* Подобие открытых потоков при турбулентном режиме // Тр. ГГИ. 1948. Вып. 4. С. 159–174.
108. *Караушев А.В.* Теория и методы расчета речных наносов. Л., 1977. 270 с.
109. *Католиков В.М., Копалиани З.Д.* Побочни в руслах рек: условия образования и их динамика // Водная ресурсы. 2001. Т. 28. № 5. С. 579–586.
110. *Карасев И.Ф.* Русловые процессы при переброске стока. 2-е изд. Л., 1975. 288 с.
111. *Клавен А.Б.* Структура турбулентности речных потоков и методические основы их моделирования на гидравлических деформируемых моделях: Авт. дисс. ... д. техн. наук. ГГИ. СПб., 1996. 42 с.
112. *Клавен А.Б.* Исследование структуры турбулентного потока // Тр. ГГИ. 1966. Вып. 136. С. 65–76.
113. *Клавен А.Б.* Кинематическая структура турбулентного потока // Тр. ГГИ. 1968. Вып. 147. С. 134–141.
114. *Клавен А.Б., Копалиани З.Д.* Лабораторные исследования кинематической структуры турбулентного потока с сильно шероховатым дном // Тр. ГГИ. 1973. Вып. 209. С. 67–89.
115. *Клавен А.Б., Копалиани З.Д.* О связи длины гряд с продольным размером крупномасштабных элементов турбулентности // Тр. ГГИ. 1974. Вып. 219. С. 19–24.
116. *Клавен А.Б., Смищенко Б.Ф.* Основные черты руслового процесса в нижнем течении р. Селенги // Тр. ГГИ. 1978. Вып. 252. С. 38–51.
117. *Клавен А.Б., Копалиани З.Д.* Методы гидравлического моделирования руслового процесса. Обзорная информация. Вып. 2. Обнинск, 1980. 57 с.
118. *Клавен А.Б.* Оценка характеристик турбулентности русловых потоков // Тр. ГГИ. 1982. Вып. 278. С. 36–43.
119. *Клавен А.Б., Коковин В.Н.* Некоторые рекомендации по применению кинематографического метода в исследованиях кинематической структуры русловых потоков // Тр. ГГИ. 1983. Вып. 306. С. 77–87.
120. *Клавен А.Б., Никитин В.Н.* О кинематической структуре турбулентного руслового потока // Тр. ГГИ. 1990. Вып. 337. С. 3–15.
121. *Клавен А.Б., Коковин В.Н.* Опыт гидравлического моделирования донного рельефа // Тр. ГГИ. 1990. Вып. 337. С. 109–123.



122. *Клавен А.Б., Никитин В.Н.* О некоторых подходах к изучению сложных явлений на гидравлических моделях рек // Изв. ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева. СПб., 2002. № 240. С. 98–107.
123. *Клавен А.Б., Никитин В.Н., Теплов В.И.* Экспериментальные исследования и гидравлическое моделирование аварийных разливов нефти в реках // Тр. VI Всесоюзного гидрологического съезда. Секция 6. 2006. С. 146–150.
124. *Клавен А.Б., Бузин В.А., Копалиани З.Д., Никитин В.Н., Теплов В.И.* Лабораторные исследования процесса формирования заторов льда и эффективности противозаторных мероприятий на реке Лене у г.Ленска // Доклады VI Всероссийского гидрологического съезда. Секция 2: Наводнения и другие опасные гидрологические явления: оценка, прогноз и смягчение негативных последствий. М., 2006. С. 154–159.
125. *Клавен А.Б., Виноградов В.А., Копалиани З.Д.* Натурные исследования руслового процесса на р. Поломети. Гидрологические исследования на Валдае: Сб. статей к 75-летию основания Валдайского филиала ГГИ. Валдай, 2008. С. 71–93.
126. *Колмогоров А.Н.* Локальная структура турбулентности в несжимаемой вязкой жидкости при очень больших числах Рейнольдса // Докл. АН СССР. 1941. Т. 30. № 4. С. 299–303.
127. *Кондратьев Н.Е.* Условия непрерывности и дискретности в применении к русловому потоку // Метеорология и гидрология. 1951. № 12. С. 36–41.
128. *Кондратьев Н.Е.* Кинематическая структура потока при грядовом строении дна // Тр. ГГИ. 1964. Вып. 116. С. 3–18.
129. *Кондратьев Н.Е.* Гидроморфологические процессы и методы их изучения.: Автореф. дис. ... д. техн. наук. Л., 1968. 246 с.
130. *Кондратьев Н.Е.* Заключительное слово // Морфология речных русел и их моделирование. Бакинский филиал ВНИИ «ВОДГЕО», 1972. С. 110–111.
131. *Кондратьев Н.Е.* Дискретность русловых процессов // Тр. ГГИ. 1978. Вып. 252. С. 3–19.
132. *Кондратьев Н.Е., Попов И.В., Смищенко Б.Ф.* Основы гидроморфологической теории руслового процесса. Л., 1982. 272 с.
133. *Коновалов И.М., Баланин В.В.* О теории формирования речных русел // Тр. III Всесоюзного гидрологического съезда. Т. V. Л., 1960. С. 64–73.
134. *Копалиани З.Д., Ромашин В.В.* Проблемы русловой динамики горных рек // Тр. ГГИ. 1970. Вып. 183. С. 81–98.
135. *Копалиани З.Д., Федорова З.Н.* Натурные исследования процессов затопления поймы и развития пойменных течений на р. Поломети у с. Заречье // Тр. ГГИ. Вып. 183. Л., 1970. С. 26–32.
136. *Копалиани З.Д.* Лабораторные исследования грядового движения крупных наносов // Труды ГГИ. 1972. Вып. 204. С. 61–74.
137. *Копалиани З.Д., Бородулина А.И., Першин С.К.* Лабораторные исследования кинематики потока и русловых деформаций в бытовых и проектных условиях на участке прижима реки Нюкжи по трассе БАМ // Тр. ГГИ. 1980. Вып. 275. С. 105–126.
138. *Копалиани З.Д.* Расчеты характеристик руслового рельефа и обратимых русловых деформаций на реках трассы БАМ // Тр. ГГИ. 1980. Вып. 275. С. 81–95.
139. *Копалиани З.Д., Рожков Г.Ф.* Метод статистического анализа гранулометрического состава наносов // Тр. ГГИ. 1982. Вып. 278. С. 56–59.
140. *Копалиани З.Д.* Лабораторные исследования закономерностей переформирования состава наносов на размываемых моделях речных русел // Тр. ГГИ. 1982. Вып. 278. С. 70–88.
141. *Копалиани З.Д.* Результаты лабораторных исследований на гидравлической модели участка русла р. Хани по трассе БАМ // Тр. ГГИ. 1983. Вып. 290. с.

142. *Копалиани З.Д., Твалавадзе О.А., Носелидзе Д.В.* Методика и результаты исследований русловых деформаций на неискаженной модели р. Хара-Мурин // Тр. ГГИ. 1985. Вып. 301. С. 68–80.
143. *Копалиани З.Д., Гендельман М.М.* Русловой процесс и гидравлические сопротивления. Проблемы современной гидрологии. Л., 1989. С. 288–304.
144. *Копалиани З.Д., Твалавадзе О.А., Носелидзе Д.И.* Гидравлическое моделирование руслового процесса р. Утулик на участке мостовых переходов // Тр. ГГИ. 1990. Вып. 337. С.138–162.
145. *Копалиани З.Д., Твалавадзе О.А., Носелидзе Д.И.* Гидравлическое моделирование руслового процесса предгорного участка р. Аносовки на мостовом переходе. Проблемы гидравлики и руслового процесса горных рек. Докл. Секции русловых процессов Научного совета по проблеме «Комплексное использование и охрана водных ресурсов», ГКНТ. Вып. 3. СПб., 1992. С. 88–106.
146. *Копалиани З.Д., Жук М.М.* О перспективах создания методов оценки гидрологических и гидравлических характеристик неизученных рек на основе гидроморфологических зависимостей / Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета. СПб., 2007. № 5. С. 86–97.
147. *Копалиани З.Д.* Методика расчета морфологического масштаба времени при исследовании руслового процесса на размываемых гидравлических моделях с заменителями песка // Изв. ВНИИГ. СПб., 2002. Т. 240. С. 108–115.
148. *Копалиани З.Д.* О гидравлическом моделировании на размываемых моделях речных русел с использованием заменителей наносов // Тр. ГГИ. 2002. Вып. 361. С. 146–183.
149. *Копалиани З.Д., Костюченко А.А.* Расчеты расхода донных наносов в реках. Сб. работ по гидрологии № 27. СПб., 2004. С. 25–40.
150. *Копалиани З.Д.* Концептуально-методологические и прикладные аспекты современной теории руслового процесса // Доклады VI Всероссийского гидрологического съезда. Секция 6: Проблемы русловых процессов, эрозии и наносов. М., 2006. С. 12–18.
151. *Копалиани З.Д., Клавен А.Б., Бузин В.А.* Гидравлическое моделирование заторных наводнений для решения задач управления ими и выбора противозаторных мероприятий // Сб. докладов Международной конференции «Управление водно-ресурсными системами в экспериментальных условиях». М., 2008. С. 254–255.
152. *Копалиани З.Д., Клавен А.Б., Католиков В.М., Коковин В.Н.* Пропускная способность речных русел и эффективность противопаводковых расчисток рек бассейна Кубани // Журнал университета водных коммуникаций. 2009. Вып. 1. С. 29–42.
153. *Коржув С.С., Андреева О.Б.* Ледовые заторы и наводнения на северных реках и их экологическая оценка // Изв. РАН. Серия геогр. 1986. № 1. С. 116–131.
154. *Корчоха Ю.М.* Исследования грядового движения наносов на р. Поломети // Тр. ГГИ. 1968. Вып. 161. С. 98–119.
155. *Костюченко А.А., Копалиани З.Д.* Особенности руслового процесса и стока донных наносов малых рек // Тр. VI Всероссийского гидрологического съезда. Секция 6. М., 2006. С. 44–49.
156. *Котлова Н.А.* Экспериментальные исследования образования гряд и антидюн из смешанного песка // Тр. ГГИ. 1968. Вып. 147. С. 146–155.
157. *Кротов А.П., Гончаров В.Д., Дьячков В.Н., Клавен А.Б., Коковин В.Н.* Взаимодействие руслового процесса реки с инженерными сооружениями. М., 1996. 145 с.
158. *Кудряшов А.Ф.* Воспроизведение русла побочного типа в лабораторных условиях // Тр. ГГИ. 1959. Вып. 69. С. 102–130.
159. *Куколевский Б.П.* О моделировании русловых потоков с искажением масштабов // Гидротехническое строительство. 1959. № 8. С. 50–52.

160. Кюндж Ж.А., Холи Ф.М., Вервей А. Численные методы в задачах речной гидравлики. М., 1985. 251 с.
161. Ламли Дж., Пановский Г. Структура атмосферной турбулентности. М., 1966. 264 с.
162. Лапшенков В.С. Основные положения методики моделирования русловых процессов в песчаных руслах // Тр. САНИИРИ. 1970. Вып. 120.
163. Лебедич С.П., Хузин Р.А., Исмагилов А.Х., Веснин Н.М., Алексейчук К.В. Региональные учения по ликвидации аварий // Трубопроводный транспорт нефти. 2000. № 2. С. 25–29.
164. Леви И.И. Моделирование гидравлических явлений. М., 1967. 234 с.
165. Лелявский С.Н. Введение в речную гидравлику / Пер. с англ. Н.Н.Федорова. Л., 1961. 229 с.
166. Лисер И.Я. О зависимостях для прогноза максимальных заторных уровней при вскрытии сибирских рек // Метеорология и гидрология. 1981. № 11. С. 20–25.
167. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа. М.; Л., 1973. 847 с.
168. Лосиевский А.И., Летнев М.В. Русловые лабораторные исследования. М., 1953. 55 с.
169. Лохтин В.М. О механизме речного русла. Вопросы гидротехники свободных рек. М.: Речиздат. С. 23–59.
170. Люди русской науки. Очерки о выдающихся деятелях естествознания и техники: В 2-х т. М.; Л., 1948.
171. Лятхер В.М., Прудовский А.М. Исследования открытых потоков на напорных моделях. М.: Энергия, 1971.
172. Лятхер В.М., Милитеев А.Н. Гидравлические исследования численными методами // Водные ресурсы. 1981. № 3. С. 60–79.
173. Макринова О.В., Кондратьев Н.Е. Экспериментальное исследование потерь волновой энергии в фильтрующем подстилающем слое // Тр. ГГИ. 1956. Вып. 56 (110). С. 27–35.
174. Маккавеев В.М. Вопросы теории речного потока и проблемы турбулентности // Сб. Трудов «Вопросы гидравлики и гидротехнического строительства». М.; Л., 1952.
175. Маккавеев В.М. Об исследовании русловых потоков на воздушных моделях и структуре открытых водных потоков // Новые методы и аппаратура для исследований русловых процессов. М., 1959. С. 137–145.
176. Маккавеев В.М. Турбулентность русловых потоков // Тр. ГГИ. 1965. Вып.124. С. 40–54.
177. Мандельброт Б. Фракталы и турбулентность; аттракторы и разброс // Странные аттракторы. М., 1981. С. 47–57.
178. Мандыч А.Ф. Твердый сток рек Западной Грузии: Автореф. дис. ... канд. г. наук. М., 1967. 24 с.
179. Маневич Я.З. О гидравлическом моделировании с искажением масштабов моделей // Изв. ВНИИГ. 1977. Т. 115. С. 67–72.
180. Материалы по изучению западно-европейских гидролабораторий. (Государственный научно-экспериментальный институт гражданских, промышленных и инженерных сооружений. Сообщение 28). М.; Л., 1931. 84 с.
181. Мейэр-Петер Е., Хожк Е., Мюллер Р. Международное регулирование Рейна от устья Иллы до Женевского озера. Докл. Научн.-исслед. ин-та по гидротехнике в Цюрихе. 1935.
182. Месерлянс Г.Г. Лабораторные исследования кинематики потока при устройстве карьера в излучине русла // Тр. ГГИ. 1975. Вып. 223. С. 98–103.
183. Месерлянс Г.Г. Лабораторные исследования влияния подводного карьера на излучине на кинематику потока и деформации русла // Тр. ГГИ. 1980. Вып. 263. С. 113–124.
184. Милович А.Я. Нерабочий изгиб потока жидкости // Бюлл. Политехн. об-ва. М., 1914. № 10. С. 26–49.

185. *Минский Е.М.* Турбулентность руслового потока. Л., 1952. 164 с.
186. *Мирицхулава Ц.Е.* Размыв речных русел. М., 1966.
187. *Мирицхулава Ц.Е.* Размыв русел и методика оценки их устойчивости. М., 1967. 179 с.
188. *Михайлова И.А., Мулюкова Н.Б.* Влияние фильтрационного потока на интенсивность отрыва твердых частиц от дна при нестационарном и неравномерном режимах течения // Гидротехническое строительство. Энергоиздат. 1981. № 1. С. 28–31.
189. *Михалев М.А.* Материалы по моделированию некоторых видов движения вязкой жидкости // Изв. ВНИИГ. 1975. Т. 108. С. 48–54.
190. *Михалев М.А.* Теория подобия и размерностей. СПб., 2001. 65 с.
191. *Монин А.С., Яглом А.М.* Статистическая гидромеханика. Ч. I. М., 1965. 640 с.
192. *Монин А.С., Яглом А.М.* Статистическая гидромеханика. Ч. II. М., 1967. 720 с.
193. *Мостепаненко М.В.* Философия и методы научного познания. Л., 1972. 263 с.
194. *Мухамедов А.М., Абдураунов Р.Р., Тузов В.Е.* Исследование русловых процессов урегулируемых сооружений Аму-Бухарского канала второй очереди // Тр. САНИИРИ. 1970. Вып. 124. С. 31–53.
195. *Мухамедов А.М.* Эксплуатация низконапорных гидроузлов на реках, транспортирующих наносы. Ташкент, 1976. 237 с.
196. *Назарян А.Г.* О некоторых методах моделирования русловых процессов // Результаты комплексных исследований по Севанской проблеме. Ереван, 1962. Т. 2. С. 180–193.
197. *Назарян А.Г.* Об искажении масштабов при моделировании // Гидротехническое строительство. 1963. № 6. С. 44.
198. *Нежиховский Р.А., Ардашева Г.В., Бузин В.А., Саковская Н.П.* Прогнозы заторов льда на крупных реках Сибири и Дальнего Востока // Тр. ГГИ. 1978. Вып. 248. С. 98–124.
199. *Никитин И.К.* Турбулентный русловой поток и процессы в придонной области. Киев, 1963. 142 с.
200. *Носелидзе Д.В.* Лабораторные исследования структурного транспорта наносов и регулирования руслового процесса на мостовых переходах предгорных рек: Автореф. дисс. ... канд. техн. наук. Тбилиси, 1994. 23 с.
201. Обмен опытом гидротехнического экспериментирования. Бюллетень № 4 (18). Л., 1937. 34 с.
202. Обмен опытом гидротехнического экспериментирования. Бюллетень № 1 (21). Л., 1940. 60 с.
203. *Обухов А.М.* О распределении энергии в спектре турбулентного потока // Изв. АН СССР. Сер. геогр. и геофиз. 1941. № 4–5. С. 453–463.
204. Общие вопросы теории руслового процесса / Под ред. К.В. Гришанина и Б.Ф. Снищенко. Докл. Секции русловых процессов ГКНТ. Л., 1986. 113 с.
205. Описание гидротехнических лабораторий СССР. Вып. I. Государственный научно-экспериментальный институт гражданских, промышленных и инженерных сооружений. М., 1930. 89 с.
206. *Орлов И.Я.* Русла рек и их моделирование // Тр. САНИИРИ. 1970. Вып. 124. С. 3–30.
207. Основы теории подобия и моделирования. Комитет научно-технической терминологии АН СССР. Сб. рекомендуемых терминов. М., 1973. Вып. 88. С. 3–18.
208. *Палкуев Я.А.* Механическое подобие в применении к испытанию моделей гидротехнических сооружений. М., 1932. 63 с.
209. *Панфилов Д.Ф.* Установившееся движение уплотненных масс мелкобитого льда на прямом участке реки // Лед и его воздействие на гидротехнические сооружения. Л., 1972. С. 170–174.
210. *Петерсен А.* Лабораторные исследования по инженерным воздействиям на реки / Пер. с англ., под ред. Б.Ф. Снищенко. Л., 1970. (ГГИ)

211. *Петров В.П., Петрова М.А.* Исследование скоростного поля потока в природных условиях // Тр. III ВГС. Т. V. Л., 1960. С. 342–346.
212. *Петровская Е.П., Складнев М.Ф., Самострелов П.В.* Гидравлические и гидротехнические лаборатории США. М.; Л., 1965. 127 с.
213. *Планк М.* Единство физической картины мира. М., 1966. 287 с.
214. *Попов И.В.* Методические основы исследований руслового процесса. Л., 1961.
215. *Попов И.В.* Деформации речных русел и гидротехническое строительство. 2-е изд. Л., 1969. 360 с.
216. *Попов И.В., Гаврин Ю.С.* Применение аэрофотосъемки к оценке процессов затопления и опорожнения речных пойм и развития пойменных течений // Тр. ГГИ. 1970. Вып. 183. 1970. С. 5–25.
217. *Попов И.В.* О соотношении ширины и глубины речного русла при разных типах руслового процесса // Тр. ГГИ. 1983. Вып. 288. С. 3–9.
218. *Прандтль Л.* Гидромеханика. М., 1949. 520 с.
219. Приборы и методы, применяемые для исследования русловых процессов и динамики водоемов // Тр. ГГИ. 1983. Вып. 306. 133 с.
220. *Прокофьев В.В., Богатенков Ю.В., Фомичев С.И., Болотников Г.И., Смищенко Б.Ф., Клавен А.Б.* Метод локализации и ликвидации аварийных разливов нефти на подводных переходах нефтепроводов // Трубопроводный транспорт нефти. 1999. № 11. С. 22–25.
221. *Проскураков Б.В., Берденников В.П.* Метод модельного исследования разрушения ледяного покрова // Тр. ГГИ. 1972. Вып. 192. С. 7–24.
222. *Прудовский А.М.* Изучение русловых деформаций на напорных моделях // Вторая межвузовская конференция. Движение наносов и гидравлический транспорт. Тезисы и аннотации. М., 1968. С. 36–38.
223. *Пушкарев В.Ф.* Движение влекомых наносов // Тр. ГГИ. 1948. Вып. 8 (62). С. 93–110.
224. Река Селенга в Забайкальской области / Составил инженер путей сообщения А.К. Старицкий. СПб., 1913. 120 с.
225. Рекомендации по прогнозу деформаций речных русел на участках размещения карьеров и в нижних бьефах гидроузлов. Л., 1988. 127 с.
226. Рекомендации по учету руслового процесса при проектировании ЛЭП. Л., 1973. 179 с.
227. *Ржаницын Н.А.* Моделирование естественных русловых потоков на размываемых моделях // Сб. «Русловые процессы». М., 1958. 173 с.
228. *Ржаницын Н.А.* Морфологические и гидрологические закономерности строения речной сети. Л., 1960. 237 с.
229. *Рожков Г.Ф.* К вопросу о гранулометрическом анализе счетом // Бюллетень МОИП. Отд. Геол. 1968. Т. X/III (6).
230. *Рожков Г.Ф. и др.* Дробный ситовой гранулометрический анализ // Литология и полезные ископаемые. 1973. № 3. С. 121–134.
231. *Рожков Г.Ф., Куликов В.Д.* Методика автоматической обработки результатов дробного ситового анализа // Тр. ВНИГРИ. 1975. Вып. 372. С. 94–118.
232. *Рожков Г.Ф.* Коэффициенты асимметрии и вариации гранулометрического состава осадков — индикаторы микрофациальных условий седиментации // Литология и полезные ископаемые. 1976. № 6. С. 137–149.
233. *Рожков Г.Ф.* Дифференциация обломочного материала и гранулометрическая диаграмма  $\tau$ ,  $\alpha$  по косвенному счёту частиц // Механическая дифференциация твердого вещества на континенте и шельфе. М., 1978. С. 97–116.
234. *Россинский К.И., Кузьмин И.А.* Закономерности формирования речных русел // Русловые процессы. М., 1958. С. 5–15.
235. Русловые процессы: Сб. статей. М., 1958. 394 с.

236. *Росинский К.И.* Моделирование деформации речных русел // Тр. ГГИ. 1968. Вып. 143. С. 49–58.
237. Руслонная лаборатория ГГИ. Л., 1965. 21 с.
238. Руслонный процесс / Под ред. Н.Е. Кондратьева. Л., 1959. 370 с.
239. *Рыкачев М.А.* Вскрытие и замерзание вод в Российской империи. СПб., 1886. 309 с.
240. *Самострелов П.В.* Гидравлические лаборатории Франции, Швеции, Португалии, Бельгии и Норвегии. Л., 1970. 177 с.
241. *Седов Л.И.* Методы подобия и размерности в механике. М., 1965. 348 с.
242. Симпозиум МАГИ. Лед и его воздействие на гидротехнические сооружения. 26–29 сентября 1972 г. Л., 1972. 306 с.
243. *Складнев М.Ф.* *Самострелов П.В.* Лаборатория гидравлики и гидротехники Высшей национальной школы электротехники, электроники и гидравлики в г. Тулузе (Франция) // Гидротехническое строительство. 1965. № 8. С. 72–74.
244. *Скрыльников В.А.* Методические указания по расчету русловых моделей с мелкопесчаными наносами при искаженном масштабировании. Ч. 1. Ташкент, 1977. 57 с.
245. *Скрыльников В.А.* Методические указания по расчету русловых моделей русел рек и каналов с наносами из древесных кальцинированных опилок при искаженном масштабировании. Ч. 1. Ташкент, 1978. 49 с.
246. *Снищенко Б.Ф.* Выбор масштабов русловых гидравлических моделей в бассейновых лабораториях // Тр. ЛИВТ. 1962. Вып. 34. С. 36.
247. *Снищенко Б.Ф., Клавен А.Б., Корчоха Ю.М.* Пространственный характер движения песчаных гряд и кинематика потока над ними // Тр. ГГИ. 1972. Вып. 190. С. 151–164.
248. *Снищенко Б.Ф., Копалиани З.Д.* О скорости движения гряд в реках и лабораторных условиях // Труды ГГИ. 1978. Вып. 252. С. 20–37.
249. *Снищенко Б.Ф., Копалиани З.Д.* О масштабе времени русловых деформаций при гидравлическом моделировании // Метеорология и гидрология. 1978. № 8. С. 89–92.
250. *Снищенко Б.Ф., Католиков В.М.* Лабораторные исследования побочного типа руслового процесса // Тр. ГГИ. 1990. Вып. 337. С. 124–137.
251. *Снищенко Б.Ф., Клавен А.Б., Теплов В.И.* Учения «Омск-95» на гидравлической модели р. Иртыш // Трубопроводный транспорт нефти. 1995. № 9. С. 33–38.
252. *Спирidonов В.Н.* Измерение фильтрационной скорости потока электрохимическим методом // Сб. трудов МИСИ. 1984. С. 113–118.
253. *Соловьев Н.Я., Клавен А.Б.* Отборник проб донных отложений // Тр. ГГИ. 1969. Вып. 172. С. 100–104.
254. *Соловьев Н.Я.* Штанговый дночерпатель // Тр. ГГИ. 1969. Вып. 172. С. 96–99.
255. *Софлер М.Г.* Зависимость между пропускной способностью русла и высотой уровня при заторах // Вестник ЛГУ. Сер. Геол. и геогр. 1967. Вып. 1. № 6. С. 140–148.
256. *Суга К.* История лаборатории Касима-Цукуба. Пер. ГГИ. Речной отд. Инж. Строит. ин-та. 1994. 209 с. (на яп. яз.)
257. *Судольский А.С., Клавен А.Б., Ломунов Р.И.* Программный регулятор расхода жидкости // Тр. ГГИ. 1983. Вып. 306. С. 88–93.
258. *Судольский А.С.* Динамические явления в водоемах. Л., 1991. 262 с.
259. *Талмаза Ф.Ф., Крошкин А.Н.* Гидроморфологические характеристики горных рек. Фрунзе, 1968. 203 с.
260. *Таунсенд А.А.* Структура турбулентного потока с поперечным сдвигом / Пер. с англ., под ред. А.Н. Колмогорова. М., 1959. 399 с.
261. *Теодорсен Т.* Структура турбулентности // Сб. Проблемы пограничного слоя и вопросы теплопередачи. Энергоиздат, 1960.

262. Тимонов В.Е. Лабораторно-экспериментальный метод гидротехнических исследований по данным постоянной международной ассоциации судоходных конгрессов // Изв. НИИГ. 1932. Т. 6. С. 145–166.
263. Титьенс О., Прандтль Л. Гидроаэромеханика. ОНТИ. Т. 2. 1935.
264. Тригг Д. Физика XX века: ключевые эксперименты / Пер. с англ. М., 1978. 376 с.
265. Троицкий В.П. Предельные неразмывающие касательные напряжения и скорости течения для несвязных грунтов и учет влияющих на них факторов. Четвертая Конференция «Динамика и термика рек, водохранилищ, внутренних и окраинных морей». Тезисы докладов. Т. 1. М., 1994. С. 341–343.
266. Трофимов Г.И., Тейтельман В.Ф. Исследования русловых потоков на не размываемых гидравлических моделях // Тр. ЛИВТ. 1962. Вып. 34. С. 41.
267. Труды III Всесоюзного гидрологического съезда. Л., 1960. 421 с.
268. Уемов А.И. Логические основы метода моделирования. М., 1971. 311 с.
269. Учет руслового процесса на участках подводных переходов трубопроводов через реки. СТО ГУ ГГИ. 08.29–2009. СПб., 2009. 175 с.
270. Файко Л.И. Ледяной покров и способы управления его режимом. Новосибирск, 1975. 138 с.
271. Федоров Н.Н. Принципы гидравлического моделирования речных русел, применяемые в некоторых зарубежных лабораториях // Труды ГГИ. 1962. Вып. 94. С. 129–134.
272. Федоров Н.Н. Исследование пульсации скоростей в открытом потоке // Тр. ГГИ. 1966. Вып. 136. С. 57–64.
273. Фидман Б.А. О влиянии шероховатости стенок на структуру турбулентного потока // Изв. АН СССР. Сер. геогр. и геофиз. 1948. Т. 12. № 3. С. 255–260.
274. Фидман Б.А. Применение высокоскоростной киносъемки к исследованию поля скоростей турбулентного потока // Изв. АН СССР. Сер. геогр. и геофиз. 1948. Т. XII. № 2.
275. Фидман Б.А. Некоторые экспериментальные данные о крупномасштабной турбулентности в открытом потоке // Изв. АН СССР. Сер. геогр. и геофиз. 1950. Т. 14. № 3. С. 267–280.
276. Фидман Б.А. О подобии турбулентных потоков // Русловые процессы. М., 1958. С. 15–27.
277. Франкенштейн Т. Опыт, накопленный при лабораторных исследованиях в решении ледовых проблем. Физика и механика льда. М., 1983. С. 95–103.
278. Фрост У., Моулден Т. Турбулентность. Принципы и применения. М., 1980. 535 с.
279. Херхеулидзе Г.И. Модельные исследования регуляционных сооружений для обоснования проекта переброски стока горного водотока // Тр. Грузинского научно-исследовательского института гидротехники и мелиорации. 1965. Вып. 23. С. 203–211.
280. Хинце И.О. Турбулентность / Пер. с англ. под ред. Г.Н. Абрамовича. М., 1963. 680 с.
281. Хоперский Г.Г., Прокофьев В.В., Смищенко Б.Ф., Клавен А.Б., Красков В.А. Организация учений по ликвидации аварий на переходах магистральных нефтепроводов через водные преграды в ОАО «Сибнефтепровод» // Трубопроводный транспорт нефти. 1988. № 9. С. 7–12.
282. Чалов Р.С. Сравнительная характеристика морфологии русел и пойм равнинных и горных рек: Автореф. дис. ... канд. г. наук. М., 1966. 19 с.
283. Чалов Р.С. Общее и географическое русловедение. М., 1997. 112 с.
284. Шадрин И.А. Опыт русловых исследований на открытых моделях. М.; Л., 1951. 38 с.
285. Шамов Г.И. Формулы для определения предельной скорости и расходов донных наносов // Тр. ГГИ. 1952. Вып. 36 (90). С. 3–17.
286. Шарашкина Н.С. Лабораторные исследования русловых процессов // Проблемы русловых процессов. Л., 1953. С. 163–172.

287. *Шарашкина Н.С.* О периодическом расширении речных русел // Русловые процессы. М., 1958. С. 140–154.
288. *Шарашкина Н.С.* Исследования развития речных русел на малых экспериментальных площадках // Тр. III Всесоюзного гидрологического съезда. Л., 1960. С. 283–290.
289. *Шарп Д.* Гидравлическое моделирование. М., 1984. 280 с.
290. *Шатберашвили П.А.* О моделировании руслового процесса // Тр. ГрузНИИГиМ. 1968. Вып. 26. С. 49–55.
291. *Швидченко А.Б., Копалиани З.Д.* Влияние выемок аллювия на гидравлический и русловой режимы горной реки // Водные ресурсы. 1997. Т. 24. № 6. С. 672–678.
292. *Шеренков И.А.* О гидравлическом моделировании безнапорных потоков с искажением масштабов. Гидравлика и гидротехника // Республиканский межведомственный научно-технический сб. Киев, 1966. Вып. 4. С. 100–109.
293. *Штеренлихт Д.В., Земляникова М.В.* Формирование кинематической структуры потока и дна русла при взаимодействии руслового и фильтрационного потоков // Тр. V Всесоюзного гидрологического съезда. 1988. Т. 10. Кн. 2. С. 284–289.
294. *Штофф В.А.* Моделирование и философия. М.; Л., 1966. 298 с.
295. *Штофф В.А.* Введение в методологию научного познания. Л., 1972. 191 с.
296. *Эйгенсон Л.С.* Моделирование. М., 1952. 126 с.
297. *Эйнштейн А.* Физика и реальность. М., 1965. 124 с.
298. *Эйснер Ф.* Экспериментальная гидравлика сооружений и открытых русел / Пер. с нем. М.; Л., 1937. 252 с. (ОНТИ).
299. *Яковлева Л.В.* Пересчет с искаженной модели на натуру местных осредненных продольных скоростей // Докл. ВАСХНИЛ. 1969. № 8. С. 41–44.
300. *Якунин И.И.* Деформации русла р. Поломети и их связь с гидрологическим режимом и устойчивостью грунтов, слагающих ложе рек // Тр. ГГИ. 1964. Вып. 116. С. 82–105.
301. *Ярославцев И.А.* Исследование работы транспортных сооружений на жестких искаженных моделях // Тр. МИИЖТ. 1957. С. 115–138.
302. *Abdalla E.S.* On the scaling of movable bed river models. M. Sc. Thesis H.N. 62. LHE. Delft. 1990. 70 p.
303. *Ackers P.* Experiments on small streams in alluvium. J. Hydraulics Div. Proc. ASCE HI–4, 1964.
304. *Ackers P.* Similarity criteria for mobile bed models // Proc. Of XV Congress JAHR. Istanbul, Turkey, 1973. V. 5. P. 61–64.
305. *Ackers P and White W.R.* Sediment transport: new approach and analysis // J. Hydraulics Div, ASCE. Vol. 99 HY11. Nov, 1973. P. 2041–2060.
306. *Ackers P.* Scale models. JAHR Congress. Lausanne, Switzerland, 1987. P. 1–14.
307. *Allen J.* Scale models in hydraulic engineering. Longmans, Green Co. London, 1947.
308. *Andres D.D. and Doyle P.F.* Analysis of breakup and ice jams on the Athabaska River at Fort McMurray, Alberta // Can. J.Civ.Eng. 1984. Vol. 11. № 3, P. 444–458.
309. *Ashmore P.E.* “Laboratory modeling of gravel braided stream morphology.” *Earth Surface Processes and Landforms*. Chichester, U.K. 1982. 7. P. 201–225.
310. *Ashmore P.E.* “Bed load transport in braided gravel-bed stream models.” *Earth Surface Processes and Landforms*, Chichester, U.K. 1988. 13. P. 677–695.
311. *Ashmore P.E., Best J.L., Leddy J.O., and Geehan G.W.* “The physical modeling of braided rivers and deposition of fine-grained sediment.” *Process models and theoretical geomorphology*, M.J.Kirkby. ed., John Wiley and Sons, Chichester, U.K. 1994. P. 115–139.
312. *Barr D., Herbertson J.* A similitude framework of regime theory // Proc. Inst. Civil Eng. 1968. Vol. 41. P. 761–781.



313. *Barr D.* Method of synthesis basic procedures for the new approach to similitude. Part I. *Water Power*. 1969. 21. № 4. P. 148–153.
314. *Belledy P.* Last 10 years LHF Experience in Developing River Sediment Simulation Software. Proc. of the Intern. Symp. East-West, North-South Encounter on the State of the art in River Engineering Methods and Design Philosophies. St. Petersburg, Russia. Vol. I. 1994. P. 143–152.
315. *Beltaos S.* River ice jam: Theory, case studies and applications // *J. Hydraul. Eng.* 1983. Vol. 109. № 10. P. 1338–1359.
316. *Bettes R.* Survey of Lightweight sediments For Use in Mobile-Bed Physical Models. H.W.Shen (ed). *Movable Bed Physical Models*, 115–123. 1990 Kluwer Academic Publishers.
317. *Bogardi I.* Hydraulic similarity of river models with movable bed. *Acta Techn. Acad. Sci. Hung.*, 1959. Vol. 24. P. 417.
318. *Bogardi I.* Some aspects of application of theory of sediment transportation to engineering problems // *J.Geophys. Res.* 1961. Vol. 66. № 10.
319. *Bogardi I.* Sediment transport in alluvial streams. *Academia Kiado*, Budapest, 1974. P. 826.
320. *Boncher R., La Mehaute B.* L'etude experimentale des problemes de l'hydraulique fluviale. *Ingenieur Canada*, 1957. № 171.
321. *Brownlie W.R.* (1981). "Compilation of alluvial channel data: laboratory and field." *Rep. No.KH-R-43B*, W.M. Keck Laboratory of Hydraulics and Water Resources, California Inst. of Technol., Pasadena.
322. *Buzin V.A., Kopaliani Z.D.* Ice jam flooding in the rivers of Russia: risks of their occurrence and forecasting. Proc. of the Intern. Conference "Water resource systems management under extreme conditions". Moscow. 4–5 June, 2008. P. 581–586.
323. *Chabert J., Chavin J.L.* Formation des dunes et des rides les modes fluviaux. *Bulleten du centre de recherches et d'essais de Chaton*. 1963. № 4. P. 31–51.
324. *Chandrashekar T.R., Shivashankara R.N.* Froude number and hydraulic phenomena. *Indian and East. Eng.* 1968. 109. № 12. P. 643–644.
325. *Chang H.H.* *Fluvial processes in river engineering*. Malabatt Florida: Kreiger Publishing Company, 1992. 432 p.
326. Central Water and Power Research Station, Pune. Web: <http://cwprs.gov.in>.
327. *Christian H., Mellema W., Linder W.* Movable bed model for river structure design // *J. Water-ways and Harbors. Div. Proc. ASCE*. 1966. 92. № 3. P. 45–68.
328. *Corrcin S, Kistler A.L.* The frec-stream boundaries of turbulent flous. *Tech. Notes NACA. Wast.* № 3133, 1954.
329. *Cruikshank C., Maza J.A.* Scale selection in movable bed models of sandy rivers. Proc. XVII Congress of JAHR. Vol. 1. Baden-Baden, 1977. P. 215–222.
330. *Davies T.R.* "Problems of bed load transport in braided gravel-bed rivers." *Sediment transport in gravel-bed rivers*, C.R. Thorn, J.C. Bathurst, and R.D. Hey, eds., John Wilay \$ Sons, Chichester, U.K. 1987. P. 793–811.
331. *Davies T.R, and Lee A.L.* "Physical hydraulic modeling of width reduction and bed level change in braided rivers." *J.Hydro.*, Wellington, New Zealand, 1988. 27(2). P. 113–127.
332. Dynamics of gravel-bed rivers (eds.P.Billi, R.D.Hey, C.R.Thorne, P.Tassoni. London: G.Wiley and Sons, 1992.
333. *Einstein H.A., Chien N.* Similarity of distorted river models with movable beds. *Trans. Am. Soc. Civil Enges.* 1956. Vol. 121. P. 440.
334. *Einstein H.A., Barbarossa N.L.* River channel roughness. *Trans. ASCE*, 1952. 117. P. 1121–1132.
335. *Eisenhauer N.D. and Kley G.M.* Modelling Local scour in Light Weight sediment. Proc. Intern. Symp. on Modelling Soil-water structure Interections. Delft, 1988. P. 127–135.
336. *Eisenhauer N.D. and Jurisch R.* Sedimentation in the River- Rhine downstream of a Lateral Offtake — Field Measurements and Model Studies. VI Intern. Symp. on River Sedimentation, 1995. NewDelhi, India. P. 865–873.

337. *Engels H.* Das Flussbau-Laboratorium der Kgl. Technischen Hochschule in Dresden. Berlin, 1900.
338. *Engels H.* Geshichtliche Entwicklung. Wert von Moderllversuchen. Die Wasserbaulaboratorien Europas. Berlin, 1926. P. 41.
339. Extreme Hydrological Events: New concepts for security // NATO Science Series. IV Earth and Environmental Sciences. Vol. 78. Springer, 2007. P. 499.
340. *Fan S.* An Interagency Evaluation of Computer Sedimentation Models. Proc. of the Intern. Symp. East-West, North-South Encounter on the State of the art in River Engineering Methods and Design Philosophies. St.Petersburg, Russia. Vol. I. 1994. P. 135–142.
341. *Freeman I.R.* Hydraulic Laboratory Practice, 1929.
342. *Friedkin I.F.* A laboratory study of meandering of alluvial rivers, U.S. Waterways Experimental Station. Vicksburg, Missisipi, 1945. P. 40.
343. *Fargue O.* La forme du Lit des Rivieres a Fond Mobile, 1908.
344. *Galay V.J.* Observed forms of bed roughness in an unstable gravel river. 12 Congress of IAHR. 1967. Vol. № 1. P. 85–94.
345. *Garbrecht G., Fahlbusch H., Mertens W.* Formation of Ice jams in the Elbe river — a case study. Poc. of the Second Intern. Symp. on River Sedimentation. Nanjing China, 1983. P. 1038–1049.
346. *Garde R.J.* Analysis of distorted river models with movable beds // Irrigat. and Power, 1958. № 4. P. 421–431.
347. *Garde R.J., Ranga Raju K.G.* Resistant relationships for alluvial channel flow // J. Proc. ASCE HI 4. July, 1966. P. 77–100.
348. *Gehrig W.* Über die Frage der natürlichen Nachbildung der Feststoffbewegung in Modellen. Mitt. Franzins. Inst. Grund und Wasserbau Teshn. Hochschule Hannover. 1967. № 29. S. 213–308.
349. *Gehrig W.* River Models with Movable Bed. In Hydraulic Modelling. H.Kobus (Ed.). Bulletin 7, German Assoc. for Water Resources and Land Improvement, 1980. P. 321.
350. *Gessler J.* Modelling of fluvial processes. River mechanics. Vol. 2. Fort Collins, Colorado, USA, 1971. P. 21–1–21–19.
351. *Glazik G.* Notes on consideration of river morphological processes in river model tests with movable bed. — Proc. of XIII Congress of the IAHR, Kyoto (Japan), 1966. Vol. 5–1. P. 207–210.
352. *Glazik G.* Practical performance of river scale model tests with movable bed. Proc. XIII Congress of IAHR. Vol. 5–1. 1969. P. 211–214.
353. *Glazik G.* Courses of local changes of the level of regulated alluvial river-beds and the elaboration of countermeasures by means of river scale model tests (Illustrated on the example of the Elbe river). — Proc. XIV Congress of IAHR. Paris, 1971. Vol. 5. P. 203–210.
354. *Glazik. G.* A perspective of mobile bed river models. Study of erosion, river bed deformation and sediment transport in river basins as related to natural and man-made changes. IHR-V Technical Documents in Hydrology №10, UNESCO. Paris, 1997. P. 380–393.
355. *Gole C.V., Phansalkar S.D., Pranhlad N.V.* Movable Bed Models-Design and Operation. Background Papers. Int. Seminar on Hydraulics of Alluvial Streams. New Delhi, India, 1973. P. 97–110.
356. *Gradowczyk M., Folguera H.* Analyse des affouillements dans les canaux decouverts au moyen des modeles mathematique // La Houille Blanche, 1965. № 8. P. 761–769.
357. *Graf W.H.* Hydraulics of sediment transport. Mc Graw-Hill Inc. New York, 1971. P. 513.
358. Guidebook to river Hydraulic Model Experiments. River Hydraulics Division, River Department, PublicWorks Research, Japan. 1989. P. 94.
359. *Guoren Dou.* Keynote Lecture: Development of Physical Model Studies on Sediment transport in China River Sedimentation, Jaywardena, Lee and Wang (Eds.) Balkema, Rotterdam, 1999. P. 649–660.

360. *Gupta S.N., Sharma J.P., Jindal S.R., Chendra B.* Alluvial river behaviour — a few aspects of its simulation in a model // Proc. XIII Congress of IAHR. Paris, 1971. Vol. 5. P. 267–275.
361. *Hanko Z.* Application of stage relation at fixed bed scale model test of natural watercourses. — Acta Tech. Acad. Sci. Hung. 1968. 60. № 3–4. P. 233–245.
362. *Harrison A., Mellema W.* Movable bed model for alluvial channel studies // Proc. XII Congress of IAHR. Fort Collins (USA), 1967. Vol. 1. P. 202–209.
363. *Herbertson J.* Scaling procedures for mobile bed hydraulic models in terms of similitude theory // J. of Hydraulic research. Vol. 7. № 3. 1969. P. 315–353.
364. *Heng Seng Low.* Effects of Sediment Density on Bed-Load Transport // Jour. of Hydr. Eng. Vol. 115. № 1. January. 1989. P. 124–137.
365. *Hincu S.* Modelarea hidraulica in curenti de aer sub presiune. Bucuresti, Acad. RSR., 1967. P. 2461.
366. *Hoey T.B., and Sutherland A.J.* “Channel morphology and bed load pulses in braided rivers: a laboratory study.” Earth Surface Processes and Landforms, Chichester, U.K., 1991. 16. P. 447–462.
367. Hydraulic models. Manuals of engineering practice. ASCE. № 25. New York, 1942.
368. Hydraulic research in the United States. Nat. Bur. Standards, U.S. Dept. Commerce. Miss. Publ. 1966. № 280.
369. Introduction to River Hydraulic Division, PWRI (jap.). 1995. P. 15.
370. *Itakura T., Shimizu Y.* Model study of the Ishikuri river. IAHR Symposium on Scale Effects in Modelling Sediment Transport Phenomena. Toronto, Canada. 1986. P. 85–97.
371. *Jacenkow B., Dembski B.* Proba okreslenia skali w badaniach hydrotechnicznych prowadzonych na modelu powietrznym // Rozpr. Hydrotech, 1963. № 4. P. 3–39.
372. JAHN Bulletin. № 4. Vol. 12. 1955. P. 45–60.
373. *Jansen P.L., van Bendegom, J. van den Berg, de Vries and A. Zanen.* Principles of River Engineering. Pitman, London, 1979. 509 p.
374. *Joglekar D.V.* Principles of hydraulic model studies and their imitations // Irrigation and Power, Vol. 16. № 1. 1959.
375. *Karunaratne k.B.* Sediment exclusion Structure at Polgolla Mahaweli Project-Shri Lanka. Proc. IX Congr. Int. Comm. on Irrigation and Drainage. P. 29–45
376. *Keller R.J.* On the use of uni-sized material in movable bed hydraulic models. — Proc. XVII Congress of IAHR, 1977. Baden-Baden. V. 1. P. 231–238.
377. *Keller L.V., Fridman A.A.* Differentialgleichungen für die turbulente Bewegung liner Kompressibelen Flüssigkeit. Proc. I Juntern., Congress Annl. Mech., Delft, 1924. S. 395–405.
378. *Kennedy J.F.* Ice jams mechanics // Proc. IAHR Symp. on Ice Problems. Hanover, 1975. P. 143–164.
379. *Kennedy J.F.* The mechanics of dunes and antidunes in erodible-bed channels. Fluid Mechanics, 1963. Vol. 16.
380. *Klaven A.B., Kopaliani Z.D., Snischenko B.F.* Hydraulic modeling of channel process. Proc. XXII Congress IAHR. Lausanne, Switzerland, 1987. P. 227–232.
381. *Klebanoff P.S.* Characteristics of turbulence in a boundary Layer with zero pressure gradient. Tech. Noter. NACO, Wash № 3178, 1954.
382. *Kline S.J., Reynolds W.C., Schraub F.A., Runstabler P.* The structure of turbulent boundary layers // J. Fluid Mech., 1967. Vol. 30. Pt 4. P. 741–774.
383. *Kobus H.* Fundamentals. Hydraulic Modelling. Bullehn 7. (Ed. H. Kobus). German Association for Water. Resources and Land improvement. 1980. P. 1–24.
384. *Kondap O.M., Garde R.J.* Velocity of bed forms in alluvial channels // Proc. JAHN, Istanbul (Turkey), 1973. Vol. 5. P. 101–103.
385. *Kopaliani Z.D., Tvalavadze O.A., Noselidze G.A.* Methodology for Hydraulic modelling of river channels in mountain-piedmont zone in case of structural and nonstructural forms of bedload

- transport. Proc. of Intern. Symposium «East-West, North-South Encounter on the state-of-the art in River Eng. Methods and Design Philosophies. St. Petersburg, 1994. P. 209–219.
386. *Kopaliani Z.D.* Problem of Changing Sediment transport regime in rivers in water projects and river management. Intern. Workshop «Aspects and Impacts of a Changing Sediment Regime». AIT, Bangkok, Thailand. 1998. P. 115–121.
387. *Kopaliani Z.D.* Problem of bed load discharge assessment in rivers. Proc. 10-th Inter Symp. on River Sedimentation. Vol. 3. Moscow, 2007. P. 175–181.
388. *Kozak M.* A geometrical torzitaz hataza a nyiltfelszinu vizfolia-zok Kismintaiban kialakulo aralásokra Hidrol. Kozlony 1966. 46. № 3. P. 101–109.
389. *Kramer H.* Modellgeschiebe und Schleppkraft. Mitteilungen d. Preussischen Versuchsanstalt für Wasserbau und Schiffbau. Berlin, 1932.
390. *Kramer H.* Sand mixtures and sand movement in fluvial models. Trans. ASCE, 100, 1935. P. 798–878.
391. *Krey.* Grenzen der Übertragbarkeit der Versuchsergebnisse und die Modellähnlichkeit bei praktischen Flussbauversuchen, ZAMM, XII, 1925.
392. *Lacey G.* Stable channels in alluvium // Proc. Inst. Civ. Engrs, London, 1930. Vol. 229. P. 259–292.
393. *Laufer J.* The structure of turbulence in fully developed pipeflow. Nat Advis Com. Aerohaut, Rep № 1174.
394. *Leddy J.O., Ashworth P.J., and Best J.L.* “Mechanisms of a scaled physical model.” *Braided rivers*, J.L. Best and C.S. Bristow, eds., Geological Soc. Spec. Publ. №. 75, London, U.K., 1993. P. 119–127.
395. *Leopold L.B., Wolman M.* River channel patterns: braided, meandering and straight. U.S. Geol. Survey Prof. Paper, 26213, 1957.
396. *Linford A.* The application of models to hydraulic engineering // Water and Water Eng., 1965. 2. Vol. 69. № 828. P. 50–54.
397. *Liu L. and Shen H.T.* Dynamics of ice jam release surges / Proc. of the 17<sup>th</sup> Symp. on Ice, 2004, St.-Petersburg. Vol. 1. P. 244–250.
398. *Lypscomb E.B.* The technique and application of hydraulic model studies involving movable beds. — Proc. 5<sup>th</sup> Hydraulic Conference, June 1952, Publ. of Univ. of Iowa, Bull. № 34. 1953.
399. *Macagno E.* Some new aspects of similarity in hydraulics. La Houille Blanche. 1965. № 8. P. 751–759.
400. *Maggiolo O., Borghi. J.* Sobre la evolucion en el tiempo del proceso de socavacion. Revista de Ingenieria Uruguay. 1965, Vol. 59. № 681–682. P. 149–160.
401. *Maggiolo O.J., Farrell C.* Rough-flow criterion in open channels and scale selection for fixed bed river models // J. of Hydr. Research. 1965. P. 3. № 2. P. 59–71.
402. *Marchi G.* O mogeneita similitudine e modelli i dranlici. Milano, 1933.
403. *Mc Anally W.H., Letter J.V. and Tomas W.A.* 1986, Two and three dimensional modeling systems for sedimentation. The Third Jnt. Symp. on River Sedimentation, The University of Mississippi, U.S.A. P. 400–411.
404. *Megard J., Berthier P.* Quelques aspects de l’emploi des modeles mathematiques fluviaux. La Houille Blanche. 1955. № 4. P. 381.
405. Modeling of rivers. Ed. Shen H.W. № 9. 1976. 745 p.
406. Model Yellow River. Introduction of Model Yellow River Project Construction. Yellow river Institute of Hydraulic Research. Zhengzhou. 2003. 9 p.
407. *Motzfeld H.* Frequenzanalyse turbulenter Shhwankungen // ZAMM. № 6. 1938.
408. Movable Bed Physical Models. Ed. By H.W. Shen. Proc. of the NATO Advanced Research Workshop. Delft, The Netherlands Kluwer Academic Publishers. 1990. 170 p.
409. New and revised pages (192) for your Directory of Hydraulic Research Institutes and Laboratories. March 1977. IAHR Secretariat Rotterdamse weg 185. Delft. Netherlands.

410. *Nicollet G.* Models of Rivers and Hydraulic Structures. Note Technique. Electricite De France. Chatou. 1988. P. 26.
411. *Novak P., Cabelka J.* Models in Hydraulic engineering. Physical principles and design applications. Pitman Advanced Publishing Program, 1981. P. 444.
412. *Novak P.* Model similarity and training of rivers with large channel irregularities // Proc. XII Congress of IAHR Fort Collins, 1967. Vol. 1. P. 379–388.
413. *Oosterhoff J.et.al.* Building a laboratory complex. Publication no. 214. Delft Hydraulics laboratory. 1979. 37 p.
414. *Pan Q., Liang Z., Shen H.* An Experimental Study on Scale Models of Mobile Bed for Artificial Cutoffs in the Middle Yangtze River. IAHR Symposium on Scale Effects in Modelling Sediment Transport. Effects in Modelling Sediment Transport phenomena. Toronto, Canada. 1986. P. 135–147.
415. *Parker G., Sundararajan D., and Heinz S.* (1982). “Model experiments on mobile, paved gravel bed streams.” *Water Resour. Res.*, 18(5). P. 1395–1408.
416. *Peters J.J.* Scaling of Sediment transport phenomena in large alluvial rivers with very low slopes. H.W. Shen (ed.) Movable bed physical Models. Kluwer Academic Publishers, 1990. P. 149–158.
417. *Prendes H.* A mathematical model with movable bed and it's application to the Parana river. Agua y Energia Electrica, Argentina, 1984.
418. *Qian Ning, Dai Dingzhong.* The problems of river sedimentation and the present status of its research in China. Proc. Of the Intern. Symp. on River Sedimentation. Mach 24–29, 1980. Vol. 1. Beijing, China. P. 19–39.
419. *Ramette M.* Modelisation du transport solide // Proc. XVII Congress of IAHR, Baden-Baden 1977. Vol. 1. P. 199–206.
420. *Ramette M.* Guide d'Hydraulique fluviale Laboratoire National d'Hydraulique, Chatou, France, rapport N°. HE/40/81.04, 1981.
421. *Raudkivi A.G.* Loose boundary hydraulics. Rotterdam. Balkema, 1998. P. 497.
422. *Reynolds O.* On certain laws relating to the regime rivers and estuaries and on the possibility of experiment on small scale. British Association reports, 1887. P. 555.
423. *Reynolds O.* On the dynamical theory of incompressible viscous fluids and the determination of the criterion. Phyl. Trans. Roy. Soc. London, 1895, A 186. P. 123–161.
424. *Raynov S., Pechinov D., Kopaliani Z.* River Response to Hydraulic Structures/ Technical Documents in Hydrology. JHP. UNESCO, Paris, 1986. 115 p.
425. *Reichardt H.* Die Wärmeübertragung in turbulenten Reibungsschichten. ZAMM, 20, 1940.
426. River Ice Jams. /S. Beltaos (ed.). Water Resources Publ., LLC, 1995. 372 p.
427. River mechanics. Edited and Published by Hsien Wen Shen. Fort Collins, Colorado, USA; 1971. Vol. 1. P. 1–XIX–79.
428. River sedimentation (Eds. A. Gayawardena, G.Lee, Z.Wang) Proc. 7-th Intern. Symp. On River Sedimentation (Hong Kong, China) 16–18 Dec. 1998. Rotterdam: Balkema, 1999.
429. *Rodi W.* The prediction of free turbulent boundary layers by use of a twoequation model of turbulence. Ph. D. dissertation, University of London, 1972.
430. *Rocha J.S.* Modelling of the Development of River Morphology. IAHR Symposium on Scale Effects in Modelling Sediment Transport Phenomena. Toronto, Canada. 1986. P. 113–123.
431. Rohringer. Etude des questions hydro-techniques a l'aide de laboratoires... Paper 58, XV International Navigation Congress, Venice, 1931.
432. *Rouse H., Macagno E.* On the use of models in fluids research. Hydraulics, Meehanics of fluids, Engineering education. Selected writings of Huter Rouse. Ed. J.K.Kennedy and E. Macagno. Dover Publications, JNC. New Yoric. P. 552–556.
433. *Rubatta A.* La modellistica della aste fluvial. Giorn. genio civile. 1963. 101. N° 11–12. P. 609–615.

434. *Ruelle., Takens F.* On the nature of turbulence. *Commun. Math. Phys.*, 20, 167; 23, 343. 1971.
435. *Schleiermacher E.* Ermittlung des mittleren Durchmessers des Sohlenkornung bei Modellversuchen des Wasserbaues. *Wasser. Wassewirt. H.* ¾. 1938.
436. *Scheuerlein H.* Simulation of sediment transport in hydraulic models. *International Symposium on river Mechanics*. Vol. 3. Bangkok, Thailand. 1973. P. 109–120.
437. *Schlichting H.* Experimentelle Untersuchungen zum Bauhigkeitsproblem // *Ing. Arch.*, 1936. Vol. 7. S. 1–34.
438. *Schroger K.* Angenaherte Ähnlichkeit von Strömungsmodellen durch Modellverzerrung // *Bautechnik*. 1966. 43. № 10. S. 344–347.
439. *Schumm S.A., Khan H.R.* Experimental Study of Channel Patterns. *Geological Society of America Bulletin*. Vol. 83. June 1972. P. 1755–1770.
440. Sedimentation problems in river basins. *Studies and reports in Hydrology*. UNESCO. 152 p.
441. Sediment transport in gravel-bed rivers. C.R. Thorne, J.C. Bathurst, and R.D. Hey, eds. John Wiley & Sons, Chichester, U.K. P. 811.
442. *Senturk F.* Similitude des modeles a fond mobile et les effets des ecarts sur les lois de similitude // *Proc. XIII Congress of IAHR*, 1969. Vol. 1. P. 321–335.
443. *Shen H.W.* Movable bed river models. *J.A.H.R. Symposium “Scale Effect in Modelling Sediment Transport”*. Toronto, August 1986. Proc. P. 156.
444. *Shvidchenko A.B., Kopaliani Z.D.* Modelling of Bed Load transport in Gravel-Bed Laba River. *Journ. of Hydr. Eng., ASCE*. 1998. Vol. 124. №. 7. P. 778–785.
445. *Shvidchenko A.B., Pender G.* Macroturbulent structure of open-channel flow. *Water Resources Research*. Vol. 37. № 3. March 2001. P. 709–719.
446. *Simons D.B., Richardson E.V.* Forms of bed roughness in alluvial channels // *ASCE. Trans.* Vol. 128. 1953.
447. *Simons D.B. and Albertson M.L.* Uniform water convergence channels in Alluvial material: *American Society Civil Engineers Trans.* Vol. 128. 1963, P. 65–67.
448. *Struiksmā N.* Recent developments in design of river scale models with mobile bed. Publication no. 236. Delft Hydraulics laboratory. 1980. 6 p.
449. *Struiksmā N. and Klassen G.* Experimental Comparison of Scaling with Sand and Bakelite as Bed Material. *IAHR Symp. on Scale Effects in Modelling Sediment Transport Phenomena*. Toronto, Canada. 1986, P. 398–405.
450. *Struiksmā N. and Crossato A.* Analysis of a 20 Bed Topography Models for Rivers. *water Resources Monograph: Ikeda S. and Parker G. (Ed.). River meandering*, 1989.
451. *Suga K.* On the simulation of river-bed variation by characteristics. — *Proc. XIII Congress IAHR*. Kioto (Japan) 1969. Vol. 5–1. P. 289–296.
452. *Suga K.* Some notes on hydraulic model tests of river channels. *International Symposium on River Mechanics*. Vol. 3. Bangkok, Thailand, 1973. P. 109–120.
453. *Sumbal J.* Problematika podobnosti pri aerodynamichom modelovani niecných procesov // *Vyskumny ustav vodohospodarsky*. 1966. № 38. P. 9–125.
454. *Sumbal J.* Problematika definície hl’bku bky veľ’kých relativných drsnostiach z hl’adiska nacrhu prevysených hydraulických modelov — *Sh. vys. uceni technickelo, Brne*, 1967. 1–2. P. 119–122.
455. *Suryanarayana B.* Natural roughness effects in rigid open channels // *J. Inst. Eng. (India)*. Civil Engng. Div. 1966. 46. № 9. P. 5, 435–448.
456. *Sveum D.J., Mollema W.J.* Navigation Model Tests for Straight Reach of Missouri River. *Proc. ASCE* 98, №. WW2, P. 91–207, May 1972.
457. *Szuster A.* Ksztaftowanie sie podtoza wokol filarów mostow w czasie przenplywu fal powodziowych (bodania modelowe) // *Archiwum Hydrotechniki, Warszawa*, 1968. Vol. 15. № 3. P. 391–410.
458. *Szuster A.* Bodania modelowe zjawisk hydraulicznych towarzyszących cozmnywaniu podtoza przy filarach, mostow // *Archiwum Hydrotechniki, Warszawa*, 1968. Vol. 15. № 4. P. 571–586.

459. *Tang R., Lin Ye Rao and Chen Z.* A study on the Scale of the Wuhan river Model of the Dam Region for Gezhouba Project on the Yangtze River. IAHR Symposium on Scale Effects in Modelling Sediment Transport Phenomena. Toronto, Canada. 1986. P. 99–112.
460. *Tiffany G.B.* Turbulence in the Mississippi river. XII Congress of JAHR. Vol. 2. USA, Colorado, 1967.
461. *Thirriot C., Carpentier J.* Principe d'une similitude à distorsion transversale pour l'étude des écoulements à surface libre // C.r. Acad.sci. 1964, № 18. P. 4429–4430.
462. *Thompson S.M.* A study of the Transportation of Gravel by Turbulent Water Flows. M.E. Thesis, Univ. of Canterbury, New Zealand, 1963.
463. U.S. Waterways Experiment Station. Studies of lightweight material with reference to their movement and use as model bed material. U.S. Water Experiment Station, 1936, technical memo 103–1.
464. *Vernon-Harcourt L.F.* The Principles of Training Rivers through Tidal estuaries as illustrated by Investigations into the Methods of Improving the Navigation Channels of the Estuary of the Seine. Proc. R. Soc. (Lond.), 45, 504 (1888–1889).
465. *Vinogradov V.A., Klaven A.B.* Experimental Studies of the Kinematic Structure of the water flow and channel Processes in the Polomet river. Proc. of the International Workshop “Experimental Hydrology with Reference to Hydrological processes in small research basins”. St.Peterburg-Valdai, 2–6 June, 1997. P. 109–115.
466. *Vollmers H.* Examples for using sand and lightweight material in movable bed models. Movable Bed physical Models. Ed. by H.W.Shen. Proc. of NATO Advanced Research Workshop Delft . The Netherlands. Kluwer Academic Publishers. 1990. P. 125–140.
467. *Vogel H.* Geometric versus hydraulic similitude // Proc. ASCE, Aug. 1932.
468. *Vogel H.* Practical river laboratory hydraulics // Proc. of ASCE. Nov. 1933.
469. *Vries M.* Solving river problems by hydraulic and mathematical models. Polish Academy of Sciences. Institute of Hydro-Engineering. Gdansk, 1969. P. 47.
470. *Vries M., J.J. Van Der Zwaard.* Movable bed river models. In. Symp. on Modeling Techniques, San Francisco, ASCE, New York. Vol. 1. 1975. P. 484–500.
471. *Vries M.* On the reproduction of alluvial roughness in a scale of on alluvial river. Short course APD-IAHR Bandung, 1982.
472. *Vries M., G.J.Klaassen and Struiksm.* On the use of movable bed models for river problems: a state of the art Int. J. of Sediment Research. Vol. 5. № 1. 1990. P. 35–47.
473. *Vries M.* Use of models for river problems. Studies and reports in Hydrology 51. UNESCO Publishing. 1993. 85 p.
474. *Wang G.Q., Wang X.K., Wang G.X., Chen Z.C. and Fu R.S.* Physical modelling of Sedimentation for the Three Gorge Project. River Sedimentation, Jayawardena, Lee and Wang (Eds.) 1999 Balkema. P. 661–666.
475. *Wang S.S.Y.* River sedimentation and morphology modeling — the State of the art and future development. Proc. of the ninth In. Symp. on river Sedimentation. Yichang China, 2004. P. 71–94.
476. *Wang S.S.Y.* River engineering using integrated methodology. Proc. of the tenth Intern. Symp. on river Sedimentation. Vol. 1. Moscow, 2007. P. 130–140.
477. *Warburton J., and Davies T.* “Variability of bed load transport and channel morphology in a braided river hydraulic model.” *Earth Surface and Landforms*, Chichester, U.K., 1994. 19. P. 403–421.
478. *Watt A.D.* A small Hydraulic model in marine Transportation Studies. Proc. Symp. on River Mechanics. 1973. P. 37–48.
479. *Wehrschutz F.* Kritische Betrachtung der Modellgesetze // Mitt. Inst. Wasserwirt, Grundbau und konstrukt. Wasserbau Techn. Hochschull Graz. 1964. № 10.

480. *White W.R., Paris E and Bettess R.* The frictional characteristics of alluvial streams: a new approach, Proc. Ins. Civ. Eng., London, 69, Part 2, Sept. 1980. P. 737–750.
481. *White W.R., Paris E and Bettess R.* River regime based on sediment transport concepts, Report IT 201, Hydraulic Research station, Wallingford, UK, 1981.
482. *White W.R.* A novel loose boundary model for investigating sedimentation problems at an intake-International Conference on the Hydraulic modeling of civil Engineering structures, Coventry, England. September 22–24, 1982. Paper D4. P. 181–194.
483. *White W.R., Paris E and Bettess R.* Table for the design of stable alluvial channels. Report IT 208, Hydraulics Research Station, Wallingford, UK
484. *White W.R., R.Bettess.* Analytical approach to river regime // J. Hydraulics Div, ASCE, Vol. 108. № 10. 1982. P. 1179–1194.
485. *Winkel R.* Die Grenzen der Übertragbarkeit der Versuchsergebnisse und die Modellähnlichkeit bei flussbaulichen Versuchen. Die Wasserbaulaboratorien Europas, Berlin, 1926. P. 55.
486. Wimpey hydraulics research laboratory. Consulting Eng., 1967. Vol. 31. № 2. P. 44–46.
487. *Yalin M.S.* Theory of hydraulic models. Macmillan, London, 1971.
488. *Yalin M.S.* Mechanics of sediment transport. Pergamon, Oxford. 1972. P. 290.
489. *Yalin M.S.* River models with a movable bed. International Symposium on River Mechanics. Vol. 3. Bangkok, Thailand, 1973. P. 11–24.
490. *Yalin M.S., Bishop B.C.* On the physical modeling of dunes // Proc. XVII Congress of IAHR. Vol. 3. Baden-Baden, 1977. P. 25–32.
491. *Yalin M.S.* River Mechanics, Pergamon Tarrytown, N.Y., 1992.
492. *Yang C.T.* Sediment Transport Theory and Practice. NY: The Mebraw-Hill Companies, Inc., 1996. 395 p.
493. Yellow river Institute of Hydraulic research. Yellow river conservancy commission. Zhengzhou. 2003. 6 p.
494. Yellow river conservancy commission of the Ministry of Water resources. Zhengzhou, 2003. 19 p.
495. *Yokosi Sh.* The structure of river turbulence // Bull. Dis. Prev. Res. Inst. Kyoto Univ., 1967. Vol. 1. № 2. P. 1–29.
496. *Young W.J., and Davies T.R.* “Prediction of bed load transport rates in braided rivers: a hydraulic model study.” *J. Hydro.*, Wellington, New Zealand, 1990. 29(2). P. 75–92.
497. *Young R.A.* Characteristics of eroded sediment Transect. Am. Soc. Agric. Eng. Vol.23. P. 1139–1142. 1980.
498. *Yu Wenchou, Ye Shusen and Lin Musong.* Regulation of Shenzhen River Physical Modelling and its Design Application. River Sedimentation Jayawardena, Lee and Wang (Eds.). 1999 Balkema. P. 673–678.
499. *Zal Pande B.* A critical study of velocity formule in open channel // Indian Eng. 1967. № 3. P. 1–16.
500. *Zand M., Milli H.* On scale selection for a mobile bed model // Proc. XVII Congress of IAHR. Vol. I. Baden-Baden, 1977. P. 223–230.
501. *Zanke U.* Über die Naturähnlichkeit von Geschiebeversuchen bei einer Gewässersohle mit Transportkörpern. Mitteilungen des Franzins Instituts für Wasserbau und Küsteningenieurwesen der Technischen Universität Hannover. Oktober 1975. P. 289–324.
502. *Zanke U.* Grundlagen der Sedimentbewegung. Berlin, Heidelberg, New York Springer, 1982.
503. *Zwamborn J.A.* Correlation between model and prototype morphology of river. CSIR special report N MEG 334. Pretoria, 1965.
504. *Zwamborn J.A.* Reproducibility in hydraulic models of prototype river morphology. La Houille Blanche. 1966. 21. № 3. P. 291–298.



## Приложение 1

### ПЕРЕЧЕНЬ ИССЛЕДОВАНИЙ, ВЫПОЛНЕННЫХ НА ГИДРАВЛИЧЕСКИХ МОДЕЛЯХ РЕЧНЫХ РУСЕЛ В РУСЛОВОЙ ЛАБОРАТОРИИ ГГИ ЗА ПЕРИОД 1963–2009 гг.

№ п/п	Объект исследований, годы, ответственный исполнитель	Вид модели и ее геометрические масштабы: горизонтальный, вертикальный	Название темы и результаты исследований
1	2	3	4
1	Обь у г. Барнаула, 1963–1964 гг., А.Н. Ляпин	Жесткая, 1:200 1:67	«Исследование русловых деформаций и эффективности защитных мероприятий на участке водозаборного сооружения № 2 завода № 521 на р. Оби у г. Барнаула». Разработаны рекомендации по защите водозаборного сооружения.
2	Вычегда, Сыктывкарский узел, 1966 г., Б.Ф. Срнищенко	Жесткая, 1:300 1:60	«Изучение русловых деформаций на участке р. Вычегды у г. Сыктывкара и испытание на пространственной модели проектируемых сооружений для повышения лесопропускной способности Шарды-полюя». Исследованы русловые деформации и гидравлический режим р. Вычегды у г. Сыктывкара.
3	Вычегда, исток Шарды-полюя, 1966 г., Б.Ф. Срнищенко	Жесткая, 1:100 1:100	Исследована кинематика потока на участке разветвления русла. Испытаны инженерные мероприятия для повышения пропускной способности Шарды-полюя; разработаны рекомендации для составления проекта крепления берегов для стабилизации русла в районе лесохранилища.
4	Ангара у Горевского месторождения, 1967–1968 гг. Б.Ф. Срнищенко	Жесткая, 1:400 1:400	«Перенос судового хода на р. Ангаре в районе Горевского месторождения». Разработаны рекомендации для проектного задания на строительство Горевского обогатительного комбината.

1	2	3	4
5	Полометь у с. Яжелбицы, 1967—1968 гг., Н.С. Знаменская	Жесткая с переменным искажением от 1 до 5, 1:25 1:25	«Определение влияния искажения масштаба модели на структуру потока». Выявлено влияние искажения масштаба модели на структуру потока.
9	Обь у г. Барнаула, 1968—1969 гг., А.Н. Ляпин	Жесткая, 1:1000 1:100	«Исследование эффективности действия головного сооружения водоподводящего канала к водозабору № 2 предприятия п/я А-7163 с целью выбора оптимального варианта». Разработаны мероприятия для обеспечения бесперебойной работы промышленного водозабора.
7	Обь у г. Барнаула, 1968—1969 гг., А.Н. Ляпин	Жесткая, 1:300 1:75	Испытаны варианты компоновки головного сооружения канала, подводящего воду к промышленному водозабору.
8	Обь у г. Барнаула, фрагмент берегоукрепления, 1968—1970 гг., А.Н. Ляпин	Жесткая, 1:20 1:20	«Исследование эффективности действия головного сооружения водоподводящего канала к водозабору № 2 предприятия п/я А-7163 с целью выбора оптимального варианта». Разработаны рекомендации по защите берега от размыва с целью нормализации работы водозабора.
6	Обь, русло и пойма у г. Барнаула, 1968—1969 гг., Н.М. Кулемина	Жесткая, открытая русловая площадка, 1:300 1:75	«Прогноз плановых деформаций русла р. Оби у г. Барнаула и рекомендации по защите от размывов левого пойменного берега с целью обеспечения нормальной эксплуатации золоотвалов ТЭЦ-2». Разработаны рекомендации по защите от размывов левого пойменного берега на участке размещения золоотвалов ТЭЦ.
10	Томь, у с. Аникино, I вариант, 1969—1970 гг., А.Н. Ляпин	Жесткая, открытая русловая площадка, 1:360 1:90	«Исследование перестроенной территории участка р. Томь в районе г. Томска с целью разработки рекомендаций по стабилизации русла, обеспечивающих нормальную работу водозабора». Исследован режим русловых деформаций на р. Томи в районе г. Томска.

1	2	3	4
11	Томь у г. Томска, 1970 г., А.Н. Ляпин	Жесткая, открытая, русловая площадка, 1:360 1:90	Разработаны рекомендации по стабилизации русла для обеспечения нормальной работы водозабора Томской ТЭЦ-2.
12	Томь у с. Аникино, II вариант, 1970—1971 гг., А.Н. Ляпин	Жесткая, 1:90 1:90	«Лабораторное исследование городского водозабора г. Томска с целью выбора его местоположения и выходных условий в водозаборный ковш». Разработаны рекомендации по нормализации работы ковша городского водозабора.
13	Дон у Нововоронежской ГРЭС, 1970—1971 гг., Н.С. Знаменская	Деформируемая, торф в смеси с песком, 1:1000 1:100	«Исследование деформаций русла и поймы р. Дон на участке сооружений для технического водоснабжения в районе Нововоронежской ГРЭС». Выполнена оценка деформаций русла и поймы при стеснении поймы дамбой пруда-охладителя ГРЭС.
14	Селенга у с.Брянска, 1971—1973 гг., А.Б. Клавен	Жесткая, 1:250 1:50	«Исследование деформаций русла р. Селенги у с. Брянска, вызванных летне-осенним паводком, с целью уточнения прогноза русловых перестроений». Проведены исследования гидравлики и кинематики потока, деформирующий русла с целью разработки рекомендаций по нормализации работы рассеивающего выпуска сточных вод Селенгинского ЦКК».
15	Печора у г. Печора, 1971—1973 гг., В.С. Кожевников	Жесткая, 1:400 1:100	«Натурные и лабораторные исследования русловых процессов р. Печоры в районе строительства гидротехнических сооружений Печорской ГРЭС». Выполнена оценка руслового процесса в районе строительства ГРЭС.
16	Печора у г. Печора — фрагмент, 1971—1973 гг., В.С. Кожевников	Жесткая, 1:50 1:50	«Натурные и лабораторные исследования русловых процессов р. Печоры в районе строительства гидротехнических сооружений Печорской ГРЭС». Разработаны рекомендации по нормализации работы объектов водоснабжения Печорской ГРЭС.

1	2	3	4
17	Селенга у с. Брянска, 1972 г., Н.А. Ярных	Воздушно-напорная, пластилин, 1:1000 1:100	«Исследование деформаций русла р. Селенги у г. Брянска, вызванных летне-осенним паводком с целью уточнения прогноза русловых преформирований». Выполнена оценка распределения расходов воды по рукавам.
18	Иртыш у г. Краснокутска, 1973 г., М.М. Гендельман	Деформируемая, 1:400 1:100	«Исследование руслового процесса р. Иртыш и разработка рекомендаций по обеспечению нормальной работы Павлодарского грунтового водозабора в районе г. Краснокутска». Разработаны рекомендации по выбору места расположения городского водозабора.
19	Дунай у г. Измаила, 1973–1975 гг., Г.Г. Месерлянс	Жесткая, 1:200 1:100	«Исследование руслового процесса р. Дунай на участке 12–21 причалов Измаильского порта с целью разработки мероприятий по обеспечению судоходных глубин у причалов. Разработаны рекомендации по обеспечению судоходных глубин на акватории порта.
20	Амур у г. Амурска, 1973–1975 гг., А.Н. Ляпин	Деформируемая, 1:400 1:100	«Изучение руслового процесса р. Амур на участке Комсомольского ЦКК с целью разработки мероприятий по обеспечению нормальной работы выпуска сточных вод». Рекомендованы мероприятия по обеспечению нормальной работы выпуска сточных вод Комсомольского ЦКК.
21	Волга у г. Тольяти, 1972–1974 гг., З.Д. Копалиани	Деформируемая, 1:400 1:100	«Исследование руслового процесса р. Волги на участке расположения рассеивающего выпуска Волжского автозавода и разработка рекомендаций по нормализации его работы». Разработаны рекомендации по реконструкции рассеивающего выпуска сточных вод ВАЗ.
22	Ангара у Горевского месторождения, 1972–1973 гг., Н.А. Ярных	Воздушная модель, 1:2000 1:100	«Перенос судового хода на р. Ангаре в районе Горевского месторождения». Разработаны рекомендации по выбору трассы судового хода по варианту с малой ограждающей дамбой Горевского месторождения.

1	2	3	4
23	Иртыш у г. Краснокутска, 1972–1974 гг., Н.А. Ярных	Воздушная, 1:100 1:100	«Исследование руслового процесса р. Иртыш и разработка рекомендаций по обеспечению нормальной работы Павлодарского грунтового водозабора в районе г. Краснокутска. Исследованы гидравлические и кинематические характеристики речного потока.
24	Иртыш у г. Краснокутска, 1972–1974 гг., Н.А. Ярных	Деформируемая, 1:400 1:100	«Исследование руслового процесса р. Иртыш и разработка рекомендаций по обеспечению нормальной работы Павлодарского грунтового водозабора в районе г. Краснокутска». Исследован характер деформаций речного дна и разработаны рекомендации по нормализации работы водозабора.
25	Обь у г. Барнаула, 1973–1975 гг., В.С. Кожевников	Жесткая, 1:200 1:50	«Исследование руслового процесса р. Оби с целью разработки рекомендаций по обеспечению бесперебойной работы существующего водозабора г. Барнаула». Разработаны рекомендации по обеспечению бесперебойной работы водозабора г. Барнаула.
26	Дон у Нововоронежской АЭС, 1975–1976 гг., Н.А. Ярных	Деформируемая, 1:100 1:50	«Прогноз деформаций русла р. Дон в районе водозабора I очереди Нововоронежской АЭС и разработка рекомендаций по его защите от наносов». Разработаны рекомендации по защите водозабора АЭС от поступающих наносов.
27	Иртыш у с. Еланчино, 1976 г., М.М. Гендельман	Жесткая, 1:200 1:100	«Исследование деформаций русла и поймы р. Иртыш у г. Тобольска для проектирования гидротехнических сооружений Тобольского НХК». Исследованы деформации русла и поймы р. Иртыш и разработаны рекомендации по выбору места водозабора Тобольского НХК.
28	Обь у г. Барнаула, 1976 г., Н.С. Знаменская	Деформируемая, 1:5000 1:100	«Исследование руслового процесса р. Оби с целью разработки рекомендаций по обеспечению бесперебойной работы существующего водозабора г. Барнаула». Разработаны рекомендации по нормализации работы водозабора.

1	2	3	4
29.	Иртыш у с. Медведчиково, май, 1976 г., М.М. Гендельман	Жесткая, 1:400 1:100	«Исследование деформаций русла и поймы р. Иртыш у г. Тобольска для проектирования гидротехнических сооружений Тобольского НХК». Разработаны рекомендации по выбору места размещения рассеивающего выпуска промстоков Тобольского НХК.
30	Нюкжа, 1416–1422 км БАМ, 1976 г., З.Д. Копалиани	Деформируемая, 1:300 1:100	«Исследование кинематики потока и русловых деформаций на участках прижимов р. Нюкжи (1416–1422 км БАМ) в бытовых и проектных условиях». Разработаны рекомендации по учету руслового процесса при проектировании железнодорожной насыпи на участках прижимов реки Нюкжи.
31	Терешка, 1976 г., Г.Г. Месерьянс	Деформируемая, 1:25 1:25	«Прогноз русловых деформаций и рекомендации к мероприятиям по пропуску волжской воды по р. Терешке». Разработаны рекомендации по выбору места размещения водозаборов для орошения.
32	Амур у г. Хабаровска, 1975–1976 гг., Л.И. Розенберг	Жесткая, 1:500 1:100	«Исследование руслового процесса р. Амур на участке проектируемого водозабора ТЭЦ-3 г. Хабаровска». Разработаны рекомендации по выбору местоположения оголовка водозабора Хабаровской ТЭЦ-3.
33	Обь у г. Барнаула, 1977 г., Н.С. Зубков	Жесткая, 1:1333 1:200	«Анализ руслового процесса р. Оби на участке от г. Барнаула до п. Гоньба для обоснования проекта водозабора Барнаульской ТЭЦ-3». Выполнена оценка условий работы существующего городского водозабора и предложен вариант размещения проектируемого водозабора ТЭЦ-3.
34	Обь у г. Барнаула, 1977 г., Н.С. Зубков	Жесткая на открытой русловой площадке, 1:250 1:50	Выполнен анализ руслового процесса и предложена конструкция сооружения, ограждающего старый оголовок водозабора от надвигающихся наносов.
35.	Обь у г. Барнаула – ковш водозабора, 1977 г., Н.С. Зубков	Жесткая, 1:100 1:100	Выполнена оценка условий работы водозаборного ковша проектируемого водозабора, определены оптимальные размеры его конструктивных элементов.

1	2	3	4
36	Дон у Нововоронежской АЭС, 1977 г., Н.А. Ярных	Воздушно-напорная, 1:200 1:100	«Прогноз деформаций русла р. Дон в районе водозабора I-й очереди Нововоронежской АЭС и разработка рекомендаций по его защите от наносов». Разработаны рекомендации по защите водозабора Нововоронежской АЭС от наносов.
37	Амур у г. Хабаровска, 1977 г., Н.А. Ярных	Воздушно-напорная, размываемая, 1:200 1:100	«Исследование руслового процесса р. Амур на участке проектируемого водозабора ТЭЦ-2 г. Хабаровска». Предложено место размещения оголовка водозабора Хабаровской ТЭЦ-2
38	Иртыш, участок Горноправдинск—Цингалы с поймой, 1978 г., М.М. Гендельман	Жесткая, 1:2000 1:100	«Разработать и представить в Минводхоз СССР методику и рекомендации по пропуску паводковых расходов воды по незакрепленным поймам рек при стеснении основных русел рек гидроузлами по трассам переброски стока». Разработаны рекомендации по выбору створа размещения Цингалинского гидроузла.
39	Полометь у д.Зеленый Бор, 1978 г., А.Б. Клавен	Жесткая, 1:25 1:25	«Разработать указания по размещению и гидравлическому обоснованию проектов рассеивающих выпусков сточных вод». Выполнено моделирование вторичных течений.
40	Хани, 1298—3000 км БАМ, 1978 г., З.Д. Копалиани	Жесткая, 1:150 1:150	«Разработать и выдать Минтрансстрою прогноз русловых деформаций и предложения по защите от их неблагоприятных воздействий на инженерные сооружения БАМ». Разработаны рекомендации по трассированию железной дороги вдоль берега р. Хани.
41	Вычегда, Котласский ЦБК, 1977—1979 гг., Н.С. Зубков	Жесткая, 1:300 1:100	«Оценка изменений руслового режима р. Вычегда на участке расположения Котласского ЦБК в связи с предполагаемой застройкой части левобережной поймы реки». Разработаны рекомендации по обеспечению водных подходов к причалам Котласского ЦБК и оценены условия работы водозабора.

1	2	3	4
42	Вычегда, п. Ко- ряжма, 1979—1980 гг., Н.С. Зубков	Деформируемая, полистирол, 1:1000 1:100	Выполнена оценка влияния застройки поймы на гидрологический режим реки.
43	Поломь, 1980 г., А.Б. Клавен	Деформируемая, 1:25 1:25	«Разработка инструкции по учету деформаций речных русел и пойм, волновых и ледовых воздействий при проектировании, строительстве и эксплуатации переходов нефтегазопроводов через водные преграды». Исследование характера заносимости поперечной прорези.
44	Р. Хара-Мурин на участке железнодорожно-го мостового перехода Восточно-Сибирской железной дороги, 1979—1981 гг., З.Д. Копалиани, совместно с КПИ	Деформируемая, 1:75 1:75	«Исследование руслового процесса р. Хара-Мурин с целью разработки рекомендаций по регулированию русла на участке расположения ж/д мостового перехода». Разработаны рекомендации по регулированию русла на участке мостового перехода.
45	Иртыш у г. Омска, 1979—1981 гг., Н.С. Зубков	Жесткая, 1:500 1:50	«Исследование руслового режима р. Иртыш у г. Омска в связи с хозяйственным использованием реки». Оценено влияние хозяйственной деятельности на гидравлическое сопротивление потока и пропускную способность русла.
46	Иртыш у г. Омска, 1980 г., Н.С. Зубков	Жесткая, 1:500 1:50	Выполнена оценка условий работы городского водозабора и водозабора шинного завода.
47	Дунай у г. Из-маила, 1980 г., Б.Ф. Смищенко, Г.Г. Месерьянс	Деформируемая, 1:150 1:150 уголь	«Исследование руслового процесса р. Дунай у г. Измаила с целью разработки мероприятий по защите акватории затона Измаильского СРМЗ от занесения наносами». Разработаны рекомендации по обеспечению гарантированных глубин на акватории порта.



1	2	3	4
48	<p>Полометь, 1980 г., А.Б. Клавен</p>	<p>7 моделей, искажение от 1 до 4-х, 1:25; 1:100; 1:100; 1:100; 1:200; 1:25; 1:100; 1:50; 1:25; 1:200; 1:200; 1:200; 1:500; 1:50</p>	<p>«Экспериментальное исследование кинематических характеристик потока на жестких пространственных моделях с целью выяснения характера влияния масштабов модели и степени их искажения на структуру течений».</p> <p>Выполнена оценка влияния масштаба модели и степени искажения на структуру течений.</p>
49	<p>Вычегда Сыктывкарский ЛПК, 1981—1982 гг., Н.С. Зубков</p>	<p>Жесткая, 1:300 1:50</p>	<p>«Исследование руслового режима р. Вычегды в районе расположения Сыктывкарского ЛПК».</p> <p>Рекомендации по обеспечению нормального функционирования водных подходов и рейда приплыва плотов Сыктывкарского ЛПК.</p>
50	<p>Пяндж на участке Советской границы, 1981—1982 гг., М.М. Гендельман</p>	<p>Жесткая с поймой, 1:1500 1:100</p>	<p>«Исследование руслового процесса р. Пяндж».</p> <p>Дано гидрологическое обоснование проекта возвращения русла в прежнее положение.</p>
51	<p>Полометь с. Желбицы, 1981—1983 гг., А.Б. Клавен</p>	<p>Деформируемая, 1:10 1:10</p>	<p>«Разработать методы расчета и сооружения размываемых гидравлических моделей речных русел на основе гидроморфологического и гидродинамического аспектов теории руслового процесса».</p> <p>Разработана общая схема расчета размываемых моделей.</p> <p>Выявлены основные и дополнительные факторы, определяющие подбье механизма взаимодействия потока и русла.</p>
52	<p>Кубань ниже г. Краснодар, 1981—1985 гг., Н.С. Зубков</p>	<p>Жесткая, 1:200 1:50</p>	<p>«Исследование руслового режима р. Кубани на участке от Краснодарского гидроузла до устья и разработка рекомендаций по учету руслового процесса при хозяйственном использовании реки».</p> <p>Разработаны рекомендации по нормализации работы инфильтрационного водозабора и рассеивающего выпуска.</p>

1	2	3	4
53	Селенга Селенгинский ЦКК, 1982–1984 г., А.Б. Клавен	Жесткая, 1:300 1:100	«Исследование режима руслоформирования р. Селенги на участке размещения Селенгинского ЦКК и разработка рекомендации по нормализации работы водозабора и рассеивающего выпуска очищенных сточных вод комбината». Разработаны рекомендации по нормализации работы инфильтрационного водозабора и рассеивающего выпуска.
54	Утулик на участке ж/д мостового перехода Восточно-Сибирской железной дороги, 1982–1984 г., З.Д. Копалиани (КПИ)	Деформируемая, 1:60 1:60	«Исследование руслового процесса р. Утулик с целью разработки рекомендаций по регулированию русла на участке расположения ж/д мостового перехода». Разработаны рекомендации по регулированию русла на участке мостового перехода.
55	Дунай у г. Вилково, 1983–1985 г., М.М. Гендельман	Жесткая, 1:200 1:10	«Исследование руслового процесса на советском участке дельты р. Дунай, с моделированием вариантов судового хода, ниже г. Вилково». Выполнены исследования для регулирования судового хода на устьевом участке Килийской дельты р. Дунай.
56	Томь в районе г. Томска, 1983–1985 г., Г.Г. Месерянец	Жесткая, 1:750 1:70	«Исследование изменений гидрологического и руслового режимов р. Томь, возникающих в результате освоения русловых месторождений песчано-гравийных строительных материалов, создания судового хода». Разработаны рекомендации по размещению карьеров в русле с наименьшими отрицательными последствиями.
57	Томь на участке, 1984 г., Г.Г. Месерянец	Жесткая, открытая русловая площадка, 1:750 1:70	«Изменение гидрологического и руслового режимов р. Томь, возникающих в результате освоения русловых месторождений песчано-гравийных строительных материалов, создание судового хода». Выполнена оценка влияния карьерных выемок на русловые процессы.
58	р. Дунай у г. Вилково, 1984–1985 г., Н.С. Зубков	Жесткая, 1:500 1:50	«Исследование руслового процесса на советском участке дельты р. Дуная, с моделированием вариантов судового хода, ниже г. Вилково». Оценена эффективность вариантов устройства глубоководных судовых трасс на советском участке Килийской дельты р. Дунай».

1	2	3	4
59	Утулик на участке ж/д мостового перехода Восточно-Сибирской железной дороги, 1982–1984 гг., З.Д. Копалиани (КПИ)	Деформируемая, 1:60 1:60	«Исследование руслового процесса р. Утулик с целью разработки рекомендаций по регулированию русла на участке расположения ж/д мостового перехода». Разработаны рекомендации по регулированию русла на участке мостового перехода.
60	Полометь у с. Яжелбицы, 1984 г., А.Б. Клавен	Деформируемая, 1:10 1:10	«Усовершенствование методики моделирования внутрирусловых форм и ее экспериментальная оценка на моделях разного масштаба». Предпринята попытка моделирования микро- и мезоформ руслового рельефа при прохождении волны половодья.
61	Иртыш ниже Тобольска VI–VIII 1985 гг., М.М. Гендельман, А.Б. Клавен, З.Д. Копалиани	Жесткая 1:2000; 1:250; 1:175; 1:125; 1:100	«Исследование гидравлического режима и руслового процесса Нижнего Иртыша в естественных и проектных условиях с целью обоснования оптимального варианта проекта верхнего участка (от г. Ханты-Мансийска до г. Тобольска) тракта переброски стока сибирских рек». Оценена пропускная способность русла в проектных условиях, дана прогнозная оценка ледотермического режима и пропускной способности в зимний период. Составлено заключение об общей устойчивости русла и гидрологических условиях водозабора.
62	Иртыш ниже Тобольска, XI–XII 1985 г., М.М. Гендельман, А.Б. Клавен, З.Д. Копалиани	Жесткая 1:2000 1:250; 1:175; 1:125; 1:100	«Исследование вклада в гидравлические сопротивления речных излучин». Оценен вклад русловых микроформ в гидравлические сопротивления.
63	Иртыш ниже Тобольска, 1986 г., М.М. Гендельман, А.Б. Клавен, З.Д. Копалиани	Деформируемая, 1:800 1:100	«Исследование пропускной способности и гидравлических сопротивлений русел меандрирующих рек». Оценен вклад в гидравлические сопротивления плесов и перекагов русла.

1	2	3	4
65	Обь у Барнаула, 1986–1988 гг., А.Б. Клавен, В.Н. Коковин	Жесткая, 1:450 1:150	«Регулирование русла р. Оби у г. Барнаула в связи с интенсивным хозяйственным освоением русла и поймы». Разработан прогноз руслового процесса 30-километрового участка Оби у Барнаула, даны предложения по реконструкции городского водозабора.
66	Обь у Барнаула, 1986–1988 гг., А.Б. Клавен, В.Н. Коковин	Жесткая, 1:450 1:150	«Исследование руслового процесса р. Оби у г. Барнаула с целью обеспечения безаварийной работы существующего руслового водозабора Новоалтайского КРЗ и разработки рекомендаций по его реконструкции». Рекомендовано вынести оголовки водозабора в плесовую ложину, либо соорудить незатопляемый водоприемник с соответствующим режиму деформаций дна и урвней воды расположением водоприемных отверстий.
66	Аносовка на участке ж/д мостового перехода Восточно-Сибирской железной дороги, 1987–1988 гг. З.Д. Копалиани (КПИ)	Деформируемая, 1:50 1:50	«Гидравлическое моделирование руслового процесса предгорного участка р. Аносовки на мостовом переходе». Разработаны рекомендации по регулированию русла на участке мостового перехода.
67	Обь у г. Камня-на-Оби, 1987–1988 гг., Н.С. Зубков	Жесткая, 1:350 1:100	«Исследование руслового процесса р. Оби у г. Камень-на-Оби с целью обеспечения нормальной эксплуатации городского водозабора». Рекомендовано устройство резервного оголовка. Определены условия эксплуатации существующего и резервного оголовков при современной гидравлико-морфологической ситуации и прогнозируемых ее изменениях.
68	Обь у Барнаула, 1989 г., А.Б. Клавен, В.Н. Коковин	Жесткая, с деформируемым фрагментом, 1:450 1:150	«Лабораторные исследования гидравлической структуры потока в районе мостового перехода через р. Обь в г. Барнауле». Исследованы варианты однопролетного и двухпролетного переходов и рекомендован как оптимальный вариант двухпролетный мост, позволяющий сохранить действующими оба рукава Оби.

1	2	3	4
69	Обь у Барнаула, 1989 г., А.Б. Клавен, В.Н. Коковин	Жесткая, с деформируе- мым фрагментом, 1:450 1:150	«Лабораторные исследования гидравлической структуры потока в районе мостового перехода через р. Обь в г. Барнауле». Исследованы варианты однопролетного и двухпролетного переходов и рекомендован как оптимальный вариант двухпролетный мост, позволяющий сохранить действующими оба рукава Оби.
70	Обь у Барнаула, 1989 г., А.Б. Клавен, В.Н. Коковин	Жесткая, 1:450 1:150	«Лабораторные исследования гидравлической и кинематической структуры р. Оби в районе п. Затон с целью обоснования проекта полей фильтрации и оценки эффективности перекрытия пр. Бобровки». Рекомендованы защита полей фильтрации и способ стабилизации
71	Амур у Амурска, 1989—1992 гг., Г.Г. Месерлянс	Жесткая, 1:250 1:100	«Изучение руслового процесса р. Амур с целью определения оптимального расположения новой линии водовода и типа общего рассеивающего выпуска сточных вод Амурского ЦКК». Разработаны рекомендации по местоположению, типу конструкции и параметрам отдельных узлов рассеивающего выпуска.
72	Амур у Амурска, 1989—1992 гг., Г.Г. Месерлянс	Воздушно- напорная, жесткая, 1:4500 1:150	«Изучение руслового процесса р. Амур с целью определения оптимального расположения новой линии водовода и типа общего рассеивающего выпуска сточных вод Амурского ЦКК». Исследовано распределение расходов воды по рукавам.
73	Кама у Сорочьих Гор, 1990 г., В.Ф. Николаев	Жесткая, 1:100 1:100	«Исследование влияния мостового перехода через р. Каму у с. Сорочьи Горы на гидравлический и русловый режимы реки в зоне перехода». Рекомендован оптимальный вариант трассы мостового перехода.
74	Амур у Хабаровска, 1991—1992 гг., А.Б. Клавен, В.Н. Никитин	Жесткая, 1:500 1:100	«Исследование руслового процесса р. Амур в районе г. Хабаровска с целью разработки рекомендаций по нормализации работы существующих оголовков и размещению нового водозабора Хабаровской ТЭЦ-3». Исследовано поле скоростей, получены граничные условия для модели-фрагмента.

1	2	3	4
75	Амур у Амурска, 1991 г., А.Б. Клавен, В.И. Теллов	Жесткая, 1:100 1:100	«Гидравлические модельные исследования сооружений водозабора на р. Амур для Падалинского (западного) промрайона г. Амурска». Разработаны рекомендации по размещению в русле и по конструкции водозабора ковшового водозабора.
76	Дон у ст. Мелиховской, 1991 г., В.М. Католиков	Жесткая, 1:250 60	«Исследование руслового режима и разработка рекомендаций по схеме русловыправительных мероприятий на участке р. Дон от с. Раздорского до с. Мелиховской». Предложены инженерные мероприятия, направленные на предотвращение размыва берега и стабилизацию судового хода.
77	Амур у Хабаровска, 1991—1993 гг., М.М. Гендельман	Жесткая, 1:13000 1:100	«Исследование гидравлического и руслового режимов и разработка рекомендаций по обеспечению нормального функционирования хозяйственных объектов в русле р. Амур у г. Хабаровска».
78	Лаба у пос. Мо-стовского, 1991—1993 гг., З.Д. Копалиани, А.Б. Швидченко	Деформируемая, 1:50 1:50	Разработаны предложения по нормализации работы городского водозабора. «Исследование руслового и гидравлического режимов р. Лабы в районе пос. Мо-стовского в связи с карьерными разработками».
79	Иртыш у Омска, 1994—1995 гг., А.Б. Клавен, В.И. Теллов	Жесткая, 1:150 1:150	Разработаны предложения по использованию руслового аллювия в хозяйственных целях в объемах, безопасных для окружающей среды.
80	Иртыш у Павлодара, 1995 г., З.Д. Копалиани	Деформируемая, 1:220, с переменным искажением геометрических масштабов уголь, песок	«Лабораторные исследования распространения нефтяного пятна в реке с целью обоснования и успешного выполнения Программы Вторых Всероссийских учений по локализации и сбору нефти при возможных авариях на подводных переходах магистральных нефтепроводов». Разработаны схемы установки боновых заграждений применительно к разным гидрометеорологическим ситуациям.
			«Разработка рекомендаций по учету русловых деформаций при демонтаже старых трубопроводов и оценка целесообразности берегоукрепления и дноуглубления русла р. Иртыша на участке подводного перехода нефтепровода Павлодар — Чимкент».
			Разработаны рекомендации по стабилизации русла Иртыша, а также по местоположению и заглублению в русло нефтепровода.

1	2	3	4
81	Обь у Стрежевого (фрагмент), 1995–1996 гг., М.М. Гендельман	Жесткая, 1:300 1:300	«Характеристика руслового процесса р. Оби на участке подводного перехода нефтепровода Александровское — Анжеро — Судженск и разработка рекомендаций по обеспечению его надежности по условиям русловых деформаций». Разработано несколько вариантов исключения аварийной ситуации на переходе по причинам русловых деформаций.
82	Обь у Барнаула, 1990 г., А.Б. Клавен, В.Н. Коковин	Жесткая, 1:450 1:150	«Экспериментальное исследование вариантов инженерных сооружений у мостовых переходов через р. Обь в районе г. Барнаула». Исследованы варианты регуляционных сооружений (плановые очертания и размеры) и рекомендован обеспечивающий наилучшие условия протекания потока.
83	Дон (приустьевой участок), 1996 г., А.С. Судольский, В.С. Кожевников	Жесткая	«Разработка рекомендаций по учету деформаций и инженерной стабилизации русла, по локализации и сбору нефти в условиях возникновения аварийных ситуаций на подводном переходе МН Тихорецк — Лисичанск через р. Дон». Предложены схемы расстановки боновых заграждений, учитывающие гидрометеорологические условия, время движения нефти по реке, экологический и социальный факторы.
84	Вятка у Корчемкино, 1996–1997 гг., В.Ф. Николаев	Жесткая, 1:75 1:75	«Исследование гидрологического и руслового режимов р. Вятки в районе Кировского городского водозабора и обоснование инженерных мероприятий по обеспечению нормальных условий его эксплуатации». Предложены инженерные мероприятия, направленные на улучшение гидравлично-морфологической ситуации в зоне размещения оголовков водозабора.
85	Обь у с. Локосово, 1997 г., А.Б. Клавен, В.И. Теплов	Жесткая, 1:500 1:500	«Гидрологическое обоснование технологических карт локализации и ликвидации аварийных разливов нефти на ППМН через р. Обь и протоку Локосовскую». Рекомендованы места установки боновых заграждений с учетом гидрометеорологических условий, времени движения нефти по реке и экологических факторов.
86	Амур у Амурска, 1998 г., А.Б. Клавен, В.И. Теплов	Жесткая, 1:300 1:100	«Гидравлические модельные исследования сооружений водозабора выпуска очищенных стоков на р. Амур для Падалинского (западного) промрайона г. Амурска».

1	2	3	4
87	<p>р. Амур у Хабаровска, 1991–1992 гг., А.Б. Клавен, В.Н. Никитин</p>	<p>Жесткая, 1:500 1:100</p>	<p>«Исследование руслового процесса р. Амур в районе г. Хабаровска с целью разработки рекомендаций по нормализации работы существующих оголовков и размещению нового водозабора Хабаровской ТЭЦ-3». Исследовано поле скоростей, получены граничные условия для модели-фрагмента.</p>
88	<p>р. Обь у с. Локосово, 1998 г., А.Б. Клавен, В.И. Теплов</p>	<p>Жесткая с покрытием из полиэтиленовой пленки, 1:500 1:500</p>	<p>«Разработать технологические карты локализации и ликвидации аварийных разливов нефти под ледяным покровом на ПП МН через р. Обь и протоку Локосовскую. Рекомендованы мета и средства перехвата и сбора нефти.</p>
89	<p>р. Волга у д. Кадница, 1998 г., А.Б. Клавен, А.Н. Кондратьев</p>	<p>Жесткая, 1:500 1:500</p>	<p>«Разработка гидрологического обоснования технологических карт по локализации и ликвидации аварийных разливов нефти на ПП через р. Волгу, р-н д. Кадница». Рекомендованы места перехвата нефтяного загрязнения для различных гидрометеорологических условий и разных точек разгерметизации нефтепровода.</p>
90	<p>р. Белая, 1997–1998 гг., А.Б. Клавен, В.Н. Никитин</p>	<p>Жесткая, 1:500 1:500</p>	<p>«Разработать предложения по местам локализации нефтяного разлива и схемам расстановки боновых заграждений на р. Белой ниже перехода нефтепровода Пермь — Альметьевск». Разработаны схемы установки боновых заграждений для перехвата, локализации и сбора аварийных разливов нефти.</p>
91	<p>р. Белая, 1999 г., А.Б. Клавен, А.Н. Кондратьев</p>	<p>Жесткая, 1:500 1:500</p>	<p>«Гидрологическое обеспечение Учений по локализации разлива нефти на подводных переходах через р. Белую». Установлены возможные пути распространения аварийных разливов нефти в разных гидрометеорологических условиях и рекомендованы способы их перехвата.</p>
92	<p>р. Нева 1999–2000 гг., А.Б. Клавен, А.Н. Кондратьев</p>	<p>Жесткая, 1:400 1:400</p>	<p>«Экспериментальные исследования распространения аварийных разливов нефти на р. Нева на участке подводного перехода БТС, схем ее локализации и защиты водозаборов». Разработаны схемы перехвата, локализации и сбора аварийных разливов нефти. Разработаны схемы защиты водозаборов от нефтяного загрязнения.</p>



1	2	3	4
93	Обь у Барнаула, 1989 г., А.Б. Клавен, В.Н. Коковин	Жесткая, с деформируе- мым фрагментом, 1:450 1:150	«Лабораторные исследования гидравлической структуры потока в районе мостового перехода через р. Обь в г. Барнауле». Исследованы варианты однопролетного и двухпролетного переходов и рекомендован как оптимальный вариант двухпролетный мост, позволяющий сохранить действующими оба рукава Оби.
94	Гриб, Алжир, 2000 г., А.А. Костюченко	Жесткая, 1:100 1:100	«Экспериментальные исследования гидравлических условий пропуска сбросных расходов по быстротоку аварийного сбросного канала гидроузла GHRIB (Алжир)». Экспериментально установлены гидравлические характеристики потока при пропуске сбросных расходов воды по быстротоку аварийного сбросного канала.
95	Протока Бешеная, 2003 г., Б.Ф. Смищенко, В.И. Теплов	Жесткая, 1:100 1:100	«Гидравлическое моделирование проектируемых запруд в протоках Бешеная и Пемзенская р. Амур в районе г. Хабаровска (Модель-1 — протока Бешеная)». Моделированием определен оптимальный вариант компоновки запруды и ее параметров.
96	Лена у Ленска, 2003 г., А.Б. Клавен, З.Д. Копалиани	Жесткая, 1:1000 1:250	«Совершенствовать теоретическую базу и методику прогноза заторных наводнений на р. Лене с учетом противозаторных мероприятий на основе гидравлического моделирования». Исследован механизм формирования затора льда и рекомендованы варианты мероприятий по снижению заторных уровней и защите города от затопления.
97	Протока Пемзенская, 2004 г., Б.Ф. Смищенко, В.И. Теплов	Жесткая, 1:100 1:100	«Гидравлическое моделирование проектируемых запруд в протоках Бешеная и Пемзенская р. Амур в районе г. Хабаровска». (Модель-2 — протока Пемзенская). Моделированием определен оптимальный вариант компоновки запруды и ее параметров.
98	Лена у Якутска, 2006–2007 гг., А.Б. Клавен, З.Д. Копалиани	Жесткая, 1:1200 1:300	«Экспериментальная оценка проектных решений мостового перехода через р. Лену на новой железнодорожной линии Беркакит — Томмот — Якутск с целью установления допустимых величин пролетов моста по условиям пропуска весеннего ледохода». Выполнена экспериментальная оценка ледопропускной способности мостовых переходов с пролетами разной длины.

1	2	3	4
99	Иртыш у Ханты-Мансийска, 2006 г., Б.Ф. Смищенко, А.Б. Клавен	Жесткая, 1:500 1:200	«Гидроморфологический анализ и лабораторное физическое моделирование гидравлического режима, руслового процесса и структуры речного потока р. Иртыш для обоснования проекта руслорегулирующих мероприятий, направленных на обеспечение долговременного и надежного функционирования автотрассы и речного порта г. Ханты-Мансийска». Разработаны рекомендации по нормализации обстановки у речного вокзала и по уменьшению размыва вогнутого берега северной излучины путем устройства спрямляющего левобережного канала.
100	Лена у Якутска, 2007 г., А.Б. Клавен, З.Д. Копалиани	Жесткая, 1:1200 1:300	«Гидрологическое обоснование оптимальной схемы мостового перехода через р. Лену в районе Табагинского мыса на строящейся ж/д линии Беркакит — Том-мост — Якутск». Выполнена экспериментальная оценка ледопропускной способности проектных вариантов мостовых переходов с разной длиной подмостовых пролетов.
101	Кубань — излучина, 2008 г., З.Д. Копалиани, А.Б. Клавен	Деформируемая и жесткая, 1:150 1:150	«Исследование современного состояния и научное обоснование методов и средств обеспечения устойчивого функционирования водохозяйственного комплекса р. Кубани и снижения рисков вредного воздействия вод». Разработаны рекомендации по уменьшению темпов размыва вогнутых берегов излучин.
102	Обь у с. Селиярово, 2008–2009 гг., А.Б. Клавен, В.И. Теплов	Жесткая, 1:2000 1:400	«Моделирование уровня режима р. Оби в пределах Приобского пойменного месторождения в естественных и проектных условиях развития транспортной сети месторождения». Определены уровни воды и скорости течения в русле и на пойме реки при расчетных значениях расходов воды разной обеспеченности в проектных условиях.
103	Мзымта у с. Эсто-Садок, 2010 г., В.М. Католиков, А.Б. Клавен, З.Д. Копалиани	Деформируемая 1:50 1:50	«Расчетно-экспериментальная оценка гидравлично-морфологических условий пропуска расходов воды 1%-ной обеспеченности по проектному канализованному участку реки Мзымты в районе п. Эсто-Садок». Выполнена оценка проекта канализации русла р. Мзымты у п. Эсто-Садок в связи со строительством медиадеревни Зимней Олимпиады Сочи–2014. Разработаны рекомендации по стабилизации проектируемого канализованного русла.

## Приложение 2

### ПЕРЕЧЕНЬ ОСНОВНЫХ ЛАБОРАТОРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ, ВЫПОЛНЕННЫХ В РУСЛОВОЙ ЛАБОРАТОРИИ ГГИ НА ГИДРАВЛИЧЕСКИХ УСТАНОВКАХ И ЛОТКАХ ЗА ПЕРИОД 1957–2009 гг.

№ п/п	Установка, ее размеры, автор, время выполнения	Характеристика дна	Цель эксперимента и исследований
1	2	3	4
1	Гидравлический лоток 5,0×0,068 м, А.Н. Ляпин, А.Б. Клавен, 1957 г.	Жесткое дно	Исследование закономерностей гидравлики и кинематики плавно-изменяющегося движения
2	Гидравлический лоток 15,0×0,5 м, Н.С. Знаменская, 1960 г.	Подвижное песчаное дно	Исследование донных гряд и размывов у мостовых опор
3	Гидравлический лоток 5,0×0,068 м, Н.А. Ярных, 1959–1962 гг.	Песчаное дно	Исследование структуры потока над русловыми формами
4	Гидравлический лоток 30,0×0,50 м, Н.С. Знаменская, 1963 г.	Крупный песок	Исследование образования антидюн
5	Гидравлический лоток 5,0×0,068 м, А.Б. Клавен, 1963 г.	Жесткое дно	Исследование макротурбулентности открытого потока
6	Гидравлический лоток 30,0×0,50 м, Н.С. Знаменская, 1963–1964 гг.	Песчаное дно	Исследование движения гряд и изменения расхода наносов по их длине
7	Гидравлический лоток 5,0×0,068 м, А.Б. Клавен, 1963 г.	Жесткое дно	Исследование макротурбулентности открытого потока
8	Гидравлический лоток 30,0×0,50 м, А.Н. Ляпин, 1963–1968 гг.	Песок	Исследование гидравлики потока при сужении и расширении его гидротехническими сооружениями
9	Гидравлический лоток 5,0×0,068 м, А.Б. Клавен, 1964–1965 гг.	Жесткое дно	Исследование макротурбулентности с помощью скользящей фотосъемки
10	Бетонный гидравлический лоток 24,0×2,0 м, Н.А. Ярных, 1964–1966 гг.	Песок	Изучение структуры потока над русловыми формами

1	2	3	4
11	Гидравлический лоток 30,0×0,50 м, Н.С. Знаменская, 1965 г.	Каменный уголь	Исследование образования рифелей
12	Бетонный гидравлический лоток 35,0×2,0 м, Б.Ф. Снищенко, В.В. Ромашин, 1965–1966 гг.	Песок	Исследование кинематики потока и форм транспорта наносов при разработке подводной траншеи
13	Гидравлический лоток 8,0×0,21 м, А.Б. Клавен, 1966–1967 гг.	Стеклоянное дно	Исследование крупномасштабной турбулентности в открытом прямолинейном канале
14	Гидравлический лоток 30,0×0,50 м, З.Д. Копалиани, 1966–1970 гг.	Гравий, керамзит	Исследование структурных форм транспорта крупных наносов
15	Гидравлический лоток 5,0×0,068 м, З.Д. Копалиани, 1967 г.	Песок, керамзит	Исследование обтекания цилиндра на дне потока и грядового движения наносов
16	Гидравлический лоток криволинейных очертаний, З.М. Великанова, 1967–1970 гг.	Песок	Исследование кинематики потока и форм транспорта наносов в излучине
17	Бетонный лоток 35,0×2,0 м, В.С. Кожевников, 1967–1970 гг.	Песок	Исследование побочного типа руслового процесса
18	Бетонный лоток 24,0×2,0 м, А.Н. Ляпин, 1967 г.	Песок	Изучение меандрирования русел рек
19	Гидравлический лоток 8,0×0,21 м, А.Б. Клавен, З.Д. Копалиани, 1968–1970 гг.	Зернистая шероховатость	Исследование макротурбулентности руслового потока с сильно шероховатым дном
20	Экспериментальная установка 15,0×6,0 м, Н.С. Знаменская, В. Саликов, 1969 г.	Песок	Исследование гидравлики руслового и пойменного потоков при свободном и ограниченном меандрировании
21	Гидравлический лоток 35,0×2,0 м, О.А. Твалavadze, 1971 г.	Песок	Исследование транспорта наносов в условиях сужения и расширения русла
22	Бетонная площадка, Э.А. Абдулаев, 1972 г.	Песок	Исследование механизма образования осередков и их обтекания потоком
23	Бетонный лоток 10,0×4,0 м, А.Н. Ляпин, 1973 г.	Песок	Исследование водозаборного ковша Образовского
24	Гидравлический лоток 8,0×0,21 м, Н.А. Ярных, 1973 г.	Песок	Исследование структуры потока над 3-х мерной грядой

1	2	3	4
25	Бетонный лоток 7,0×5,0 м, Н.А. Ярных, 1974 г.	Песок	Исследование размыва берега на фрагменте излучины р. Оби
26	Гидравлический лоток прямолинейных очертаний, Г.Г. Месерлянс, 1975–1976 г.	Песок	Исследование карьерной выработки на структуру потока и русловые деформации в излучине
27	Бетонный лоток 13,0×5,0 м, Н.А. Ярных, 1975–1976 г.	Песок	Исследование размыва берега на фрагменте участка р. Оби
28	Гидравлический лоток 8,0×0,21 м, В.М. Католиков, 1976 г.	Песок	Исследование неразмывающих скоростей и изменение параметров гряд при неустановившемся режиме потока
29	Бетонный лоток 24,0×2,0 м, Н.А. Ярных, 1975–1977 г.	Песок	Исследование заносимости поперечных траншей на дне руслового потока
30	Гидравлический лоток 100,0×1,0 м, 40-метр. секция, А.Б. Клавен, В.Н. Коковин, 1976–1978 г.	Песок	Исследование процессов разбавления сточных вод в условиях естественной диффузии и с применением оголовков разной конструкции
31	Гидравлический лоток 30,0×0,50 м, Б.Ф. Снищенко, Г.С. Ласточкин, 1977 г.	Песок	Формирование русла канала
32	Гидравлический лоток 8,0×0,21 м, З.Д. Копалиани, 1978 г.	Заменители кварцевого песка	Исследование динамических свойств различных составов заменителей песчаных наносов
33	Гидравлический лоток 30,0×0,50 м, Н.А. Ярных, 1978–1979 г.	Песок	Исследование структуры потока над 3-хмерной грядой
34	Лоток криволинейных очертаний в плане, З.Д. Копалиани, 1979 г.	Песок	Исследование транспорта наносов и заносимости траншей в речной излучине
35	Гидравлический лоток 100,0×1,0 м, 40-метр. секция, З.Д. Копалиани, 1979 г.	Песок	Исследование транспорта наносов и заносимости траншей
36	Бетонный лоток 6,0×1,3 м, Н.С. Зубков, 1980–1981 г.	Песок	Исследование подпорного влияния полузапруд
37	Бетонный лоток 35,0×2,0 м, Н.С. Зубков, 1980–1981 г.	Песок	Исследование подпорного влияния полузапруд

1	2	3	4
38	Гидравлический лоток 100,0×1,0 м, 60-метр. секция, Г.Г. Месерлянс, 1979–1980 гг.	Песок	Исследование влияния карьерных выемок на гидравлические и морфологические характеристики потока и русла
39	Гидравлический лоток 8,0×0,21 м, А.Б. Клавен, В.Н. Коковин, 1980 г.	Песок	Исследование влияния фильтрующей толщи грунта на гидравлическое сопротивление потока
40	Гидравлические лотки 100,0×1,0 м; 30,0×0,50 м; 8,0×0,21 м; 8,0×0,1 м, А.Б. Клавен, В.Н. Коковин, 1981–1982 гг.	Песок	Масштабная серия. Моделирование руслового рельефа в лотках разного размера
41	Гидравлический лоток 8,0×0,21 м, А.Б. Клавен, В.Н. Коковин, 1981–1982 гг.	Песок	Исследование взаимодействия руслового и подруслового потоков
42	Гидравлический лоток 15,0×0,50 м, Г.Г. Месерлянс, 1982–1983 гг.	Уголь	Исследование влияния карьерных выемок на гидравлические и морфометрические характеристики потока и русла
43	Канал на открытой русловой площадке 2,0×1,90 м, В.М. Католиков, 1982–1985 гг.	Песок	Исследование побочного типа руслового процесса
44	Гидравлический лоток 100,0×1,0 м, А.Б. Клавен, В.Н. Коковин, 1982 г.	Металл	Исследование поля актуальных скоростей в горизонтальных плоскостях руслового потока
45	Гидравлический лоток 8,0×0,21 м, А.Б. Клавен, В.Н. Коковин, 1983 г.,	Песок	Исследование механического взаимодействия руслового потока с тяжелыми частицами грунта
46	Барокамера со смотровым стеклом, А.Б. Клавен, 1983 г.	Песок, каменноугольный порошок, тяжелая частица	Исследование механизма выведения тяжелой частицы из состояния покоя в покоящейся воде
47	Гидравлический лоток 8,0×0,21 м, А.Б. Клавен, З.Д. Копалиани, 1984–1985 гг.	Песок	Исследование гидравлических сопротивлений в условиях прямого и обратного течений воды в русле

1	2	3	4
48	Гидравлический лоток 8,0×0,21 м, А.Б. Клавен, В.Н. Коковин, 1984 г.	Песок	Исследование влияния относительной шероховатости на гидравлические сопротивления
49	Канал на открытой русловой площадке, З.Д. Копалиани, А.Б. Клавен, 1984 г.	Песок	Исследование руслового процесса в условиях антиреки
50	Гидравлический лоток 100,0×1,0 м, М.М. Гендельман, А.Б. Клавен, З.Д. Копалиани, 1985 г.	Песок	Исследование гидравлических сопротивлений и руслового процесса в условиях прямого и обратного течения
51	Канал на открытой русловой площадке, 2,0×1,9 м, З.Д. Копалиани, В.А. Волосович, 1986–1987 гг.	Песок	Оценка вклада в гидравлические сопротивления мезоформ и микроформ речного русла
52	Гидравлический лоток 100,0×1,0 м, З.Д. Копалиани, С.К. Першин, 1991–1992 гг.	Крупный песок	Исследование пропускной способности русла и транспорта донных наносов на р. Туапсе выше плотины
	Гидравлический лоток 100,0×1,0 м, З.Д. Копалиани, А.Б. Швидченко, 1992 г.	Крупный песок	Исследование характеристик транспорта наносов на р. Лабе у с. Мостовской
53	Гидравлический лоток 50,0×2,0 м, А.Б. Клавен, В.И. Теплов, 1998–1999 гг.	Дно-металл, лед-стекло	Исследование движения нефти под ледяным покровом
54	Гидравлический лоток 25,0×0,8 м, А.Б. Клавен, В.И. Теплов, 2003 г.	Стекло	Исследование формирования ледового затора
55	Фрагмент модели участка р. Лены в районе о. Батамайского, А.Б. Клавен, 2003 г.	Бетон, песок	Исследование механизма образования пойменной протоки, спрямляющей излучину реки
56	Гидравлический лоток 25,0×0,8 м, А.Б. Клавен, В.И. Теплов, 2006–2007 гг.	Стекло, дерево, бетон	Исследование влияния формы мостовых опор на формирование ледового затора
57	Схематическая модель меандрирующего русла, А.Б. Клавен, В.Н. Коковин, Г.Г. Месерлянс, 2009 г.	Жесткие берега, песчаное дно	Исследование влияния прорезы в прикорневой части пляжа на гидравлические характеристики потока в пределах излучины
58	Гидравлический лоток 8,0×0,21 м, А.С. Чеботарев, З.Д. Копалиани, 2010 г.	Гравий	Исследование процессов общего размыва и самоотмостки русла в проектируемом, канализованном русле р. Мзымты у п. Эсто-Садок

### Приложение 3

#### МОДЕЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ВОДОЕМАХ

№ п/п	Наименование темы, время выполнения работы, ответственный исполнитель темы	Масштабы модели горизонт. вертикаль.	Результаты работы
1	2	3	4
1	Лабораторные исследования волновых процессов, возникающих в Финском заливе и в прилегающей к нему части Балтийского моря во время наводнений в г. Ленинграде, 1959–1963 гг., В.Г. Носков	<u>6:100000</u> 1:400	Экспериментально оценено время добегающего первоначального возмущения до разных пунктов акватории Балтийского моря и Финского залива и трансформации первоначальной волны в разных пунктах
2	Лабораторные исследования гидродинамического режима и санитарного состояния Невской губы, 1962–1966 гг., В.А. Знаменский	<u>1:1500</u> 1:25	Исследованы планы течений и поля концентрации загрязняющих веществ
3	Лабораторные исследования гидродинамического режима и санитарного состояния Невской губы, 1964 г., В.А. Знаменский	<u>1:750</u> 1:50	Исследованы планы течений и поля концентраций загрязняющих веществ на крупномасштабном фрагменте
4	Лабораторные исследования по определению заносимости подходного канала к Ленинградскому морскому пассажирскому вокзалу, 1965–1966 гг., В.А. Знаменский	<u>1:400</u> 1:40	Исследован процесс занесения подходного канала наносами в разных гидрометеорологических условиях
5	Лабораторные исследования по определению границ затопления берега в районе Усть-Камчатка при накатывании максимальной волны цунами, 1964–1965 гг., М.И. Кривошей	<u>1:65000</u> 1:12500	Установлены отметки затопления берега при затоплении его волной цунами



1	2	3	4
6	Моделирование режима течений Братского водохранилища на участке водозабора Братского лесопромышленного комплекса, 1964–1965 гг., В.А. Знаменский	<u>1:700</u> 1:250	Исследованы течения в районе Братского ЛПК с целью разработки рекомендаций по предотвращению попадания загрязнений в зону размещения оголовков водозабора
7	Исследования течений в южной части озера Байкал с целью установления возможных путей распространения сточных вод Байкальского целлюлозного завода, 1965–1967 гг., А.С. Судольский	<u>1:10000</u> 1:3000	Определена структура течений в южной части озера Байкал при ветрах разного направления
8	Исследование течений в озере Байкал, индуцированных сейшевыми колебаниями уровня воды, 1965–1969 гг., А.С. Судольский	<u>1:100000</u> 1:5000	Изучены течения в пределах всей котловины озера Байкал, индуцируемые сейшевыми колебаниями уровня воды
9	Лабораторные исследования охлаждающей способности водохранилища — охладителя Лукомльской ГРЭС, 1965–1967 гг., В.А. Знаменский	<u>1:500</u> 1:50	Выполнены измерения поля температуры воды в акватории водохранилища-охладителя в разных гидрологических и погодных условиях
10	Моделирование Рижского залива для оценки заносимости судоходного канала (весь залив и фрагмент — южная часть), 1968–1970 гг., В.А. Знаменский	<u>1:45000</u> 1:100 ; <u>1:3000</u> 1:100	Исследованы условия заносимости наносами судоходного подходного канала в разных гидрометеорологических условиях
11	Исследование течений в Каховском водохранилище, 1970–1971 г., А.С. Судольский	<u>1:25000</u> 1:100	Исследованы течения в водохранилище с учетом регулирования расходов воды сооружениями ГЭС
12	Исследования распространения одиночной волны в акватории Балтийского моря и Финского залива, 1972 г., В.Г. Носков	<u>1:100000</u> 1:500	Определены параметры одиночной волны в разных пунктах акватории Балтийского моря и Финского залива при разных параметрах начального возмущения

1	2	3	4
13	Исследования параметров одиночной волны в акватории Финского залива для определения отметки гребня защитной дамбы, 1974 г., В.Г. Носков	<u>1:10000</u> 1:200	Определены отметки уровня воды у защитной дамбы в разных гидрологических и погодных ситуациях, формирующих одиночную волну, вызывающую наводнение в Ленинграде
14	Исследование механизма водообмена северной и южной акваторий Балхаша, 1982 г., А.С. Судольский	<u>1:50000</u> 1:100	Исследован механизм водообмена северной и южной акваторий Балхаша с учетом стока р. Или и сейшевых колебаний уровня воды

## ОБ АВТОРАХ ЭТОЙ КНИГИ

**Клавен Альберт Борисович**, заведующий Русловой лабораторией Отдела русловых процессов Государственного гидрологического института (ГГИ), доктор технических наук, действительный член Академии водохозяйственных наук.

В 1957 г. окончил Ленинградский гидрометеорологический институт по специальности инженер-гидролог и был направлен на работу в ГГИ в еще недостроенную Русловую лабораторию, в которой работает по настоящее время.

Принимал участие в завершении строительства Русловой лаборатории и в ее оснащении экспериментальным оборудованием и приборами. Разрабатывал новые приборы и методы измерений для выполнения опытов, их обработки и анализа.

С 1976 г. занимает должность заведующего Русловой лабораторией.

В период с 1957 по 2010 г. был научным руководителем или участником большого числа бюджетных и договорных НИР, выполненных в Отделе русловых процессов ГГИ.

В 1969 г. защитил кандидатскую диссертацию на тему «Лабораторное исследование кинематической структуры установившегося равномерного потока в гладком призматическом русле», а в 1996 г. — докторскую диссертацию на тему «Структура турбулентности речных потоков и методические основы их моделирования на гидравлических деформируемых моделях».

Основные направления научной деятельности: кинематическая структура речных потоков и турбулентность; гидравлическое моделирование речных потоков и русловых процессов на жестких и деформируемых моделях; разработка средств и методики измерений гидравлических и морфологических характеристик потока и русла в натуральных и лабораторных условиях; разработка оборудования для выполнения опытов и измерений характеристик потока и русла в лабораторных и натуральных условиях; натурные исследования и лабораторные эксперименты в гидравлических лотках и на физических пространственных моделях участков конкретных рек под задачи размещенных на них или проектируемых объектов экономики; разработка нормативных руководств по учету руслового процесса в строительной практике.

Автор более 80 опубликованных научных статей и 20 рационализаторских предложений, 7 из которых защищены авторскими свидетельствами как изобретения.

Участник многих международных и всероссийских научных конференций, семинаров, симпозиумов, конгрессов. Участник III, IV, V Всесоюзных и VI Всероссийского гидрологических съездов.

**Копалиани Зураб Дмитриевич**, кандидат технических наук, заведующий Лабораторией расчетов и прогнозов русловых деформаций Отдела русловых процессов ГГИ.

В 1966 г. окончил Тбилисский государственный университет с квалификацией инженера-гидролога. В 1966–1969 гг. обучался в аспирантуре ГГИ

по специальности «гидравлика и инженерная гидрология» и там же защитил кандидатскую диссертацию по теме «Вопросы русловой динамики горных рек» (научный руководитель Н.Е. Кондратьев). В 1994—2007 гг. работал заместителем директора ГГИ по научной работе. Автор более 100 научных публикаций.

Область научных интересов: морфология и динамика речных русел, русловая турбулентность, гидравлические сопротивления, гидравлическое моделирование, расход и сток донных наносов, взаимодействие речных русел и пойм с инженерными сооружениями, мониторинг руслового процесса, разработка нормативных документов по учету руслового процесса в строительной практике. Руководил крупными НИР Отдела русловых процессов по бюджетной и договорной тематике, по учету руслового процесса: при гидрологическом обосновании строительства БАМ, в проекте переброски части стока сибирских рек в Среднюю Азию, комплексными исследованиями руслового процесса рек Алтая, Ямала, бассейна Кубани, рек Волга, Иртыш, Дон, Полометь, Риони и др.

В 1988—1991 гг. работал консультантом Отдела наук о воде ЮНЕСКО в Париже. В 1996—2004 гг. — председатель Рабочей группы по гидрологии и Гидрологический советник Всемирной метеорологической организации (ВМО) по региону Азия. В 1997—2001 гг. — ведущий автор Межправительственной группы экспертов по изменению климата (IPCC). В 2001—2004 гг. — член Научного руководящего совета по глобальному энергетическому и водному эксперименту (GEWEX) Всемирной климатической программы. В 2006—2007 гг. — руководитель группы экспертов по разработке проекта «Совершенствование системы гидрологических наблюдений» в составе проекта «Модернизация и техническое перевооружение учреждений и организаций Росгидромета».

В настоящее время — Член Консультативного совета Международного исследовательского и учебного центра ЮНЕСКО по эрозии и седиментации (IRTCEs), Пекин, Китай. Член Консультативного совета Международного центра ЮНЕСКО по водным стихийным бедствиям и управлению риском, г. Цукуба, Япония, с 2010 г. С 1996 г. — член Национального комитета РФ по Международной гидрологической программе (МГП) ЮНЕСКО.

## Содержание

Предисловие.....	3
Preface .....	5
Введение .....	7
Introduction.....	11
<i>Глава 1.</i> Научные и методические основы экспериментальных исследований и гидравлического моделирования речных потоков и руслового процесса .....	15
1.1. О роли и месте экспериментальных исследований и моделирования в науке и теории познания .....	15
1.2. Из истории создания и деятельности крупнейших гидравлических лабораторий мира .....	18
1.3. Гидролого-морфологическая концепция руслового процесса — методологическая основа экспериментальных исследований речных потоков и руслового процесса, выполняемых в ГГИ.....	22
1.4. Гидромеханическое подобие открытых потоков .....	26
1.5. Особенности методики экспериментальных исследований и гидравлического моделирования участков рек, применяемой в Русловой лаборатории ГГИ .....	29
<i>Глава 2.</i> Техническое и технологическое обеспечение экспериментальных исследований речных потоков и руслового процесса в ГГИ .....	32
2.1. Предпосылки к внедрению эксперимента в гидрологию.....	32
2.2. Русловая лаборатория ГГИ .....	33
2.2.1. Краткая история становления Русловой лаборатории .....	33
2.2.2. Задачи Русловой лаборатории ГГИ .....	34
2.2.3. Основные технические параметры, экспериментальные установки и технологическое оборудование Русловой лаборатории.....	35
2.2.4. Методические приемы выполнения экспериментальных исследований и средства измерения характеристик потока и русла.....	44
2.2.5. Разработки средств измерения и вспомогательного оборудования, выполненные в Русловой лаборатории ГГИ для натурных исследований....	55
2.3. Валдайская русловая станция на р. Поломети.....	57
2.3.1. Краткая гидрологическая характеристика р. Поломети.....	58
2.3.2. Экспериментальные участки для наблюдения за различными типами руслового процесса.....	60
2.3.3. Экспериментальная передвижная эстакада на участке детальных наблюдений у с. Яжелбицы .....	64
<i>Глава 3.</i> Кинематическая структура русловых потоков .....	66
Введение .....	66
3.1. Современные представления о кинематической структуре русловых потоков .....	66
3.1.1. Общеконцептуальные подходы к проблеме турбулентности.....	66
3.1.2. Экспериментальные исследования русловой турбулентности .....	69
3.1.3. Схематизации структуры русловой турбулентности .....	74

3.2. Экспериментальные исследования русловой турбулентности, выполненные в ГГИ .....	81
3.2.1. Характеристика лабораторных установок, природных объектов, условий экспериментов и методики измерений .....	82
3.2.2. Двухмерная структура русловой турбулентности .....	88
3.2.2.1. Свойства структурных элементов турбулентности и схема кинематической структуры .....	89
3.2.2.2. Распределение продольной и вертикальной компонент скорости по глубине потока.....	93
3.2.2.3. Оценка влияния шероховатости дна на структуру турбулентности и гидравлические характеристики потока .....	96
3.2.2.4. Сопоставление лабораторных данных с натурными .....	99
3.2.3. Трехмерная структура русловой турбулентности .....	103
3.2.3.1. Распределение продольной, вертикальной и поперечной компонент актуальной скорости по глубине потока .....	103
3.2.3.2. Масштаб пульсационных скоростей .....	104
3.2.3.3. Характерные значения пульсационных скоростей.....	105
3.2.3.4. Трехмерная структура русловой турбулентности .....	107
<i>Глава 4. Лабораторные исследования методических проблем моделирования речных русел на гидравлических деформируемых моделях .....</i>	<i>109</i>
4.1. Воспроизведение типов руслового процесса в лабораторных условиях...	109
4.1.1. Опыты зарубежных и отечественных авторов .....	109
4.1.2. Работы, выполненные в Русловой лаборатории ГГИ.....	113
4.2. Физические предпосылки моделирования участков рек на гидравлических деформируемых моделях .....	121
4.2.1. Подрусловой поток и его взаимодействие с русловым потоком.....	123
4.3. Комплекс условий подобия для деформируемых моделей .....	139
<i>Глава 5. Лабораторные исследования закономерностей и механизма формирования гранулометрического состава донных отложений в речных руслах .....</i>	<i>146</i>
5.1. Методика статистического анализа гранулометрического состава наносов, разработанная во ВНИГРИ .....	147
5.2. Лабораторные исследования переформирования гранулометрического состава донных отложений на деформируемых моделях русел рек Иртыш и Волга .....	157
5.2.1. Модель р. Иртыш .....	158
5.2.2. Модель р. Волги .....	164
<i>Глава 6. Лабораторные исследования гидравлических сопротивлений и пропускной способности русел с различным типом руслового процесса и формами транспорта донных наносов .....</i>	<i>171</i>
6.1. Пропускная способность и гидравлические сопротивления русел меандрирующих рек .....	172
6.2. Влияние мезоформ и других структурных форм транспорта донных наносов на гидравлические сопротивления и пропускную способность русла...	175
6.3. Микроформы и гидравлические сопротивления .....	177
6.4. Связь гидравлических сопротивлений с турбулентной структурой руслового потока.....	179

<i>Глава 7. Методы исследования речных потоков и руслового процесса на гидравлических моделях(краткий обзор мирового и отечественного опыта) ...</i>	183
7.1. Гидравлическое моделирование на жестких моделях.....	184
7.2. Существующие методы и приемы гидравлического моделирования на деформируемых моделях .....	187
7.3. Искажение геометрических масштабов моделей речных русел.....	196
7.4. Масштаб времени установившихся, обратимых русловых деформаций ....	198
7.5. Моделирование на напорных моделях.....	201
<i>Глава 8. Примеры решения практических задач с использованием жестких гидравлических моделей речных русел .....</i>	203
8.1. Гидравлическое моделирование проектных решений трассирования железнодорожной насыпи на участке русла р. Хани по трассе БАМ .....	203
8.2. Исследования деформаций русла и кинематической структуры потока р. Селенги у с. Брянска с целью обеспечения нормальной работы выпуска сточных вод Селенгинского ЦКК.....	210
8.2.1. Особенности взаимодействия рассеивающего выпуска сточных вод водным объектом .....	210
8.2.2. Характеристики режима стока воды и морфологии русларассматриваемого участка р. Селенги .....	211
8.2.3. Методика исследований .....	213
8.2.4. Особенности гидравлики речного потока и руслового процесса.....	214
8.2.5. Экспериментальные исследования по обоснованию оптимального варианта проекта рассеивающего выпуска сточных вод СЦКК .....	218
8.2.5.1. Исследования на гидравлической пространственной модели участка р. Селенги .....	218
8.2.5.2. Исследование разбавления сточных вод на участке р. Юля-Йоки .....	223
8.2.5.3. Экспериментальное исследование различных вариантов конструкциирассеивающего выпуска .....	224
8.2.5.4. Предложения по нормализации работы инфильтрационного водозабора на о. Долгий .....	227
8.3. Регулирование русла Оби у Барнаула в связи с интенсивным хозяйственным использованием этого участка реки .....	228
8.3.1. Краткая характеристика гидрологического режима Оби у Барнаула .....	231
8.3.1.1. Физико-географическая характеристика.....	231
8.3.1.2. Водный режим.....	232
8.3.1.3. Режим твердого стока .....	233
8.3.2. Русловой процесс Оби у Барнаула.....	234
8.3.2.1. Тип руслового процесса.....	234
8.3.2.2. Морфогидродинамическая характеристика исследуемого участка Оби во второй половине 1980-х годов.....	235
8.3.2.3. Прогноз руслового процесса .....	238
8.3.3. Натурные работы, выполненные на Оби в районе Барнаула в 1986–1987 гг. ....	238

8.3.4. Экспериментальные исследования гидравлических характеристик потока, кинематической структуры течений и руслового процесса на гидравлической модели участка Оби у г. Барнаула .....	240
8.3.4.1. Гидравлическая модель р. Оби .....	240
8.3.4.2. Оценка возможности спрямления Верхне-Ереснинской излучины .....	242
8.3.4.3. Оценка гидравлико-морфологической ситуации на участке размещения городского водозабора №1 и перехода ЛЭП–220 кВ.....	243
8.3.4.4. Сравнительная оценка вариантов проектирования коммунального моста.....	246
8.3.4.5. Экспериментальная оценка гидравлико-морфологической ситуации на участке реки между коммунальным и железнодорожным мостами.....	246
8.3.4.6. Экспериментальная оценка гидравлико-морфологической ситуации на участке реки между железнодорожным мостом и о. Белоярским .....	247
8.4. Комплексные исследования гидравлического режима и руслового процесса р. Иртыш с целью обоснования проекта регулирующих мероприятий по обеспечению надежного функционирования автотрассы и речного порта г. Ханты-Мансийска.....	248
8.4.1. Методика решения проблемы .....	249
8.4.2. Основные характеристики и особенности гидрологического режима реки.....	250
8.4.3. Прогноз руслового процесса .....	252
8.4.4. Варианты инженерных мероприятий, направленных на регулирование речного потока и руслового процесса.....	254
8.4.5. Гидравлическая модель р. Иртыш.....	254
8.5. Гидравлическое моделирование пропуска половодий по пойме Иртыша в естественных и проектных условиях .....	258
<i>Глава 9. О гидравлическом моделировании на деформируемых моделях речных русел с использованием заменителей наносов .....</i>	<i>262</i>
Введение.....	262
9.1. Виды и физико-механические свойства заменителей наносов.....	263
9.2. Информация об использовании заменителей наносов в различных гидравлических лабораториях мира.....	265
9.3. Экспериментальные исследования динамических свойств различных заменителей донных наносов. Опыты Хенг-Сенг Лоу и В.К. Дебольского ....	270
9.4. Экспериментальные исследования заменителей наносов, выполненные в Русловой лаборатории ГГИ .....	275
9.5. Масштаб времени русловых деформаций при использовании заменителей наносов на деформируемых моделях речных русел.....	283
<i>Глава 10. Лабораторные исследования и гидравлическое моделирование русел рек, сложенных из крупного аллювия.....</i>	<i>288</i>
Введение.....	288
10.1. Особенности руслового процесса рек горно-предгорной зоны .....	290



10.2. Лабораторные исследования структурного транспорта крупных наносов в реках .....	295
10.3. Гидравлическое моделирование руслового процесса и транспорта донных наносов в реках, сложенных из крупного аллювия .....	308
10.3.1. О предшествующих исследованиях .....	308
10.3.2. Методика гидравлического моделирования руслового процесса рек горно-предгорной зоны при структурной и бесструктурной формах транспорта донных наносов.....	310
10.3.3. Примеры гидравлического моделирования руслового процесса на участках мостовых переходов предгорных рек .....	314
10.3.3.1. Гидравлическая модель р. Хара-Мурин .....	316
10.3.3.2. Гидравлическая модель р. Утулик .....	326
10.3.3.3. Гидравлическая модель р. Аносовки .....	341
10.3.4. Гидравлическое моделирование руслового процесса и транспорта наносов р. Лабы в связи с добычей аллювия для строительных целей .....	348
10.3.4.1. Общие сведения о реке .....	351
10.3.4.2. Натурные исследования.....	352
10.3.4.3. Гидравлическая модель р. Лабы .....	354
10.3.4.4. Лабораторные эксперименты в 100-метровом гидравлическом лотке .....	359
10.3.4.5. Выводы и рекомендации.....	361
10.3.5 Гидравлическое моделирование р. Нюкжи на участке прижима 1416–1422 км по трассе БАМ .....	363
Заключение .....	368

<i>Глава 11. Гидравлическое моделирование ледовых заторов и заторных наводнений</i> .....	371
11.1. Методические подходы к изучению ледовых заторов .....	371
11.2. Гидравлическое моделирование ледовых заторов на р. Лене у г. Ленска .....	373
11.2.1. Задачи и методика моделирования.....	375
11.2.2. Результаты экспериментов .....	378
11.2.3. Оценка эффективности противозаторных мероприятий и мер защиты г. Ленска от наводнений .....	389
11.3. Исследование ледовых заторов на р. Лене у с. Табага на пространственной гидравлической модели .....	394
11.3.1. Методика и состав модельных экспериментов .....	396
11.3.2. Анализ результатов опытов.....	401
11.3.2.1. Характеристика поля скоростей течения воды в пределах рассматриваемого участка р. Лены.....	401
11.3.2.2. Поле скоростей течения в проектных условиях.....	403
11.3.2.3. Характеристика поля скоростей течения в проектных условиях при заторах льда у мостового перехода.....	403
11.3.2.4. Характеристика уровней воды на исследуемом участке Лены.....	406
11.4. Гидравлическое моделирование заторных ситуаций у мостовых переходов разной конструкции в 20-метровом призматическом канале .....	414

11.5. Общие выводы по результатам исследований ледовых заторов на р. Лене у с. Табага на пространственной гидравлической модели и в 20-метровом призматическом канале .....	417
<i>Глава 12. Экспериментальные исследования и гидравлическое моделирование аварийных разливов нефти в реках .....</i>	<i>419</i>
12.1. Причины аварийных разливов нефти .....	419
12.2. Методы определения путей и скорости распространения аварийных разливов нефти в реках.....	420
12.3. Основные свойства поведения нефти в водной среде .....	422
12.3.1. Нефть на открытой водной поверхности .....	422
12.3.2. Нефть под ледовым покровом .....	428
12.4. Основные черты и особенности распространения аварийных разливов нефти в реках.....	439
12.5. Методика гидравлического моделирования аварийных разливов нефти в реках .....	441
12.6. Некоторые примеры моделирования аварийных разливов нефти в реках.....	443
<i>Глава 13. Натурные и экспериментальные исследования руслового процесса на р. Поломети .....</i>	<i>450</i>
Введение.....	450
13.1. Морфология, плановые деформации и гидравлика потока на участках свободного меандрирования .....	450
13.2. Исследования процессов затопления поймы и развития пойменных течений на р. Поломети у д. Заречье .....	452
13.3. Исследования грядового движения наносов.....	453
13.4. Натурные исследования макротурбулентности руслового потока.....	455
13.5. Неравновесные процессы в формировании русла р. Поломети .....	456
Заключение .....	461
<i>Глава 14. О соотношении физического и математического моделирования, физических и математических методов исследований в задачах речной гидравлики и руслового процесса .....</i>	<i>462</i>
Заключение .....	472
Conclusions.....	478
Литература .....	484
Приложение 1.....	505
Приложение 2.....	523
Приложение 3.....	528
Об авторах этой книги .....	531

# CONTENTS

Preface .....	5
Introduction .....	11
<i>Chapter 1. Scientific and methodological principles of experimental studies and hydraulic modeling of river flows and channel processes</i> .....	15
1.1. On the role and place of experimental studies and modeling in science and in the cognition theory .....	15
1.2. On the history of foundation and activities of the largest hydraulic laboratories in the World .....	18
1.3. Hydro-morphological conception of channel processes as a methodological base of experimental studies of river flows and channel processes carried out in the SHI .....	22
1.4. Hydro mechanical similarity of open flows .....	26
1.5. Peculiarities of method of experimental studies and hydraulic modeling of river flows and channels on physical models in the SHI Channel Laboratory .....	29
<i>Chapter 2. Technical and technological provision of experimental studies of river flows and channel processes in the SHI</i> .....	32
2.1. Premises to introduction experiments in hydrology .....	32
2.2. Channel Laboratory of the SHI .....	33
2.2.1. Short history of the Channel Laboratory creation .....	33
2.2.2. Objectives of the Channel Laboratory .....	34
2.2.3. Main technical parameters, experimental installations and technical equipments of the Channel Laboratory .....	35
2.2.4. Methodological procedures of conducting experimental studies and facilities for measuring flow characteristics .....	44
2.2.5. Development of measuring means and facilities carried out in the Channel Laboratory of the SHI for the field studies .....	55
2.3. Valday Channel station on the Polomet' river .....	57
2.3.1. Short hydrological description of the Polomet' river .....	58
2.3.2. Experimental plots for observation different types of channel processes .....	60
2.3.3. Experimental mobile trestle for detailed observations at the Yazhelbitsi village .....	64
<i>Chapter 3. Kinematical structure of channel flows</i> .....	66
3.1. Present knowledge on the channel flows kinematic structure .....	66
3.1.1. Main approaches to the problem of turbulence .....	66
3.1.2. Experimental studies of channel turbulence .....	69
3.1.3. Schematic structure of the flow turbulence .....	74
3.2. Experimental studies of channel turbulence carried out in the SHI .....	81
3.2.1. Characteristics of laboratory equipments, objects in nature, conditions of experiments and measurement techniques .....	82
3.2.2. Two-dimensional structure of channel turbulence .....	88
3.2.2.1. Features of structural elements of turbulence and a pattern of kinematic structure .....	89
3.2.2.2. Depth distribution of longitudinal and vertical components of the flow velocity .....	93

3.2.2.3. Estimation of bed roughness effect on the structure of turbulence and the flow hydraulic characteristics .....	96
3.2.2.4. Comparison of laboratory and field data.....	99
3.2.3. Three-dimensional structure of channel turbulence.....	103
3.2.3.1. Depth distribution of longitudinal, vertical and cross components of the flow velocity .....	103
3.2.3.2. Scale of velocity pulsations .....	104
3.2.3.3. Characteristic magnitudes of pulsating velocities .....	105
3.2.3.4. Three-dimensional structure of the channel turbulence .....	107
<i>Chapter 4. Laboratory studies of methodological problems of river channels modeling on hydraulic mobile scale models.....</i>	<i>109</i>
4.1. Reproduction of types of channel processes in the laboratory conditions.....	109
4.1.1. Experiments made by the foreign and Russian authors.....	109
4.1.2. Studies carried out in the Cannel Laboratory of the SHI.....	113
4.2. Physical premises for modeling river channels on hydraulic mobile scale models .....	121
4.2.1. Subsurface flow and its interaction with the channel flow.....	123
4.3. Complex of similarity conditions for mobile-scale models .....	139
<i>Chapter 5. Laboratory studies of regularities and mechanism of forming bed material granulometric composition in river channels .....</i>	<i>146</i>
5.1. Methodology of statistical analysis of sediment granulometric composition worked out in VNIGRI .....	147
5.2. Laboratory studies of transforming bed material granulometric composition on the mobile scale models of the Volga and Irtish rivers .....	157
5.2.1. Model of the Irtish river .....	158
5.2.2. Model of the Volga river.....	164
<i>Chapter 6. Laboratory studies of hydraulic resistance and conveyance capacity of channels with different types of channel processes and forms of bed load transport....</i>	<i>171</i>
6.1. Conveyance capacity and hydraulic resistance of meandering river channels... 172	
6.2. Effect of mesoforms and other forms of sediment transport on hydraulic resistance and conveyance capacity of river channels .....	175
6.3. Microforms and hydraulic resistance .....	177
6.4. Interaction between hydraulic resistances and the channel flow turbulent structure.....	179
<i>Chapter 7. Methods of modeling river flows and channel process on hydraulic models (short survey of the world and russian experience) .....</i>	<i>183</i>
7.1. Hydraulic modeling on fixed models .....	184
7.2. Existing methods and techniques of hydraulic modeling on mobile scale models .....	187
7.3. Distortion of geometric scales of the river channel models.....	196
7.4. Time scale of a steady reversible channel deformations .....	198
7.5. Modeling on air pressure models.....	201
<i>Chapter 8. Examples of solving practical problems using fixed hydraulic models of river channels .....</i>	<i>203</i>
8.1. Hydraulic modeling of project alternatives on the Baikal-Amour railway embankment alignment along the Khani river.....	203

8.2. Studying of channel deformations and the flow kinematical structure of the Selenga river near Bryansk for ensuring of normal operation of the Selenga cellulose and paper plant sewage discharge outlet structure .....	210
8.2.1. Peculiarities of interaction between sewage discharge outlet structure and the water object .....	210
8.2.2. Characteristics of flow regime and channel morphology of the Selenga section under study .....	211
8.2.3. Research methodology .....	213
8.2.4. Peculiarities of river flow hydraulics and channel processes .....	214
8.2.5. Experimental studies for substantiation of the optimum option for the Selenga cellulose and paper plant sewage discharge outlet structure project .....	218
8.2.5.1. Studies on the hydraulic spatial model of the Selenga river .....	218
8.2.5.2. Study of the sewage waters dilution on the Yulia-Yoki river .....	223
8.2.5.3. Experimental study of different alternatives for sewage discharge outlet structure .....	224
8.2.5.4. Suggestions on normalizing the operation of the infiltration water intake on the Dolgoye lake .....	227
8.3. Regulation of the Ob river channel section near Barnaul in connection with intensive economic utilization of the river .....	228
8.3.1. Short characteristic of hydrological regime of the Ob river near Barnaul .....	231
8.3.1.1. Physical-geographic characteristics .....	231
8.3.1.2. Water regime .....	232
8.3.1.3. Regime of sediment yield .....	233
8.3.2. Channel processes of the Ob river near Barnaul .....	234
8.3.2.1. Type of channel processes .....	234
8.3.2.2. Morphological and hydro-dynamic characteristics of the studying section of the Ob river in the second half of the 1980-s .....	235
8.3.2.3. Forecast of the channel processes .....	238
8.3.3. Field works, done in the Ob river near Barnaul in 1986-87 .....	238
8.3.4. Experimental studies of the flow hydraulic characteristics, flow kinematical structure and channel processes on the hydraulic model of the Ob river near Barnaul .....	240
8.3.4.1. Hydraulic model of the Ob river .....	240
8.3.4.2. Evaluation of the potential straightening of the Up-Eresna meander bend .....	242
8.3.4.3. Estimation of hydraulic-morphological situation on the river section of the water intake № 1 lay out and the crossing of the electricity communication line 220 kv .....	243
8.3.4.4. Comparative estimation of alternatives for municipal bridge design .....	246
8.3.4.5. Experimental evaluation of the hydraulic and morphological situations on the river section between municipal and railway bridges .....	246
8.3.4.6. Experimental evaluation of the hydraulic and morphological situations on the river section between railway bridge and Belojarskiy island .....	247

8.4. Integrated studies of hydraulic regime and channel processes of the Irtish river for substantiation of the channel regulation activities for guaranteeing the safe functioning for highway and river port of Hanti-Mansiysk.....	248
8.4.1. Method of solution the problem.....	249
8.4.2. Main characteristics and features of hydrological and channel regimes.....	250
8.4.3. Forecast of channel processes.....	252
8.4.4. Variants of engineering measures aimed at the river flow and channel processes control.....	254
8.4.5. Hydraulic model of the Irtish river.....	254
8.5. Hydraulic modeling of passing snow-melt floods through floodplain of the Irtish river in natural and design conditions.....	258
<i>Chapter 9. On the hydraulic modeling on mobile scale models of river channels using light weight materials.....</i>	<i>262</i>
9.1. Types and physical and mechanical features of light weight materials.....	262
9.2. Information on using light weight materials in various hydraulic laboratories of the World.....	262
9.3. Experimental studies of dynamical features of various light weight materials Heng-Seng Low's and V.K. Debolskiy's experiments.....	270
9.4. Experimental studies of light weight materials performed in the SHI Channel Laboratory.....	275
9.5. Time scale of channel deformations when using the light weight materials on the mobile scale models of river channels.....	283
<i>Chapter 10. Laboratory studies and hydraulic modeling of river channels composed of large alluvium.....</i>	<i>288</i>
10.1 Peculiarities of channel processes in mountain-piedimont rivers.....	290
10.2. Laboratory studies of large alluvium transport in rivers in structural forms.....	295
10.3. Hydraulic modeling of channel processes and bed load transport in rivers composed of large alluvium.....	308
10.3.1. On previous studies.....	308
10.3.2. Methodology of hydraulic modeling of mountain-piedmont river channel processes with structural and nonstructural forms of bed load transport.....	310
10.3.3. Examples of hydraulic modeling of piedmont river channel processes on the sections of bridge crossings.....	314
10.3.3.1. Hydraulic model of the Hara-Murin river.....	316
10.3.3.2. Hydraulic model of the Utulik river.....	326
10.3.3.3. Hydraulic model of the Anosovka river.....	341
10.3.4. Hydraulic modeling of channel processes and bed load transport in the Laba river in connection with alluvium excavating for construction needs.....	348
10.3.4.1. General information on the river.....	351
10.3.4.2. Field survey.....	352
10.3.4.3. Hydraulic model of the Laba river.....	354

10.3.4.4. Laboratory studies in the 100-meters long hydraulic flume .....	359
10.3.4.5. Conclusions and recommendations.....	361
10.3.5. Hydraulic modeling of the Niukzha river on the section of 1416–1422 km along the Baikal-Amour railway main road .....	363
Conclusion.....	368
<i>Chapter 11. Hydraulic modeling of ice jams and ice jam floods.....</i>	<i>371</i>
11.1. Methodological approaches to studying ice jams.....	371
11.2. Hydraulic modeling of ice jams on the Lena river near Lensk.....	373
11.2.1. Problems and methods of modeling.....	375
11.2.2. Results of the experiments.....	378
11.2.3. Evaluation of anti-jam measures efficiency and protection of Lensk .....	389
11.3. Hydraulic modeling of ice jams on the Lena river near Tabaga on the scale hydraulic model.....	394
11.3.1. Method and programm of modeling experiments.....	396
11.3.2. Analyses of experimental results .....	401
11.3.2.1. Characteristics of field of velocities on the river section under consideration .....	401
11.3.2.2. Field of velocities in project conditions .....	403
11.3.2.3. Characteristic of field of velocities in project conditions under the ice-jams presence near the bridge .....	403
11.3.2.4. Characteristic of water levels on the Lena river study reach .....	406
11.4. Hydraulic modeling of ice-jam situations near the bridges of different design constructions in 20-meters long prismatic experimental canal.....	414
11.5. General conclusions on the results of studying ice jams on the Lena river near Tabaga on the scale hydraulic model and in 20-meters long prismatic canal.....	417
<i>Chapter 12. Experimental studies and hydraulic modeling of emergency oil spills in rivers.....</i>	<i>419</i>
12.1. Causes of an emergency oil spills .....	419
12.2. Methods of determination ways of movement and velocities of emergency oil spills in rivers .....	420
12.3. Main features of oil behaviour in water .....	422
12.3.1. Oil on the open water surface .....	422
12.3.2. Oil under the ice cover .....	428
12.4. Main features and peculiarities of diffusion emergency oil spills in rivers.....	439
12.5. Method of hydraulic modeling of emergency oil spills in rivers.....	441
12.6. Some examples of modeling of emergency oil spills in rivers .....	443
<i>Chapter 13. Field and experimental studies of channel processes on the polomet' river .....</i>	<i>450</i>
13.1. Morphology, horizontal deformations and flow hydraulics on the free meandering sections .....	450
13.2. Studies of flood plain inundation and flood plain currents structures on the Polomet' river near Zarechije .....	452

13.3. Studies of the sand dune motion.....	453
13.4. Field studies of the channel flow macro-turbulence .....	455
13.5. Non-equilibrium processes in forming the Polomet' river channel .....	456
Conclusion.....	461
<i>Chapter 14. On the correlation of physical and mathematical modeling, physical and mathematical methods for solving problems in river hydraulics and channel processes .....</i>	<i>462</i>
Conclusion .....	478
Literature .....	484
Annexes	
Annex 1.....	505
Annex 2.....	523
Annex 3.....	528
About the authors .....	531

---

**Альберт Борисович Клавен**  
**Зураб Дмитриевич Копалиани**

Экспериментальные исследования  
и гидравлическое моделирование речных потоков и руслового процесса

Корректор *О.А. Потанина*  
Оригинал-макет *Л.А. Философова*  
Дизайн обложки *Л.А. Философова*

Подписано в печать ???..2011. Формат 70x100/16.  
Бумага офсетная. Печать офсетная  
Усл.-печ. л. 34. Тираж ?00 экз. Заказ № 2020

Издательство «Нестор-История»  
197110, СПб., Петрозаводская ул., д. 7  
Тел.: (812)235-15-86  
e-mail: nestor\_historia@list.ru  
www.rossica.su

Отпечатано в типографии «Нестор-История»  
198095, СПб., ул. Розенштейна, д. 21  
Тел.: (812)622-01-23