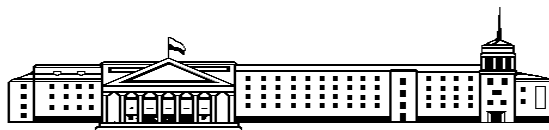


ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ВОДНЫХ КОММУНИКАЦИЙ»



ЖУРНАЛ УНИВЕРСИТЕТА ВОДНЫХ КОММУНИКАЦИЙ

Выпуск 2 (6)

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

Барышников С. О.
(главный редактор)
Решняк В. И.
(ответственный
редактор)
Гладков Г. Л.
Гарибин П. А.
Колосов М. А.
Безюков О. К.
Иванченко А. А.
Веселков В. В.
Сикарев А. А.
Пантина Т. А.
Буянова Л. Н.

Скобелева И. П.
Каратаев О. Г.
Курошева Г. М.
Голоскоков Д. П.
Нырков А. П.
Зубрилов С. П.
Попов Б. Н.
Лиходей О. А.
Ушакова Г. В.
Некрасов С. Н.
Климов Е. Н.
Посашкова С. Е.
(ответственный
секретарь)

Журнал университета водных коммуникаций. — СПб.: СПГУВК, 2010. — 208 с. (Вып. 2).

ISSN 2073-6169

Журнал является научно-образовательным периодическим изданием, зарегистрированным Федеральной службой по надзору в сфере массовых коммуникаций, связи и охраны культурного наследия (Свидетельство о регистрации средства массовой информации от 22 февраля 2008 г. ПИ № ФС77-312188).

В Журнале публикуются:

- результаты диссертационных работ, теоретических и экспериментальных исследований по направлениям научной деятельности отраслевых вузов и научно-исследовательских институтов;
- статьи методологического и методического характера по актуальным проблемам развития отечественного и зарубежного водного транспорта;
- обзорные материалы научных конференций, семинаров, совещаний по проблемам развития водного транспорта;
- материалы в области повышения эффективности образовательного процесса вуза;
- сообщения и статьи к юбилейным датам и знаменательным событиям университета и его ведущих ученых.

Журнал включен в Перечень ведущих рецензируемых журналов и изданий Высшей аттестационной комиссии Министерства образования и науки РФ.

ББК 95



© Санкт-Петербургский государственный
университет водных коммуникаций, 2010

ISSN 2073-6169

УВАЖАЕМЫЕ ЧИТАТЕЛИ!



Вашему вниманию предлагается специальный выпуск периодического научно-образовательного издания нашего вуза «Журнал университета водных коммуникаций», посвященный 100-летию со дня рождения одного из выдающихся ученых нашего университета — профессора Кирилла Владимировича Гришанина, человека, всю свою жизнь посвятившего изучению проблем гидравлики и морфологии речных русел, созданию, развитию и совершенствованию расчетного обоснования инженерных мероприятий на судоходных реках, подготовке и переподготовке профессиональных кадров для водного транспорта. К. В. Гришанин является основателем научной школы в области теории руслового процесса, члены которой продол-

жают проводить исследования руслового режима судоходных рек и с гордостью называют себя его учениками.

Широкую известность у российских и зарубежных специалистов в области речной гидравлики получили фундаментальные монографии К. В. Гришанина: «Устойчивость русел рек и каналов» (1974), «Динамика русловых потоков» (1969, 1979) и «Гидравлическое сопротивление естественных русел» (1992). Среди этих работ выделяется своей энциклопедичностью «Динамика русловых потоков», выдержавшая два издания. В этой монографии изложены основы динамики вязкой несжимаемой жидкости, вопросы турбулентности, пространственные и плановые задачи движения русловых потоков, особенности движения влекомых и взвешенных наносов, русловой процесс.

Кирилл Владимирович принимал активное участие в работе многих всесоюзных и международных научных конференций и симпозиумов, выступая с генеральными докладами. Это широко известные специалистам в области речной гидравлики всесоюзные гидрологические съезды, всесоюзные съезды по механике, международные конгрессы по судоходству, конгрессы Международной ассоциации гидравлических исследований и многие другие представительные научные форумы по речной гидротехнике.

К. В. Гришанин был признан лектором высшей квалификации: он читал лекции студентам гидротехнического факультета по четырем важным дисциплинам, таким как: гид-

рология и водные изыскания (автор учебника), динамика русловых потоков (автор учебника), механика сплошных сред (автор учебного пособия), водные пути (автор учебника). Профессор К. В. Гришанин регулярно читал лекции на Международных высших гидрологических курсах, проводимых под эгидой ЮНЕСКО при МГУ им. М. В. Ломоносова, на факультетах и курсах повышения квалификации инженерно-технических работников речного флота; консультировал специалистов-путейцев, аспирантов и докторантов, в том числе иностранных.

К. В. Гришанин разработал много учебно-методических пособий для студентов, которые до настоящего времени широко используются при выполнении курсовых и дипломных проектов. За время работы в институте К. В. Гришанин принял участие в подготовке более 4 тыс. специалистов-инженеров не только для Российской Федерации, но и для многих стран Восточной Европы, Юго-Восточной Азии, Ближнего и Дальнего Востока, Африки и Центральной Америки. Под его руководством защитили кандидатские диссертации 10 человек, из них два специалиста стали докторами наук.

Научную и педагогическую деятельность профессор Гришанин успешно сочетал с общественной работой в институте и общественных организациях. Он избирался депутатом Ленинградского городского совета (1967–1969) и председателем Правления общества «Знание» Кировского района г. Ленинграда (1970–1976). В 1977–1990 гг. К. В. Гришанин был председателем секции «Русловые процессы» Научного совета «Комплексное использование и охрана водных ресурсов» Государственного комитета при совете Министров СССР по науке и технике (1977–1990), активно участвовал в работе 2 докторских специализированных советов, длительное время работал в качестве референта реферативного журнала «Механика».

В 1994 г. Гришанин был избран почетным профессором Чунцинского университета коммуникаций КНР, а в 1998 г. ему было присвоено почетное звание «Заслуженный деятель науки РФ». В разные годы он избирался почетным академиком Российской академии транспорта и Российской академии естественных наук, а также академиком Академии проблем водохозяйственных наук по отделению «Русловедение и восстановление элементов речной сети»; был членом президиума Координационного совета по проблеме эрозионных, русловых и устьевых процессов при МГУ им. М. В. Ломоносова.

8–9 апреля 2009 г. в связи с юбилеем профессора К. В. Гришанина в университете состоялась Международная научная конференция, посвященная 100-летию со дня его рождения. В эти дни в стенах родного вуза собрались ученики профессора Гришанина, почитатели его таланта, коллеги и научные последователи. С докладами выступили научные сотрудники и специалисты из Государственного гидрологического института, Московского государственного университета, Института водных проблем РАН, Санкт-Петербургского государственного гидрометеорологического университета, Арктического и Антарктического научно-исследовательского института, а также представители отраслевых вузов и других российских и зарубежных научно-исследовательских институтов и организаций.

На состоявшейся конференции были заслушаны многочисленные доклады, содержащие биографические сведения о жизни и творчестве профессора К. В. Гришанина, сделаны сообщения о научном вкладе Гришанина в развитие теории руслового процесса и ее практических приложений, а также были представлены новые научные результаты теоретических, экспериментальных и натурных исследований в области речной гидравлики.

Основные материалы научных докладов юбилейной конференции публикуются в данном выпуске Журнала.

*С наилучшими пожеланиями к читателям,
редактор выпуска,
профессор Г. Л. Гладков*

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ ЖУРНАЛА

1. *ИСАЕВА Анна Андреевна* — заместитель директора Департамента государственной политики в области морского и речного транспорта Минтранса России, кандидат экономических наук, доцент.
 2. *ГУСМА Станислав* — ректор Морского университета (Щецин, Польша), доктор наук, профессор.
 3. *ЕГОРОВ Геннадий Вячеславович* — генеральный директор ЗАО «Морское инженерное бюро — СПб», доктор технических наук, профессор.
 4. *КАРМАЗИНОВ Феликс Владимирович* — доктор технических наук, профессор, лауреат Государственной премии России, почетный гражданин Санкт-Петербурга.
 5. *ЮСУПОВ Рафаэль Мидхатович* — директор Санкт-Петербургского института информатики и автоматизации РАН, доктор технических наук, профессор, член-корреспондент РАН, заслуженный деятель науки и техники РФ.
 6. *СМИРНОВ Николай Григорьевич* — президент Ассоциации судоходных компаний, кандидат технических наук.
-
-



**МЕЖДУНАРОДНАЯ
НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ**

ВОДНЫЙ ТРАНСПОРТ РОССИИ: ИННОВАЦИОННЫЙ ПУТЬ развития



**Санкт-Петербург
6–7 октября 2010 г.**

С условиями участия в конференции можно ознакомиться на сайте
www.spbuwc.ru

СОДЕРЖАНИЕ

1. Сنيщенко Б. Ф. К. В. Гришанин и учение о динамике русловых потоков	10
2. Гладков Г. Л. Теоретические основы расчетного обоснования путевых мероприятий на судоходных реках	18
3. Чалов Р. С. Многолетний и сезонный режимы перекатов и их учет при проведении путевых работ на судоходных реках	31
4. Клавен А. Б., Коковин В. Н. Макроструктура скоростного поля потока и формы движения русловых наносов	46
5. Беркович К. М. Направленные антропогенные деформации русел равнинных рек	52
6. Дебольский В. К., Дебольская Е. И., Масликова О. Я. Модель деформаций дна в нижнем бьефе гидроузла с учетом ледовых затруднений	55
7. Барышников С. О. Влияние остаточного общего перегиба и остаточных напряжений на общую прочность корпуса	58
8. Антроповский В. И. Критериальные характеристики и фоновые прогнозы переформирования русел рек	68
9. Сидорчук А. Ю. Метод малых возмущений в теории руслового процесса	71
10. Копалиани З. Д., Жук М. М. К проблеме оценки стока руслового материала в реках	74
11. Барышников Н. Б., Пагин А. О. Гидравлическое сопротивление речных русел	90
12. Замышляев В. И. Гидродинамические модели устойчивости и плановых переформирований речных русел и пути их развития	94
13. Москаль А. В. Деятельность К. В. Гришанина по созданию численных моделей движения речного потока применительно к задачам путевого хозяйства на речном транспорте	101
14. Беликов В. В., Борисова Н. М., Гладков Г. Л. Математическая модель транспорта наносов для расчета заносимости дноуглубительных прорезей и русловых карьеров	105
15. Пискун А. А. Гидравлические расчеты элементов водного режима Обско-Тазовской устьевой области	114
16. Месерлянс Г. Г., Башкова Н. М. Деформации русла р. Невы	117
17. Ребковец А. В. Улучшение судоходных условий и обеспечение безопасных условий плавания на Саралевском водном узле на реке Волге	128

18. Чеботарев А. С. Лабораторные исследования закономерностей формирования гранулометрического состава донных отложений в речных излучинах	132
19. Католикова Н. И. Морфометрические закономерности развития излучин на нижней Кубани	144
20. Барышников Н. Б., Пагин А. О. Донные наносы и их влияние на условия судоходства	152
21. Антроповский В. И., Шелухина О. А. Некоторые итоги оценки экологического состояния и гидроморфологических характеристик рек левобережья средней Волги	158
22. Зимичев В. П. Оценка режима твердого стока на малоизученных речных бассейнах Центрального Таймыра	164
23. Боровков С. В. Инженерное регулирование русла реки Иртыш в районе г. Ханты-Мансийска	167
24. Гончаров О. И. Анализ влияния интенсивности землечерпания и водности навигации на поддержание транзитных глубин	171
25. Гапеев А. М., Кононов В. В. Использование водной энергии до изобретения гидравлических турбин	180
26. Кириллов В. М., Романов П. Л. Сравнение отечественных и европейских методик расчета больверков	190
27. Котляков А. В., Шумакова Е. М., Артемьев С. А. Методика расчета береговых деформаций в нижнем бьефе ГЭС с учетом вибрационной нагрузки гидроузла	194
28. Шестова М. В. Методы расчетной оценки русловых деформаций на участках рек	197
29. Зимичев В. П., Большиянов Д. Ю. Условия судоходства через лимитирующие бары в устьях арктических рек (Обь, Хатанга, Колыма)	200
30. Кхарел Б. Заиление оросительных каналов и истирание гидроагрегатов гидроэлектростанций в горных регионах	203

К. В. ГРИШАНИН И УЧЕНИЕ О ДИНАМИКЕ РУСЛОВЫХ ПОТОКОВ

K. V. GRISHANIN AND HIS DOCTRINE ON DYNAMICS OF STREAMS FLOW

Данная статья была подготовлена автором еще при жизни Кирилла Владимировича Гришанина. Учитывая огромный интерес специалистов в области речной гидравлики к научному наследию профессора К. В. Гришанина, а также то, что до настоящего времени эти материалы не были опубликованы в полном объеме, представляется уместным довести ее содержание до читателей Журнала университета водных коммуникаций.

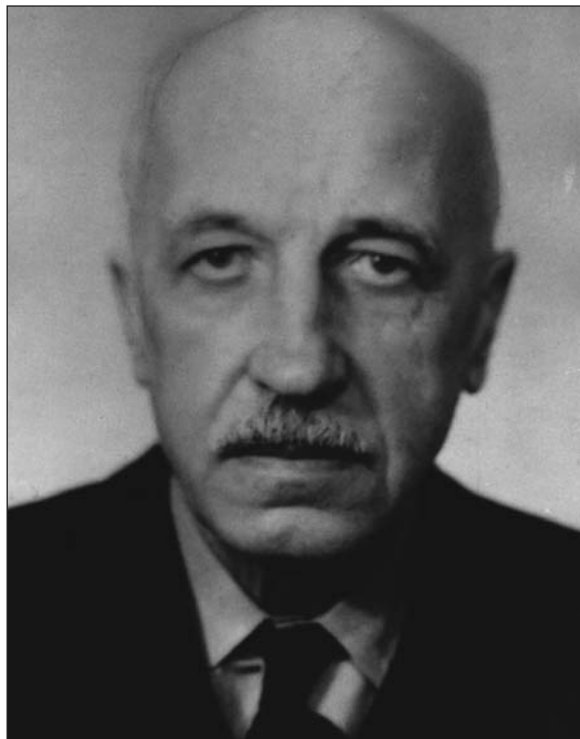
The article was written by the author during the life of Kiril Vladimirovich Grishanin. Taking into account a great interest of specialists in river hydraulics to the science heritage of professor Grishanin and also the fact that up to the present time these materials were not published in corpore it seems appropriate to familiarize the readers of the journal of the University of waterway communications with the article.

Ключевые слова: поток, река, русловой процесс, гидравлика, перекал, турбулентность, шероховатость, скорость, гидравлический уклон, наносы, устойчивость русел.

Key words: flow, river, fluviomorphological process, hydraulics, rift, turbulence, roughness, velocity, hydraulic slope, sediment, channels stability.

КИРИЛЛ ВЛАДИМИРОВИЧ ГРИШАНИН родился 8 апреля 1909 г. в Петербурге в семье русских интеллигентов. Закончив в 1926 г. 13-ю трудовую школу, Гришанин поступил в Ленинградский государственный университет на факультет общественных наук, откуда ушел в 1930 г. в связи с женитьбой и неудовлетворенностью будущей специальностью (в школе он увлекался точными науками).

Исключительно поучителен и необычен путь К. В. Гришанина в большую науку. С 1931 г. Гришанин связал свою жизнь с речным транспортом (и был верен ему 68 лет — до последнего дня работы в Санкт-Петербургском университете водных коммуникаций), именно в этом году он пришел в проектный институт Ленгипроречтранс на должность техника-вычислителя. Без специального образования, благодаря упорнейшим самостоятельным занятиям к 1938 г. Кирилл Владимирович стал высококвалифицированным ведущим инженером-гидравликом в группе гидрологических и гидравлических расчетов, где получил богатый опыт проектирования дноуглубительных и



выправительных работ, портов и гидросооружений.

С 1937 г. Гришанин — студент-заочник Ленинградского института инженеров водного транспорта (ЛИИВТ), закончить который ему помешала война. В 1942 г. он в составе

Ленгипроречтранс переезжает в г. Сенгелей, откуда через год переводится в Уральское бассейновое управление речных путей на должность старшего инженера, а затем начальника отдела пути и исполняющего обязанности главного инженера УБУП. В 1945 г. Гришанин возвращается в Ленинград и до 1950 г. работает в Северо-Западном БУП в должности руководителя технического отдела. В 1950 г. он становится преподавателем ЛИИВТа, где на кафедре водных путей проработал в основном в должности профессора более 50 лет.

Таким образом, в преддверии официальной научно-педагогической деятельности К. В. Гришанин 19 лет отдал весьма не просто производству, если вспомнить какие это были тяжелые годы и какую ответственную работу он выполнял.

Термин «официальный» здесь не случаен. Дело в том, что К. В. Гришанин научной работой систематически стал заниматься с 1940 г., когда опубликовал в Трудах ЛИИВТа статью «К вопросу о методах учета регулирующего влияния водохранилищ». К гидрологической тематике Гришанин возвращался неоднократно: в 1948 г. в журнале «Метеорология и гидрология» была опубликована его статья «К вопросу о расчете уровня сточных озер», а в 1982 г. он в соавторстве написал учебник «Гидрология и водные изыскания».

Научные интересы К. В. Гришанина были беспредельны, безмерно число исследованных им проблем, невероятно глубок и всегда современен научный уровень их разработки. Основные научные интересы К. В. Гришанина были обозначены им уже в ранний период творчества (1940–1953) в восьми работах и кандидатской диссертации. В 1948 г. в статье «Общие формы русловых процессов» он сформулировал тогдашние взгляды на проблему и наметил некоторые основные направления исследований в области русловых процессов, которые в дальнейшем были реализованы в его фундаментальных монографиях, начиная с книги «Речной поток» (1952). В ней, по существу, в научно-популярной форме изложены основы динамики русловых потоков. В вышеупомянутых работах К. В. Гришанин наряду с закономерностями движения речного потока и

режима речных русел излагает пути использования этих закономерностей в деятельности гидротехников, путейцев и других специалистов водохозяйственного комплекса.

Эта сторона работ К. В. Гришанина — разъяснение практической сущности физических процессов, развивающихся в реках, является неотъемлемой частью всех его исследований. С другой стороны, глубокое проникновение в практику водных путей, гидротехнику и инженерную гидравлику помогало К. В. Гришанину строго научно решать крупные задачи практики. К ним относятся фундаментальные работы по расчету деформаций судоходных прорезей, выправительных трасс и сооружений, гидравлике перекаатов, пульсационному воздействию потока на элементы крепления дна за водосбросами, динамике стационарного вихря за береговыми выступами и головами полузапруд, гидравлике дельт судоходных рек севера Сибири и др. Эти работы на многие годы стали научной основой методов проектирования в русловой гидротехнике.

Анализируя состояние дел в нарождающейся динамике русловых потоков, К. В. Гришанин обратил внимание на разделы этой науки, требующие незамедлительного решения. Он часто повторял, что в процессах деформаций русла, транспорта влекомых и взвешенных наносов, образования и движения песчаных гряд, устойчивости речных русел, пульсационного воздействия на гидросооружения активной силой является турбулентный поток. Характеристикам потока, определяющим его взаимодействие с руслом, К. В. Гришанин придавал первостепенное значение. Достигнутый к рассматриваемому времени уровень разработок в этой области, особенно в теории турбулентности, оказался недостаточным для решения задач динамики русловых потоков. Поэтому основной целью своей научной деятельности К. В. Гришанин считал развитие гидромеханических, гидродинамических и гидравлических сторон в динамике русловых потоков. При этом все уравнения и зависимости этих наук, используемые в динамике русловых потоков, должны, по К. В. Гришанину, основываться на фундаментальных законах механики и физики.

К. В. Гришанин последовательно и строго придерживался этого принципа. К 1952 г. он защитил кандидатскую диссертацию «Установившееся турбулентное движение жидкости в коническом диффузоре с малым углом раскрытия», в которой исследовал явление безотрывного расширения турбулентного потока на примере движения жидкости в диффузорах. Столь, казалось бы, далекая от руслового потока тема диссертации объясняется общностью распределения скоростей по вертикали при неравномерном движении потока в диффузорах с малым углом раскрытия и движением речного потока на участках его сжатия и последующего расширения при обтекании им русловых форм и регуляционных сооружений (перекатов, участков бифуркаций, полузапруд, перемычек и др.). Тщательные экспериментальные исследования диффузоров, проведенные в ЦАГИ им. Н. Е. Жуковского, послужили надежной базой для проверки теоретических построений К. В. Гришанина: выражения для коэффициента турбулентного обмена и его распределения в живом сечении потока; логарифмического закона распределения скорости по вертикали; обобщенного коэффициента сопротивления равномерного движения; закона изменения «константы турбулентности» с углом раскрытия.

Самое любопытное и удивительное состоит в том, что диссертацию на столь сложную теоретическую тему написал Гришанин-студент. Кирилл Владимирович только в 1952 г. (когда он закончил диссертацию) получил высшее образование, окончив Ленинградский гидрометеорологический институт. Таким образом, к 1952 г. четко обозначились основные перспективные направления деятельности К. В. Гришанина. Это разработка комплекса научных проблем, составляющих предмет динамики русловых потоков: динамика вязкой жидкости, транспорт наносов, русловые процессы, гидравлические сопротивления, устойчивость русел. А также создание учебников для водно-технических вузов и техникумов и написание руководств для проектирования инженерных сооружений в русловой гидротехнике.

Второй творческий период К. В. Гришанина можно датировать 1953–1969 гг. За 16 лет

Гришаниным написано 40 работ, включая докторскую диссертацию, три учебника, три руководства по научному обоснованию проектов водно-путевых мероприятий, монографию и 33 статьи. Статьи, как правило, представляли собой отдельные разделы диссертации и будущей монографии «Динамика русловых потоков». Он придерживался правила: предварительно обсуждать в широкой печати вопросы, предназначенные для включения в свои книги. В диссертации «Квазипериодические эффекты в турбулентном движении жидкости» К. В. Гришанин предложил собственную полуэмпирическую теорию турбулентности, учитывающую крупномасштабные (первичные) турбулентные возмущения в потоке, носящие «неслучайный» квазипериодический пульсационный характер. В этой теории турбулентного движения поле осредненных скоростей связывается с масштабами длины и времени первичных турбулентных возмущений, в отличие от других полуэмпирических теорий, ограничивающихся, как правило, построением осредненных скоростных полей.

В соответствии с представлениями о вихревой структуре турбулентного потока К. В. Гришанин установил закон для коэффициента турбулентного обмена A , связывающий масштабы длины L и времени (периода) T первичных возмущений. Формулу для коэффициента обмена $\frac{A}{\rho h V_*} = S_* \frac{[L(y_i)]^2}{h^2}$, принципиально отличавшуюся от формулы Прандтля, основной зависимости полуэмпирических теорий турбулентности, построенной на учете градиента осредненной скорости и длины «пути смещения», К. В. Гришанин считал основным результатом докторской диссертации (в формуле Гришанина: ρ — плотность жидкости; h — глубина; V_* — динамическая скорость; $S_* = \frac{h}{V_* T}$ — число Струхалия; y_i — расстояние от стенки).

Важным результатом, полученным К. В. Гришаниным в теории турбулентности, являются также законы распределения осредненных скоростей в потоках разного типа: в трубах, открытых потоках, по длине пластины.

Как всегда, полученные теоретические результаты Гришанин связывает с практикой. Им рассмотрены важные в гидротехнике крупномасштабные пульсации скорости и давления на дне турбулентных потоков: пульсации давления на крепления в нижних бьефах плотин, воздействие пульсации скорости на дно потоков. Серьезный научный результат получен К. В. Гришаниным в проблеме первоначального образования песчаных гряд на дне руслового потока. Используя полученное им выражение для продольной скорости, учитывающее характеристики вихрей (интенсивность, скорость, шаг вихревой цепочки), и считая, что крупномасштабные пульсации придонной скорости обусловлены движением бесконечной цепочки вихрей, он получил (интегрируя уравнение Экснера) уравнение асимметричного профиля песчаных волн. Тем самым доказав, что характерный асимметричный профиль первоначально образующихся песчаных гряд обусловлен существованием в потоке турбулентных возмущений с вполне определенными длинами волн, составляющими в среднем 2,0–2,5 глубины потока. Это очень важный результат, подтвержденный наблюдениями в судоходных прорезях.

В заключение весьма краткого обзора диссертации К. В. Гришанина необходимо отметить, что все теоретические разработки он подтверждал экспериментальными данными, полученными мировой наукой.

В свою книгу «Динамика русловых потоков» (ДРП) К. В. Гришанин, следуя форме, установленной создателем этой дисциплины М. А. Великановым, включает три части: гидродинамику, движение наносов, русловой процесс. Однако содержание этих разделов у него было существенно иным, чем у М. А. Великанова и других ученых, исследовавших эту же проблему. Книгу К. В. Гришанина отличает глубина рассматриваемых вопросов, их органическая связь со всеми разделами монографии, обоснованность результатов отечественными и зарубежными теоретическими, экспериментальными и натурными данными (в книге использовано 289 источников), физическая интерпретация механических явлений руслового потока, практическая значимость. Решение любого вопроса — будь то

распределение скоростей в потоке, динамика стационарного водоворота, расчет русловых деформаций в прорезях — представляет по существу маленький научный шедевр.

Подтверждением тому может служить весьма изящный вывод расчетной формулы для коэффициента Шези. Исходя из принятого разделения коэффициента сопротивления на зернистую и грядовую составляющие, он отмечает, что доля каждого из них в полном сопротивлении русла неопределенна в основном из-за нерешенности вопроса о сопротивлении гряд. Формулы для грядового коэффициента Шези, где аргументами являются размеры гряд, преуменьшают сопротивления гряд и задачу о сопротивлении гряд заменяют задачей об их размерах, которую решить не легче.

Анализ зарубежных и отечественных исследований привел К. В. Гришанина к принципиальному выводу: «грядовый, а с ним и полный коэффициент Шези в потоках с песчаными донными отложениями имеет прямую связь со скоростью течения; изменение же крупности донных частиц внутри песчаной фракции ($0,1 \leq d \leq 1,0$ мм) мало влияет на размеры гряд и русловое сопротивление». В результате К. В. Гришанин приходит к выводу, что в формуле сопротивления для песчаных русел искомой величиной необходимо считать полный коэффициент Шези C , а за его главный аргумент необходимо принять скорость течения. Диаметр донных частиц в расчетную формулу К. В. Гришанин решил не вводить, а в качестве примера однозначности использовать известное отношение ширины и глубины русла B/H .

Используя энергетический спектр турбулентных пульсаций, Гришанин нашел, что линейный масштаб, определяющий порядок продольных расстояний между смежными вихрями, равен

$$\lambda_B = h \left(\frac{C^2}{g} \right)^{1/3}.$$

Сравнение масштаба λ_B (шаг вихревой цепочки) с фактическими длинами гряд l_r привело к результату $l_r = \lambda_B$. Отсюда вытекает формула для C :

$$\frac{C}{\sqrt{g}} = \left(\frac{l_r}{h} \right)^{3/2}.$$

Из нее следует, что длина гряд l_r монотонно возрастает со скоростью течения V , подтверждая тем самым прямую связь коэффициента Шези и скорости потока. Для того чтобы связь $C = f(V)$ носила общий характер, К. В. Гришанин представляет скорость в безразмерном виде. При этом скорость течения можно нормировать, составив некоторый масштаб скоростей из определяющих факторов явления. Из трех возможных масштабов: $\sqrt{gH}$, $\sqrt{gB}$ и $\sqrt[3]{gv}$, последний позволяет получить безразмерную скорость течения, не зависящую от B/H . Таким образом, Гришанин приходит к функциональной зависимости $\frac{C}{\sqrt{g}} = f\left(\frac{V}{\sqrt[3]{gv}}, \frac{B}{H}\right)$, которая была им преобразована в расчетную формулу на основании результатов 791 (!) измерения параметров на гидрологических постах семи рек, входящих в эту зависимость:

$$\frac{C}{\sqrt{g}} = 5,25 \left(\frac{V}{\sqrt[3]{gv}} \right)^{1/2} \left(\frac{H}{B} \right)^{1/6}.$$

Из расчетной формулы следует, что основной вклад в изменение коэффициента Шези вносит скорость течения. Обратная связь коэффициента Шези с относительной глубиной показывает, что при одной и той же скорости течения коэффициент C у мелких и широких потоков несколько меньше, чем у глубоких и узких. В прямолинейных плесах отношение H/B в 2–3 раза уменьшается при переходе от низких уровней к высоким, что приводит к быстрому росту коэффициента Шези с ростом уровней.

Высокий коэффициент корреляции (0,88) между параметрами расчетной зависимости позволил ему предпочесть свою формулу для песчаного грядового дна формуле Маннинга с табличными коэффициентами шероховатости. Так как прямая связь коэффициента Шези со скоростью течения ослабляет связь гидравлического уклона со скоростью, это обстоятельство рекомендуется использовать в путевой практике. К. В. Гришанин считает, что на песчаных перекатах можно

увеличивать глубины (тем самым уменьшая скорость течения), не вызывая до известного предела уменьшения уклонов, то есть не снижая кривые свободной поверхности.

«Динамика русловых потоков» К. В. Гришанина — это, безусловно, главный продукт его творчества. Она интересна многочисленным читателям как научная энциклопедия по всем отраслям знания, составляющим ДРП; собрание авторских теоретических решений; образец системного представления и логичного изложения материала прекрасным литературным языком; показатель высокого профессионализма и глубокой осведомленности автора во всех рассматриваемых вопросах.

Книга издавалась трижды (1969, 1979, 1990). В 1990 г. она вышла в виде краткого учебного пособия. Примерно 2/3 объема монографий посвящались гидродинамике и гидравлике открытого потока, а остальная часть — наносам и русловому процессу. В большей части ДРП изложены: основы динамики вязкой несжимаемой жидкости, турбулентность, пространственные и плановые задачи движения русловых потоков; в меньшей: движение влекомых и взвешенных наносов, русловой процесс.

При анализе десятков вопросов, входящих в эти разделы, К. В. Гришанин или давал однозначное толкование полученных в науке результатов, предлагал собственные решения, или ставил четкие задачи дальнейших исследований. Среди решений К. В. Гришанина можно отметить: законы распределения скоростей в разных потоках, обоснование логарифмического закона распределения скоростей, теорию донного движения в стационарном вихре, метод построения плана течений на перекате (метод фрагментов), формулу для коэффициента Шези, формулу для расхода влекомых наносов, формулу для определения скорости потока в устойчивом канале и многие другие.

К. В. Гришаниным в ДРП введены новые разделы, например «Подобие и устойчивость речных русел». Им разработана теория подобия естественных потоков на устойчивых участках их русел. Основным результатом теории сводится к существованию для устойчи-

вых прямолинейных участков естественных русел инварианта подобия M — безразмерной величины, остающейся неизменной при всех наполнениях меженного русла:

$$\frac{h(gB)^{1/4}}{Q^{1/2}} = M = \text{const} \approx 0,9,$$

где h — средняя глубина в живом сечении потока, B — ширина потока, Q — расход воды. Это уравнение рассматривается им как условие устойчивости подвижного русла, а M как коэффициент устойчивости.

Так как к рассматриваемым потокам применима формула Шези, то, сопоставив ее с вышеприведенным уравнением, можно получить величину уклона трения

$$I \approx 1,5 \frac{gh}{C^2 B}.$$

При наличии небольшого числа измерений значение отношения пропорциональности $Q \approx h^2 (gB)^{1/2}$ может быть использовано для интерполяции и экстраполяции кривой расходов воды. Это соотношение также можно использовать для ориентировочного решения задачи о распределении расхода воды между рукавами речных разветвлений (значения h и B должны быть взяты для прямолинейных плесовых участков каждого из рукавов).

Из соотношения для M можно определить среднюю глубину прямолинейного потока (плес, неукрепленный канал):

$$h = M \frac{Q^{1/2}}{(gB)^{1/4}}.$$

Если это уравнение удовлетворяется, то такой участок потока является устойчивым, поэтому полученное уравнение К. В. Гришанин назвал уравнением устойчивости подвижного русла.

Заканчивая краткое рассмотрение второго периода творчества Гришанина, нельзя не упомянуть о его учебниках. В 1955 г. он написал учебник для техникумов «Гидравлика» (2-е изд. в 1962 г.). Эта книга до сих пор пользуется неизменным успехом у проектировщиков и работников линейных организаций речного транспорта из-за простого и ясного изложения совсем непростых вопросов динамики водных потоков и гидравлики гидросооружений.

В 1964 г. Гришанин написал (в соавторстве) учебник для вузов «Водные пути». В эти же годы он совместно с сотрудниками кафедры водных путей ЛИВТа приступил к разработке научно-методических руководств по расчетному обоснованию проектов улучшения судоходных условий на водных путях страны. В 1959 г. вышла «Методика расчета выправительных сооружений на судоходных реках», в 1961 г. — «Практическое пособие по производству выправительных работ на внутренних водных путях», в 1965 г. — «Руководство по расчету деформаций русел и прорезей на перекатах судоходных рек». Эти пособия на многие годы стали научной основой проектирования инженерных мероприятий на водных путях страны. В них использовались методы расчетов гидравлики потока и выправительных сооружений, транспорта наносов, русловых деформаций, получившие дальнейшее развитие в книгах К. В. Гришанина.

Третий, последний, период творческой деятельности К. В. Гришанина охватывает 1970–1994 гг. За эти годы Гришанин написал 28 работ: 19 статей, 4 учебника, 3 монографии, 2 руководства для проектирования мероприятий на водных путях.

В 1970–1980-е гг. в мире резко возросло количество работ по проблемам ДРП. К. В. Гришанин, свободно владеющий английским языком, считая своим долгом откликнуться на эти и отечественные публикации, предложил свою интерпретацию и решения актуальных задач. В частности, научная общественность широко обсуждала в эти годы проблему искусственных каналов, их пропускную способность и устойчивость. Именно в это время К. В. Гришанин предложил свою теорию устойчивости подвижных русел, как рек, так и неукрепленных каналов.

Сразу после выхода первого издания своей «Динамики русловых процессов» К. В. Гришанин начал готовить материал для ее переиздания. Вначале у него возникла мысль написать книгу в 2 томах, чтобы отразить в полной мере обилие новых идей. Однако для реализации этой идеи потребовался бы слишком большой промежуток времени. И он решил параллельно с подготовкой второго издания «Динамики русловых процес-

сов» выпускать отдельные, автономные монографии, посвященные специальным областям динамики русловых потоков: устойчивости русел, русловому процессу, расходу наносов, гидравлическим сопротивлениям, русловой гидродинамике.

В 1972 г. вышли «Теория руслового процесса» и «Приложение основ механики сплошной среды к анализу русловых процессов», в 1974 г. — «Устойчивость русел рек и каналов», в 1979 г. — «Динамика русловых потоков» (2-е изд.), в 1990 г. — «Основы динамики русловых потоков», в 1992 г. — «Гидравлическое сопротивление естественных русел».

Из задуманного К. В. Гришанин не успел (пока видели глаза) написать книгу о расходе наносов, именно о «расходе», а не о транспорте наносов. Он неустанно подчеркивал, что «ключевым вопросом» расчета деформаций русла для замыкания системы уравнений руслового потока (уравнения движения воды, уравнения сохранения воды, уравнения сохранения наносов) является наряду с формулой для коэффициента Шези формула расхода наносов. К. В. Гришанин «накопил» много «заготовок» для такой книги, разбросанных в его статьях и монографиях: это две формулы для расхода наносов; обоснование роли крупности ($d = 0,2 - 0,8$ мм) наносов («крупность перемещаемых частиц не может быть задана безотносительно к скорости течения и не является независимой переменной», отсюда его формула для полного расхода русловых наносов, то есть влекомых и взвешенных: $g_s = 5 \cdot 10^{-5} h V^3$, где h — глубина, а V — скорость; исследование применимости статистической формулы Г. Эйнштейна для расхода наносов в естественных потоках и многие другие).

Особое значение в творчестве К. В. Гришанина имеют его «Основы динамики русловых потоков». В этой сравнительно небольшой по объему монографии подводится, по сути, полувековой итог работы над всеми основными разделами динамики русловых потоков. Книга написана четким языком, выводы по помещенным в ней материалам носят характер постулатов, часто широких философских обобщений. Отобранные для книги материалы в наибольшей степени обоснованы теоре-

тически, подтверждены опытными данными и проверены практикой.

Несмотря на то что книга написана для студентов вузов, несомненный интерес она, конечно, представляет для научных работников.

Крайне важным в этой книге представляется «Закключение», носящее характер завещания: «...законы механики жидкостей при всей их мощи недостаточны для того, чтобы полностью объяснить поведение естественных потоков. При колебаниях стока расход воды в реке изменяется в десятки, а иногда и в сотни раз. При этом потери энергии единицей массы жидкости, совершающей свой путь в реке, остаются с небольшими отклонениями, одними и теми же. Чтобы добиться этого удивительного результата река особым, не до конца еще понятым способом меняет наполнение своего русла, скорость течения и шероховатость дна.

Можно считать установленным, что шероховатость грядового дна меняется в сторону, обратную изменению скорости течения: с ростом скорости шероховатость уменьшается. Этим путем река сглаживает колебания гидравлического сопротивления русла во времени. Между скоростью и глубиной имеется прямая связь, которая также помогает ослабить влияние неравномерности стока на движение воды в реке.

На наиболее простых участках русла (в прямолинейных плесовых лощинах) скорость течения прямо пропорциональна глубине. Благодаря этому соотношение между расходом воды и поперечными размерами русла, характеризующее безразмерным параметром M , остается при колебаниях стока неизменным.

В механике жидкости эти результаты *возможны, но не необходимы*. Они есть следствие деятельности речного потока как природной системы, прошедшей долгий путь своего становления во взаимодействии с окружающей средой и добившейся состояния динамического равновесия. Поэтому в программе работ по изучению речных потоков должно быть место для системного анализа.

Состояние равновесия, в котором находятся статистически устойчивые речные потоки, так же как состояния равновесия многих других природных систем — неорга-

нических и органических, не очень прочно. Непродуманно вмешиваясь в дела речного потока, мы можем нанести ему непоправимый вред и в конечном счете навредить сами себе. Печальных случаев этого рода уже довольно много.

С возникновения человечества реки служили для него источниками питья и пищи, путями сообщения. Они рассеивали отходы от быта и индустрии, делали возможным отдых и спорт. В настоящее время реки, кроме того, отдают человеку материал своего ложа — накопленный за тысячелетия чистый, промытый песок и гравий. Нагрузка, которую река несет, удовлетворяя потребностям людей, не должна быть чрезмерной. Чтобы не допустить перегрузки, инженер, работающий на реке, должен знать законы, которым подчиняется речной поток, внимательно следить за происходящими в нем процессами и обладать чувством ответственности перед будущими поколениями (выделено мной. — Б. С.).

Реки — одно из чудес нашей планеты, мы обязаны передать его своим потомкам неповрежденным (с. 316–318).

Кирилл Владимирович прожил счастливую жизнь. Счастье приносила работа, казалось бы, непомерная для одного человека: книги, статьи и доклады, полная нагрузка профессора, многочисленные аспиранты, руководство районным обществом «Знание», депутатские обязанности, руководство секцией ГКНТ, членство в ученых советах и т. д. и т. п.

Кирилл Владимирович установил для себя строгий режим жизни — на работу, как правило, ходил пешком, не забывал делать весьма интенсивную зарядку, летом всегда отдыхал с женой Марией Владимировной на море (конечно, до перестройки). Мария Владимировна была профессиональной пианисткой, и то ли по этой причине, то ли из-за любви к музыке Гришанины не пропускали интересные концерты в филармонии.

Кирилл Владимирович увлекался художественной литературой, литературой по философии, искусству. Выходные дни проводил, как правило, в книжных магазинах, а из командировок никогда не возвращался без книг, часто на английском языке (он любил читать в подлинниках).

Не любил Кирилл Владимирович все, что мешало ему работать; в доме у Гришаниных никогда не было телевизора, редко включали радио. Невзирая на возраст он был ненасытен ко всему новому, интересному.

В 85-летнем возрасте он уехал на стажировку в один из университетов Китая, а через год посетил Англию для совершенствования английского языка.

В этих заметках автор, конечно, не смог отразить всю мощь интеллекта К. В. Гришанина, его огромный вклад в науку и образование России. Но остается твердая уверенность, что наследники дела Кирилла Владимировича получили крепчайший фундамент для дальнейшего развития учения о русловом режиме двух с половиной миллионов рек нашей Родины.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РАСЧЕТНОГО ОБОСНОВАНИЯ ПУТЕВЫХ
МЕРОПРИЯТИЙ НА СУДОХОДНЫХ РЕКАХTHEORETICAL GROUNDS OF THE DESIGNED BASIS FOR ROUTE WORKS
ON NAVIGABLE RIVERS

Настоящая статья подготовлена к 100-летию со дня рождения профессора К. В. Гришанина. В работе нашли отражение основные научные результаты исследований, используемые в расчетном обосновании путевых мероприятий при проектировании коренного улучшения судоходных условий на свободных реках. Их основу составляют вопросы оценки потерь энергии в реках, проблемы транспорта русловых наносов и русловые деформации в реках, а также вопросы обеспечения устойчивости русел судоходных рек.

The article is written for 100th anniversary of professor K. V. Grishanin. The article presents the main scientific investigations, which are used in the designed basis of route works in projection of rivers navigability improvement. The main problems are: the evaluation of power losses in rivers, problems of sediment transport and channels deformation, ensuring channels stability in navigable rivers.

Ключевые слова: поток, река, русловой процесс, гидравлика, пережат, турбулентность, шероховатость, скорость, наносы, устойчивость русел, деформация, неразмывающая скорость.

Key words: stream, river, bed process, hydraulics, rift, turbulence, roughness, velocity, channels stability, deformation, noneroding velocity.

**Развитие учебно-методического,
нормативного и расчетного обоснования
путевых мероприятий
на судоходных реках**

В конце XIX — начале XX в. в России наблюдался подъем в развитии гидротехники свободных рек. В эти годы сформировалась целая плеяда крупных ученых и инженеров путей сообщения, в числе которых Н. Н. Жуковский, Н. С. Лелявский, В. М. Лохтин, Н. П. Пузыревский и др. Проводились крупные фундаментальные исследования гидрологии и геоморфологии судоходных рек и изучались закономерности русловых процессов в реках. На этой основе была создана отечественная наука о строительстве, реконструкции и эксплуатации внутренних водных путей. Корифеями внутренних водных путей России по праву считаются В. Е. Тимонов и В. Г. Клейбер.

В послевоенные годы Ленинградскую научную школу в области внутренних водных путей сформировали возвратившиеся из эвакуации ученые ЛИИВТа — В. М. Маккавеев,

А. И. Чекренев, К. В. Гришанин, Н. А. Семанов и ученые Государственного гидрологического института — А. В. Караушев, И. В. Попов, Н. Е. Кондратьев и Б. Ф. Сنيщенко. В группу москвичей, работавших в Центральном научно-исследовательском институте водного транспорта, входили Н. И. Маккавеев, А. С. Стариков, Н. А. Ржаницын, А. И. Лосиевский и др. В 1969 г. на географическом факультете МГУ им. М. В. Ломоносова создается Проблемная лаборатория эрозии почв и русловых процессов. Исследованиями сибирских рек в разные годы занимались известные гидротехники-русловики и гидравлики Б. А. Пышкин, А. А. Учинчус, И. И. Агроскин.

В 1939 г. Н. А. Иванов и А. И. Чекренев выпустили в свет первый учебник по водным путям «Дноуглубление, выправление, обстановка». А. И. Чекренев, длительное время заведовавший кафедрой водных путей и изысканий Ленинградского института водного транспорта, написал более десяти учебников и учебных пособий совместно с К. В. Гришаниным, В. М. Селезевым и В. В. Дегтяре-

вым. Выдающийся ученый нашего времени К. В. Гришанин подготовил известные монографии, учебники и учебные пособия по динамике русловых потоков, теории руслового процесса и гидрологии. В. В. Дегтяреву принадлежат учебники по выправлению рек и охране окружающей среды на внутреннем водном транспорте. Книги этих авторов были переведены на иностранные языки.

К. В. Гришанин широко известен как в России, так и за рубежом по своим учебникам, фундаментальным монографиям, многочисленным научным статьям, а также по нормативным и руководящим материалам по проектированию и выполнению выправительных и дноуглубительных работ на судоходных реках. Он опубликовал 8 учебников и учебных пособий, 3 монографии, 5 книг руководящих технических материалов и более 50 научных статей в отечественных и зарубежных изданиях. Монографии и учебники Гришанина содержат полученные им лично новые научные результаты, способствующие прогрессу речной гидротехники в отечественной и международной практике.

Для изучения дисциплины «Гидрология и водные изыскания» К. В. Гришанин подготовил учебник под одноименным названием [1]. В числе наиболее значимых учебных публикаций автора в области динамики русловых потоков следует особо отметить учебное пособие «Теория руслового процесса» [2], написанное Гришаниным для институтов водного транспорта. Это издание автор позднее переработал, существенно улучшив и дополнив новыми научными результатами, и опубликовал в виде учебника «Основы динамики русловых потоков» [3]. Свои учебные курсы, посвященные изучению дноуглубления, выправления и навигационного оборудования внутренних водных путей, студенты изучают по учебнику «Водные пути» [4], подготовленному совместно с профессорами В. В. Дегтяревым и В. М. Селезевым. Этот учебник стал классическим для инженеров-гидротехников, работающих в путевом хозяйстве. Он трижды переиздавался, первые два издания в 1964 и 1975 гг. были написаны в соавторстве с профессором А. И. Чекреневым.

Широкую известность у российских и зарубежных специалистов в области речной гидравлики получили фундаментальные монографии К. В. Гришанина: «Устойчивость русел рек и каналов» [5], «Динамика русловых потоков» [6] и «Гидравлическое сопротивление естественных русел» [7]. Среди этих работ выделяется своей энциклопедичностью «Динамика русловых потоков», выдержавшая два издания. В этой книге изложены основы динамики вязкой несжимаемой жидкости, вопросы турбулентности, пространственные и плановые задачи движения русловых потоков, особенности движения влекомых и взвешенных наносов, русловой процесс. При этом многие теоретические решения были доведены автором до уровня практического применения, а на их основе были разработаны многочисленные расчетные методики, успешно используемые до настоящего времени в практике проектирования и проведения путевых работ на судоходных реках.

В качестве теоретической базы расчетного обоснования путевых мероприятий на судоходных реках служат результаты исследований таких вопросов, как оценка потерь энергии в реках, проблемы транспорта русловых наносов и русловые деформации в реках, а также вопросы обеспечения устойчивости русел рек при проведении инженерных водно-транспортных мероприятий. Экспериментальную базу представляют результаты исследований в гидравлических лотках, посвященные изучению работы выправительных сооружений в потоке.

На их основе были разработаны и в настоящее время используются в расчетной практике методические рекомендации для проектирования и оценки устойчивости капитальных и эксплуатационных дноуглубительных прорезей на судоходных реках, методика определения гидравлически допустимых судоходных глубин на свободных реках, расчетные методы проектирования судоходных выправительных сооружений на водных путях и другие расчетные рекомендации.

Наряду с развитием и совершенствованием расчетного обоснования, используемого при проектировании путевых мероприятий на судоходных реках, профессор Гришанин

большое внимание уделял анализу русловых переформирований и изучению физических процессов, происходящих в реках под действием текущей воды. В практике путевых работ основной проблемой является состояние судоходных глубин в меженьный период времени на перекатах. Поэтому сезонные переформирования перекатных участков рек, их физическое обоснование и прогноз русловых деформаций всегда были объектом пристального внимания автора исследований. Анализируя материалы натурных наблюдений на реках, выполненных в ходе изучения переформирований перекатов на судоходных реках, К. В. Гришанин получил объяснение природы протекания этих процессов в речных руслах. Впоследствии эти данные были учтены при разработке рекомендаций по проведению путевых работ на судоходных реках.

Разработанные Гришаниным методы расчета вошли в состав целого ряда нормативно-методических материалов. Такие руководящие материалы, как: «Руководство по расчету деформаций русел и прорезей на перекатах судоходных рек» (1965), «Руководство по проектированию коренного улучшения судоходных условий на затруднительных участках свободных рек» (1974), «Руководство по улучшению судоходных условий на свободных реках» (1992) на многие годы стали научной основой проектирования путевых мероприятий на водных путях СССР и России.

Гидравлическое сопротивление естественных русел рек

Гидравлическое сопротивление естественных русел составляет одну из крупнейших проблем динамики русловых потоков. Современный уровень развития этой дисциплины [6] требует рассматривать речной поток и подвижное русло как единую систему, взаимодействие в которой осуществляется по принципу обратной связи. При этом поток сам создает и регулирует шероховатость своего дна. Сложность и недостаточная изученность этого вопроса существенным образом ограничивают возможности теоретического подхода к его решению. Поэтому

полученные в последние годы результаты носят в основном эмпирический или полуэмпирический характер.

Преобразования в системе «поток–русло» происходят вследствие изменения величины стока воды в реке и в результате сезонных и многолетних русловых переформирований. Они заключаются в перестройке поля скоростей течения по глубине и ширине потока, изменении уклонов свободной поверхности и характеристик турбулентности. Причем все эти изменения явно или опосредованно связаны с параметрами донных волн и условиями транспорта наносов. Значительный объем научных исследований, выполненных под руководством профессора Гришанина, был посвящен изучению характеристик донных гряд в речных руслах.

При этом наибольший интерес с точки зрения возможного практического использования представляют результаты, полученные на основе материалов натурных наблюдений на реках. Здесь прежде всего следует отметить выполненные ранее исследования Б. Ф. Сنيщенко [8], в которых на основе натурных данных была получена формула коэффициента гидравлического трения в функции параметров донных гряд. Аналогичный подход встречается и у ряда других авторов, проводивших эксперименты в гидравлических лотках. Следует заметить, однако, что величина сопротивления донных гряд в естественных условиях вследствие более сложного пространственного характера грядового дна оказывается больше, чем это имеет место в гидравлических лотках.

На основе исследования характеристик внутренней структуры турбулентного потока К. В. Гришанин получил, исходя из теоретических соображений, вывод о том, что *линейный масштаб, определяющий порядок продольных расстояний между смежными крупномасштабными вихрями*, равен величине

$$\lambda_B = h(C^2/g)^{1/3}. \quad (1)$$

С учетом установленного Б. Ф. Снищенко [9] по данным натурных наблюдений на реках и измерений в гидравлических лотках равенства шага цепочки крупномасштабных вихрей длине донных гряд $\lambda_B = l_p$, формула

полного коэффициента Шези в русле реки с грядовым дном получила вид

$$C/\sqrt{g} = (l_r/h)^{3/2}. \quad (2)$$

Физическое обоснование этой зависимости заключается в том, что основная доля потерь энергии в потоке с грядовым дном сосредоточена в вальцах, образующихся за тыловыми скатами гряд. Количество энергии, теряемой на выделенном отрезке потока, зависит не только от высоты гряд и скорости течения, но и от числа гряд на этом отрезке, то есть от длины гряд. При этом связь потерь энергии с длиной гряд обратная: потери энергии на выделенном отрезке потока, а значит, и на единице его длины тем больше, чем чаще расположены вальцы, то есть чем короче гряды.

Экспериментальные измерения в лабораторных лотках и натурные наблюдения на реках показывают, что длина гряд растет со скоростью течения. Это особенно заметно на подъеме весеннего половодья, когда возрастание скоростей течения сопровождается существенным увеличением средней длины гряд. Таким образом, скорость течения оказывает двойное влияние на потери энергии в реке с грядовым дном: увеличение скорости, с одной стороны, усиливает потери энергии в отдельных вальцах, а с другой — уменьшая число вальцов, способствует снижению потерь энергии. Поэтому связь потерь энергии со скоростью течения в потоке с грядами оказывается более слабой, чем в потоке с безгрядовым дном.

Полученные данные свидетельствуют о том, что при равномерном или близком к равномерному движению воды в реках с песчаными донными отложениями коэффициент Шези является функцией скорости течения. Этот принципиальный вывод К. В. Гришанин подтвердил по материалам натурных наблюдений на реках. Анализ гидрометрических данных, относящихся к равнинным рекам России с песчаным дном, показал, что между полным коэффициентом Шези и средней скоростью течения в этих реках существует соотношение пропорциональности в виде $C \sim v^m$, где $m = (1/2) \div (3/4)$. Отсюда с учетом формулы Шези выражение для уклона трения записывается в виде $I_f \sim v^{2(1-m)}$. Результаты этих

исследований были доведены Гришаниным до уровня практической реализации в виде расчетных зависимостей для коэффициента Шези, построенных в функции скорости течения воды.

На ранних этапах исследований автор [10] использовал в качестве аргумента коэффициента Шези величину коэффициента подвижности М. А. Великанова. Это позволило получить расчетную зависимость в виде

$$C/\sqrt{g} = 2,1 (U/\sqrt{gd_{50}})^{3/4}, \quad (3)$$

где d_{50} — медианный диаметр частиц донных отложений.

Эта формула позволяет аналитически описать эффект взаимодействия потока и подвижного русла реки с песчаным дном. Однако позднее сам автор признавал, что использование параметра $U/\sqrt{gd_{50}}$ в качестве единственного аргумента потерь энергии по длине в реках с грядовым дном является недостаточным.

Анализируя материалы гидрометрических измерений на реках с песчаным руслом [11], К. В. Гришанин установил, что в области значений коэффициента Шези $C < 50 \text{ м}^{1/2}/\text{с}$, которая охватывает большинство равнинных рек России, более 90 % потерь энергии по длине обусловлено сопротивлением грядового рельефа дна. Это связано с тем, что в реках с песчаными грунтами доля зернистой шероховатости существенно меньше, чем в реках с гравийно-галечным дном. При этом размеры донных гряд в песчаных руслах рек слабо зависят от изменения крупности донных отложений, а речной поток в этом случае оказывается в состоянии регулировать шероховатость своего дна практически во всем диапазоне изменения величины стока в течение года.

Таким образом, уточняя полученные ранее результаты, Гришанин исключил из формулы для коэффициента Шези диаметр донных частиц, нормировав скорость течения с помощью величины гравитационного ускорения и коэффициента кинематической вязкости воды. Расчетная зависимость в этом случае получила вид

$$C/\sqrt{g} = K (U/\sqrt{gv})^{1/2}, \quad (4)$$

где v — кинематический коэффициент вязкости воды.

В работе [12] существование этой зависимости получает подтверждение по результатам измерений на гидрологических постах равнинных рек России. Коэффициент пропорциональности K для использованной выборки исходных данных изменялся в пределах от 2,04 до 2,90.

Впоследствии Гришанину удалось повысить тесноту связи коэффициента Шези в зависимости от скорости течения путем введения дополнительного безразмерного параметра в виде B/H . Расчетная формула для коэффициента Шези была построена на основе анализа материалов гидрометрических наблюдений на семи реках России. Всего было использовано 725 измерений на девяти постоянных гидрометрических створах, что позволило получить по этим данным формулу полного коэффициента Шези в виде

$$C/\sqrt{g} = 5,25 \cdot (U/\sqrt[3]{gv})^{1/2} (H/B)^{1/6}. \quad (5)$$

Коэффициент корреляции ($r = 0,88$) в этой формуле оказался достаточно высоким для расчетной зависимости, полученной по данным натурных наблюдений на реках.

Это направление исследований под руководством профессора Гришанина получило дальнейшее развитие на кафедре водных путей и водных изысканий, где на основе новых материалов натурных и лабораторных измерений аналогичные взаимосвязи были установлены для других участков равнинных рек [13], где движение воды является неплавно изменяющимся. Анализ выполненных исследований показал, что из числа аргументов, определяющих гидравлическое сопротивление русел рек с песчаными донными отложениями, наиболее приоритетными являются параметры $U/\sqrt[3]{gv}$, $U/\sqrt{gH}$ и H/B . Результаты этих исследований позволили получить систему зависимостей коэффициента Шези в функции скорости течения и средней глубины потока для различных морфологических элементов русел.

При этом в глубоких плесовых лощинах рек с песчаными донными отложениями, где движение является близким к равномерному, лучшие результаты получаются по формуле $C/\sqrt{g} \sim (U/\sqrt[3]{gv})^{1/2}$. На перекатах рек при низких уровнях воды и в мелких плесовых ло-

щинах в межень влияние глубины потока усиливается, и в этом случае более тесную связь дает зависимость коэффициента Шези в функции числа Фруда: $C/\sqrt{g} \sim (U/\sqrt{gH})^{3/4}$. Речные излуины, включающие перекаты и плесовые лощины, занимают в этом случае промежуточное положение, и для них реализуются оба вида зависимостей.

В дальнейшем база данных натурных наблюдений была дополнена материалами новых измерений на реках с песчаными донными отложениями. На тот момент она включала данные наблюдений по 17 равнинным рекам России с песчаными грунтами объемом около 900 измерений. Это позволило дополнительно исследовать связь коэффициента Шези от скорости течения в зависимости от степени подвижности донных частиц речного аллювия. Анализ имеющихся материалов показал, что в области значений скоростей течения, превышающих величину размывающей скорости, отчетливо прослеживается связь коэффициента Шези с глубиной потока. В результате этого исследования было установлено, что *рекам с меньшими глубинами при одной и той же скорости течения отвечают большие значения коэффициента Шези. Причем при малых глубинах связь коэффициента Шези со скоростью оказалась сильнее, чем при больших.* На этой основе в работе [14] была получена расчетная зависимость коэффициента Шези в виде

$$C/\sqrt{g} \sim (U/\sqrt{gH})^{3/4} \left(H^3 \sqrt{g/v^2} \right)^{1/8}, \quad (6)$$

где в качестве аргументов использовались число Фруда и безразмерная глубина потока.

Анализируя полученные результаты можно отметить следующее. Разделение полного сопротивления русла на составляющие (зернистая шероховатость дна, грядовое сопротивление и сопротивление формы русла) применительно к потокам с деформируемым руслом является достаточно затруднительным и неточным, так как вклад каждой из составляющих изменяется как по длине реки, так и зависит от времени, а точнее от фазы гидрологического цикла.

Поэтому на реках с мелкозернистыми грунтами донных отложений рекомендуется использовать в расчетах зависимости, построенные на основе установленной связи полного

коэффициента Шези от скорости течения. Их применение позволит прогнозировать изменение характеристик гидравлического сопротивления с изменением уровня воды, а также оценить реакцию потока на искусственное изменение геометрии русла в результате реализации проектных мероприятий на участке реки.

Транспорт наносов в реках

Надежность русловых прогнозов, выполняемых при проектировании инженерных мероприятий на реках, определяется, с одной стороны, правильностью оценки физической природы транспорта наносов в естественных русловых потоках, с другой — качеством применяемых численных моделей. Русла большинства судоходных рек России сложены частицами несвязного грунта — песка и гравия. В инженерных расчетах, касающихся движения донных частиц и деформаций дна, основное значение имеют две характеристики частиц: их *гидравлическая крупность* и *неразрывающаяся скорость*. В расчетных рекомендациях приводятся апробированные способы их вычисления в зависимости от диаметра частиц и вязкости воды.

Наиболее широкий круг исследований в этой области был посвящен вопросам *оценки начальной устойчивости частицы* несвязного грунта на дне руслового потока. На основе многочисленных экспериментальных исследований были получены критерии, позволяющие оценить критические условия сдвига частицы грунта на дне потока.

В практике инженерных расчетов уже в течение длительного времени в качестве критериального условия начала движения однородных по крупности частиц является общепринятым использовать графическую зависимость $\tau_{*c} = f(Re_{*c})$, полученную Шильдсом [15]. Величины критических значений параметров Шильдса и числа Рейнольдса являются функциями критического значения динамической скорости v_{*c} и определяются выражениями

$$\Theta_c \equiv \tau_{*c} = \frac{\rho(v_{*c})^2}{(\rho_s - \rho)gd}, Re_{*c} = \frac{v_{*c}d}{\nu} \quad (7)$$

В качестве другого аргумента, характеризующего подвижность частиц на дне, в

литературе часто используется безразмерный диаметр частиц $D_* = (\rho^1 g / \nu^2)^{1/3} d$. В работе Л. ван Рейна [16] график Шильдса в переменных $\Theta_c = f(D_*)$ описывается набором из пяти расчетных зависимостей. Данные критериальные зависимости прошли проверку при решении практических задач. Представляется, однако, завышенным принятое Шильдсом значение $\Theta_c = 0,055$ в области квадратичного сопротивления. На это неоднократно впоследствии обращали внимание целый ряд исследователей.

В России наиболее крупное экспериментальное исследование в этой области было проведено В. С. Кнорозом [17]. В ходе экспериментов В. С. Кнороз получил закон монотонного убывания коэффициента подвижности с ростом диаметра частиц и описал его тремя линейными зависимостями, соответственно для областей гидравлически гладкого, переходного и квадратичного законов сопротивления. В квадратичной области при $D_* > 25$ значение коэффициента подвижности получилось равным $\Theta_c = 0,0262$. Анализ экспериментальных данных В. С. Кнороза [18] показал, что установленная им связь коэффициента подвижности от безразмерного диаметра частиц D_* (автор использовал аргумент Re_{*c}) может быть описана расчетной зависимостью следующего вида:

$$\sqrt{\Theta_c} = 0,16 \frac{D_* + 1,3}{D_* - 0,72} \quad (8)$$

В естественных условиях обычно приходится иметь дело с неоднородными по крупности частицами. Поэтому при решении практических задач приведенные выше критериальные зависимости, характеризующие условия начала трогания частиц несвязного материала, приходится корректировать. При этом разные авторы прибегают к различным приемам.

И. В. Егiazаров [19], используя логарифмический закон распределения скоростей течения в придонном слое, установил зависимость относительной величины коэффициента подвижности для i -й фракции грунта, нормированного его средним значением, от соответствующей относительной величины диаметра частиц. Данная зависимость получила

экспериментальную проверку по материалам исследований. Она подтверждает известные представления о том, что подвижность более мелких частиц в смеси уменьшается в связи с их «затенением» более крупными частицами и, наоборот, вероятность сдвига крупных частиц в смеси выше, чем в случае однородных частиц того же диаметра. Впоследствии эта связь уточнялась рядом авторов. Следствием проявления этого эффекта в реках (в литературе он получил название *hiding/exposure-factor*) является сортировка частиц по крупности на дне.

Экспериментальные данные показывают, что расход наносов в реке прямо пропорционален отношению скорости течения воды к неразмывающей скорости в третьей степени, то есть реализуется зависимость вида $q_s \sim (v/v_{\text{нр}})^3$. С учетом этих данных, а также в результате обработки материалов наблюдений за деформациями русла и параметрами движения донных гряд на нескольких участках больших равнинных рек России, сложенных средним и мелким песком (при относительной зернистой шероховатости $d/h < 5 \cdot 10^{-4}$), К. В. Гришанин получил расчетную формулу расхода влекомых наносов в виде

$$q_s = 0,015(v/v_{\text{нр}})^3 d (v - v_{\text{нр}}). \quad (9)$$

Значение неразмывающей скорости $v_{\text{нр}}$ здесь рекомендуется вычислять по формуле В. Н. Гончарова (1938).

Другая расчетная формула была получена К. В. Гришаниным применительно к вычислению полного расхода наносов в реках. Проанализировав данные, полученные другими исследователями, и опираясь на большой объем натурных наблюдений на реках, он предложил простую по своей структуре формулу расхода наносов в виде

$$q_s = 5 \cdot 10^{-5} H U^3, \quad (10)$$

применимую для подвижных песчаных русел. Возможный диапазон ее использования в расчетной практике ограничивается пределами изменения глубин потока H в реках от 2,0 до 5,0 м, а диапазон изменения диаметров частиц донных отложений d ограничивается песчаной фракцией от 0,1 до 1,0 мм. В этих условиях при относительно однородных грунтах приведенная расчетная формула дает вполне

приемлемые для практических целей результаты вычислений.

Понимая сложность проблемы моделирования транспорта наносов в реках, К. В. Гришанин в этом вопросе не ограничивался материалами собственных исследований, а успешно применял в научной работе и практической деятельности современные результаты отечественных и зарубежных авторов. По результатам теоретического анализа и опытной проверки по натурным данным профессором Гришаниным рекомендованы для использования две группы расчетных формул расхода влекомых наносов на безгрядовом дне. К первой из них отнесены формулы детерминистического типа, такие как формула А. Шильдса (1936), Э. Мейер-Петера и Р. Мюллера (1948), Л. ван Рейна (1984) и ряд других расчетных формул расхода наносов. Во второй группе формул представлены вероятностные зависимости, такие как известная формула Эйштейна (1942, 1950) и формула К. Б. Брауна (1950), полученная для влекомых мелкозернистых наносов. Для вычисления полного расхода рекомендуется применять формулы Р. А. Бэгнольда (1966), Энгелунда (1967) и Графа-Акароглу (1968).

Выполненный анализ результатов исследований по оценке устойчивости частиц неоднородного несвязного материала на дне реки показал, что в общем случае задача моделирования транспорта руслового аллювия под действием текущей воды является достаточно сложной. Вследствие этого до настоящего времени было получено множество различных формул расхода наносов, которые часто не согласуются между собой и при использовании дают расхождения в десятки и сотни процентов. Проблема в данном случае заключается в необходимости разработки модели транспорта наносов, адекватно описывающей физические процессы, происходящие на дне реки в ходе русловых переформирований.

Дальнейшие исследования, выполненные под руководством профессора Гришанина на кафедре водных путей и водных изысканий, позволили получить новые данные и расчетные рекомендации по вопросу модели-

Обеспечение устойчивости
речных русел

рования транспорта разнотернистых наносов в реках. В работе [20] была выполнена верификация 30 различных моделей транспорта наносов по натурным данным. Тестирование формул расхода наносов осуществлялось на основе выборки данных натурных измерений, выполненных на 41 гидрометрическом створе по 29 различным рекам ряда бывших республик СССР, России и Германии с различной крупностью донных отложений. Всего на данном этапе выборка исходных данных включала в себя 296 измерений. Гидравлические и морфометрические характеристики в пределах выборки изменялись в достаточно широком диапазоне. Результаты выполненного исследования в общих чертах заключаются в следующем.

На основе проведенного анализа в дальнейшем рекомендуется развивать три основные модели, опирающиеся на исходные формулы Мейер-Петера и Мюллера (1948), Эйнтштейна (1950) и Л. ван Рейна (1984) с учетом их возможной модификации на основе результатов исследований Рибберинка (1987), Б. Зенгена (1991, 1996), В. С. Кнороза (1958) и Г. Л. Гладкова (1996). В таком сочетании указанные модели дают лучшие результаты при их верификации по данным натурных наблюдений на реках в широком диапазоне изменения гидравлических и морфометрических параметров.

Выполненные расчеты показали, что при переходе от расчета по среднему диаметру к пофракционному расчету качество моделирования повышается. Это свидетельствует о том, что используемые рекомендации для учета *ripple*-фактора и *hiding*-эффекта являются корректными; модели для их учета не противоречат общей методике вычисления и физически обоснованы. При этом результаты вычислений практически не зависят от методики обработки исходных данных, в равной мере могут быть использованы как арифметические средние, так и геометрические средние оценки фракционного состава.

На этой основе были получены обоснованные рекомендации по моделированию транспорта разнотернистых наносов в реках для их использования в расчетной практике.

Большая группа исследований характеристик движения воды и транспорта наносов в реках посвящена вопросам *переформирования русел рек* под действием текущей воды. С точки зрения практических приложений прогноз русловых переформирований оказывается чрезвычайно важным при проектировании инженерных мероприятий на реках. Для оценки интенсивности изменения различных морфологических элементов русла в ходе естественных переформирований К. В. Гришанин предложил понятие *временной устойчивости*. При этом под устойчивостью в данном случае понимается недеформируемость отдельного участка русла в течение ограниченного периода времени. Это позволило ему сформулировать условия подобия течения на устойчивых участках естественных русел рек.

Естественный русловый поток с деформируемым дном является устойчивым, если статистические характеристики его основных гидравлических и морфометрических показателей остаются неизменными в течение определенного времени. Для достижения такого состояния система «поток–русло» реализует широкий спектр имеющихся в ее арсенале возможностей. Применительно к прямолинейным и слабоизогнутым плесовым лощинам равнинных рек Гришанин получил универсальное выражение для *локального инварианта подобия* в виде

$$M = H(gB)^{1/4} / Q^{1/2}. \quad (11)$$

Это позволило установить однозначную связь между геометрическими размерами речного русла — его шириной B по зеркалу воды и средней глубиной H — с величиной расхода воды Q в реке. Данная зависимость является общей аналитической основой всех однозначных кривых расходов, где параметр M является *постоянной квазиравномерного движения*. Значение этого параметра, полученное по материалам гидрометрических измерений на устойчивых участках рек с мелкозернистыми донными отложениями, незначительно варьирует около своей средней величины $M \approx 0,9$ при переходе от одной плесовой лощины к

другой и не зависит от колебания уровней воды в реке. На участках рек, где соблюдается это равенство, можно говорить о *соблюдении условия устойчивости русел, шероховатость которых создается и регулируется протекающими в них потоками*. На этой основе Гришанин разработал рекомендации по определению размеров устойчивых каналов в несвязных грунтах.

В общем случае К. В. Гришаниным были сформулированы три условия статистической устойчивости естественных речных потоков, которые он назвал соответственно:

— *условием скоростей течения* $U_1 < U < U_2$;

— *условием ускорений* $\int_0^L \frac{\partial U^2}{\partial l} dl \approx 0$; (12)

— *условием потерь энергии* $\frac{\partial}{\partial t} \int_0^L I_f dl \approx 0$,

где U — средняя скорость течения; U_1 и U_2 — соответственно ее нижний и верхний пределы; L — длина участка; I_f — уклон трения.

В соответствии с *условием скоростей* русловой поток, находящийся в устойчивом состоянии, поддерживает средние скорости течения в достаточно узком диапазоне. При этом нижняя граница скорости течения является критической величиной, при которой частицы донного материала приходят в движение. При достижении верхней границы происходит массовое взвешивание частиц грунта на дне потока. Внутри указанных пределов русловой поток регулирует условия движения воды и характеристики транспорта наносов, используя имеющиеся в его распоряжении степени свободы — изменяя гидравлические и морфометрические характеристики потока и русла. Число степеней свободы, в пределах которых осуществляется регулирование характеристик протекания процесса в естественных условиях, может быть достаточно большим.

К ним относятся такие возможности, как сортировка частиц грунта по крупности, включая образование отмостки на дне реки, способность руслового потока изменять параметры микроформ, и соответственно характеристики гидравлического сопротивления и транспорта наносов. Сюда можно отнести

также взаимодействие руслового и подруслового потоков, обмен между транзитными и руслоформирующими наносами, размыв берегов, сезонные деформации перекатов и др. Все это внешние проявления реакции потока на естественные или искусственные изменения условий функционирования системы «поток–подвижное русло».

Условие ускорений заключается в том, что прямолинейные потоки с деформируемым дном оказываются неустойчивыми по отношению к возмущениям с большими длинами волн. Ответная реакция потока на эти возмущения проявляется в образовании мезоформ по длине реки. Таким образом, русловой поток преобразует прямолинейное русло к извилистому, в котором с определенным шагом чередуются перекаты и плесовые ложины. Система переходит от менее устойчивого состояния к более устойчивому. При этом конвективные ускорения по длине реки становятся знакопеременными, в результате чего исключается возможность проявления однонаправленных деформаций на протяженных участках рек.

Третье выражение в системе (12) представляет собой *условие потерь энергии*. Оно характеризует слабую изменчивость уклонов свободной поверхности при колебании величины жидкого стока в реке. Русловой поток создает русло с такими размерами и формами, которые приспособлены для пропускания расходов воды в широком диапазоне их изменения. При этом уклоны свободной поверхности и отметки уровней воды при колебаниях расходов воды в реке изменяются в минимальных пределах.

Перечисленные условия устойчивости речных русел были получены на основе многолетнего опыта изучения руслового процесса и гидроморфологии русел рек. При отсутствии антропогенного воздействия они позволяют установить статистически устойчивые характеристики потока и русла на конкретном участке реки, выявить основную направленность и тенденции развития руслового процесса в естественном состоянии речного русла. Для того чтобы понять, как происходят эти изменения в реке и какой механизм для этого используется, необходимо изучать внутреннюю структуру турбулентного взвесенесущего потока.

Вторжение в естественный ход развития руслового процесса, вызванное проведением инженерных мероприятий на реках, приводит к нарушению устойчивости русла. В зависимости от степени и продолжительности воздействия происходящие вследствие этого изменения характеристик руслового потока могут получить внешние проявления.

Обеспечить устойчивость русла в случае инженерного вмешательства — значит установить такую допустимую степень влияния на русловый процесс, при которой условия функционирования системы «поток–подвижное русло» останутся без заметного изменения, а реакция потока на искусственные мероприятия в русле реки не затронет определяющих факторов руслового процесса. Результаты выполненных исследований, а также опубликованные данные других авторов свидетельствуют о том, что в подавляющем большинстве случаев ответная реакция потока в результате вмешательства в естественный ход развития руслового процесса направлена в сторону восстановления устойчивости. При этом процесс восстановления, как правило, развивается по законам релаксации.

В начальный момент времени изменения происходят интенсивно на низших структурных уровнях руслового потока и затрагивают участок ограниченного протяжения. Впоследствии интенсивность развития процесса снижается, однако изменения получают распространение по длине реки. С течением времени система «поток–русло» стабилизируется. При этом полного восстановления гидравлических и морфометрических характеристик потока и русла на исходном уровне не достигается. Это значит, что изменения в русле реки, происходящие вследствие антропогенного вмешательства, со временем будут проявляться на более высоких структурных уровнях и в зависимости от степени воздействия станут оказывать влияние на все элементы экосистемы.

Изложенные материалы характеризуют необходимые условия устойчивости русловых потоков, находящихся в естественном состоянии. Для обеспечения устойчивости в условиях антропогенного воздействия на русловый процесс комплекс критериев статистической

устойчивости (12) должен быть дополнен, исходя из соображений достаточности. При этом нужно иметь в виду, что при определенной степени воздействия, пока действует условие скоростей, поток будет в состоянии реагировать на происходящие изменения. Однако система «поток–русло» в данном случае будет находиться уже в состоянии восстановления, отличном от исходного устойчивого состояния. Однородность гидрологического ряда при этом может быть нарушена.

Инженерные мероприятия на реках, связанные с извлечением аллювия из русловых карьеров, могут служить в качестве пусковых механизмов для развития необратимых эрозионных процессов. Понижение отметок дна вследствие эрозионного врезания русла приводит к снижению меженных уровней воды со всеми вытекающими отсюда неблагоприятными экологическими последствиями. Поэтому для обеспечения устойчивости русел судоходных рек в условиях антропогенного воздействия проектируемых водно-транспортных мероприятий автор сформулировал следующие выражения:

$$\begin{aligned} I' / I &\approx 1, \\ \int_0^L \frac{\partial q_s}{\partial l} dl &\approx 0. \end{aligned} \quad (13)$$

Первое выражение в (13) устанавливает необходимость сохранения уровней воды при проектировании инженерных мероприятий в русле реки; второе обуславливает необходимость сохранить условия твердого стока на участке в зоне влияния проводимых мероприятий.

Таким образом, совместное выполнение (12) и (13) создает необходимые и достаточные условия для обеспечения статистической устойчивости речных русел при инженерном вмешательстве в естественный ход развития руслового процесса.

До настоящего времени в динамике русловых потоков, за исключением отдельных частных решений, нет аппарата для математического описания плановых деформаций русел. Для практических нужд гидроморфологическая теория руслового процесса предлагает систему морфометрических и гидравлично-морфометрических зависимостей, опре-

деляющих условия устойчивости руслового потока на уровнях мезоформ и макроформ при разных типах руслового процесса. Общий критерий типа руслового процесса, по Б. Ф. Снищенко [21], записывается в виде

$$A = (I / I_0) \cdot (B_0 / B), \quad (14)$$

где соответственно I_0 и B_0 — уклон дна речной долины и ее ширина; I и B — уклон реки и ее ширина в меженных бровках. Средние значения параметра A изменяются в пределах от $A = 1,97$ для рек с русловой многоруканностью до $A = 36,6$ для свободно меандрирующих речных русел.

Оценить воздействие проектируемых мероприятий на окружающую среду при условии обеспечения критериев устойчивости представляется возможным в ходе гидравлического и математического моделирования руслового процесса на участке исследований. В отдельных случаях при решении практических задач возникает необходимость получить локальную характеристику устойчивости, определяющую интенсивность руслового процесса в конкретном створе реки. Для этого используется набор известных коэффициентов и параметров. Наиболее обоснованным следует считать применение параметра К. В. Гришанина M , который устанавливает связь между расходом воды и поперечными размерами русла реки в условиях квазиравномерного движения воды и имеет универсальный характер. На практике это выражение используется в расчетном обосновании карьеров НСМ для установления типа руслового процесса, а также в качестве критериального условия, ограничивающего допустимый рост судоходных глубин на плесе при дноуглублении.

Гидравлически допустимые судоходные глубины на реках

При проектировании работ по увеличению гарантированной глубины на судоходном плесе реки необходимо предвидеть, что по мере роста глубин на перекатах в результате дноуглубления могут возникать и прогрессировать местные понижения отметок свободной поверхности. По длине реки снизу вверх снижение уровней воды будет нарастать и

приведет к неблагоприятным экологическим последствиям. При перспективном планировании габаритов пути на свободных реках такие изменения должны учитываться. Поэтому в проблеме улучшения судоходных условий важное место занимает вопрос *определения максимально возможной судоходной глубины, предельной по гидравлическим условиям потока.*

Развитие теории руслового процесса и актуальность вопросов охраны окружающей среды обусловили необходимость создания качественно нового метода расчета предельных судоходных глубин. В основу этого метода положены принципиально новые данные, полученные в результате исследования взаимодействия потока и русла в зоне влияния дноуглубительной прорези, которые заключаются в следующем.

Установленная К. В. Гришаниным зависимость коэффициента Шези в функции от скорости течения свидетельствует о том, что *в реках с подвижными донными отложениями связь между уклонами свободной поверхности и глубинами на перекатах проявляется слабее, чем в руслах с гравийно-галечным дном. Это позволяет получить на реках с подвижным дном относительно большой прирост судоходных глубин без заметного снижения бытовых (меженных) уровней воды.*

Данный вывод убедительно подтверждается результатами исследований влияния дноуглубительных работ на уровеньный режим судоходных рек с различными грунтами донных отложений. Таким образом, новые расчетные зависимости позволили не только выявить физическую природу происходящих процессов в русле реки, но и значительно повысить качество и надежность гидравлических расчетов, выполняемых в ходе оценки влияния проектируемых инженерных мероприятий на гидравлику речного потока.

Специфика морфологического строения естественных русел судоходных рек характеризуется чередованием по длине реки перекатов и плесовых лощин. Этот фактор *оказывается благоприятным с точки зрения возможного роста судоходных глубин на перекатах. Снижение уровней воды на перекате, вызванное разработкой дноуглубительной прорези,*

компенсируется в пределах вышерасположенной плесовой лощины. При этом, чем сильнее понижается уровень воды на перекате, тем сравнительно быстрее он восстанавливается в верхней плесовой лощине, а относительно более длинные и менее глубокие плесовые лощины характеризуются более высокой степенью компенсации снижения уровней воды.

На основе экспериментальных и натуральных материалов исследовалось влияние дноуглубительной прорези на кинематику потока и параметры транспорта наносов на участке ее размещения в однорукавных и разветвленных руслах. Полученные данные позволили изучить степень и характер изменений гидравлических и морфометрических характеристик потока и русла, происходящих вследствие проведения дноуглубительных работ. На основе материалов этих исследований было установлено, что на *участке разветвления русла на рукава эффект влияния прорези на гидравлику потока вследствие перераспределения расхода воды между рукавами сказывается слабее, чем в однорукавном русле.*

Эти научные результаты нашли отражение в виде соответствующих разделов расчетного обоснования в составе разработанной методики расчета гидравлически допустимых судоходных глубин на свободных реках [22]. В рамках данной методики были установлены связи между уклонами свободной поверхности и глубинами на перекатах; оценена компенсирующая роль плесовых лощин при дноуглублении; разработаны схематизированные модели для перекатных сечений и судоходного плеса в целом; учтены морфологические аспекты перекатов при дноуглублении и другие вопросы, необходимые для решения основной задачи.

Основные теоретические положения для построения этой методики, предложенные К. В. Гришаниным, заключаются в следующем.

1. В результате анализа факторов, ограничивающих возможный рост судоходных глубин на плесе, устанавливается, что неблагоприятные экологические последствия дноуглубления обусловлены в основном возможным снижением уровней воды. Поэтому в данной работе в качестве исходного условия

при достижении предельных глубин принято требование сохранить в пределах точности измерений существующие проектные уровни путевых работ на судоходном плесе.

2. Наибольшие судоходные глубины, обеспечение которых на плесе возможно без заметного снижения отметок свободной поверхности при проектном уровне путевых работ, называются гидравлически допустимыми. Максимальная величина снижения уровней воды на опорном гидрологическом посту ограничивается точностью существующих способов промеров глубин и принимается равной 0,1 м.

3. Для оценки степени устойчивости русла и способности перекатов к саморазмыву используется параметр К. В. Гришанина $M = H(gB)^{1/4}/Q^{1/2}$. По данным натурных наблюдений значения этого параметра на перекатах рек с песчаным дном составляют в межень от 0,75 до 0,40. Причем большее значение параметра M относится к сравнительно устойчивым или слабodeформируемым речным руслам, а меньшее — к сильноdeформируемым.

4. Принимаются во внимание различия законов гидравлического сопротивления в недеформируемых и деформируемых руслах. Для первых используется формула Шези–Маннинга с коэффициентом Шези, определяемым относительной зернистой шероховатостью русла (отношением d/H). Для вторых — коэффициент Шези считается функцией скорости течения.

5. В том случае, если возникает потребность увеличения глубин больше гидравлически допустимых, необходима постановка специальных изысканий и исследований и составление проекта работ с экономической и природоохранной оценками последствий такого увеличения.

Построенная на основе этих принципов методика прошла успешную апробацию при выполнении гидравлических расчетов для целого ряда судоходных участков равнинных рек России и с учетом своего дальнейшего совершенствования и развития используется в настоящее время в расчетной практике [23; 24] при составлении разделов по оценке воздействия на окружающую среду в инженерных водно-транспортных проектах.

Список литературы

1. Гришанин К. В., Сорокин Ю. И. Гидрология и водные изыскания. — М.: Транспорт, 1982. — 216 с.
2. Гришанин К. В. Теория руслового процесса. — М.: Транспорт, 1972. — 215 с.
3. Гришанин К. В. Основы динамики русловых потоков: учебник для институтов водного транспорта. — М.: Транспорт, 1990. — 320 с.
4. Гришанин К. В., Дегтярев В. В., Селезнев В. М. Водные пути: учебник для вузов. — М.: Транспорт, 1986. — 400 с.
5. Гришанин К. В. Устойчивость русел рек и каналов. — Л.: Гидрометеиздат, 1974. — 144 с.
6. Гришанин К. В. Динамика русловых потоков. — Л.: Гидрометеиздат, 1979. — 311 с.
7. Гришанин К. В. Гидравлическое сопротивление естественных русел. — СПб.: Гидрометеиздат, 1992. — 182 с.
8. Сنيщенко Б. Ф. Скоростной режим потока в судоходной прорези на реке // Тр. ЛИВТа. — 1964. — Вып. 61. — С. 52–63.
9. Снищенко Б. Ф. К расчету длины гряд в открытых потоках // Метеорология и гидрология. — 1980. — № 2. — С. 89–96.
10. Grishanin K. V. The influence of dredging on water levels and flow velocities in rivers // Bull. PIANC. — 1981. — Vol. 2, № 39.
11. Grishanin K. V. Hydraulic resistance of sand beds // Proc. Second Int. Symp. River Sedimentation, Nanjing. — 1983. — P. 234–238.
12. Гришанин К. В. Как ведет себя речной поток? // Метеорология и гидрология. — 1984. — № 9. — С. 95–100.
13. Гришанин К. В., Гладков Г. Л., Журавлев М. В. Гидравлические сопротивления в подвижных руслах // Динамика и термика рек, водохранилищ и окраинных морей. — М.: Изд-во АН СССР, 1989. — Т. 2. — С. 87–89.
14. Gladkov G. L. Hydraulic resistance in natural channels with movable bed // Proc. of the Int. Symp. East—West, North—South Enc. on the State of the art in Riv. Eng. Methods and Design Philosophies. — St. Petersburg, 1994. — Vol. 1. — P. 81–91.
15. Shields A. Anwendung der Ahnlichkeitsmechanik und der Turbulenzforschung auf die Geschiebe Bewegung // Mitt. der Preuss Versuchsanst. fur Wasserbau und Schiffbau. — Berlin, 1936. — S. 26.
16. Rijn L. C. van. Sediment transport. Part 1: Bed load transport // J. Hydr. Eng. — 1984. — Vol. 110, № 10. — P. 1431–1456.
17. Кнороз В. С. Неразмывающая скорость для несвязных грунтов и факторы, ее определяющие // Изв. ВНИИГ. — 1958. — Т. 59. — С. 62–81.
18. Гладков Г. Л. Моделирование транспорта неоднородных крупнозернистых наносов в русле реки // Сб. науч. тр. СПГУВК. — СПб.: СПГУВК, 1996. — С. 288–304.
19. Egiazaroff I. V. Calculation of nonuniform sediment concentrations // Proc. ASCE Hydr. Div. — 1965. — Vol. 91, № HY-4. — P. 225–247.
20. Gladkow G. L., Sohngen B. Modellierung des Geschiebetransports mit unterschiedlicher Korngröße in Flüssen // Mitteilungsblatt der Bundesanstalt fur Wasserbau. — Karlsruhe, 2000. — № 82. — S. 123–130.
21. Кондратьев Н. Е., Попов И. В., Снищенко Б. Ф. Основы гидроморфологической теории руслового процесса. — Л.: Гидрометеиздат, 1982. — 272 с.
22. Руководство по улучшению судоходных условий на свободных реках. — СПб.: ЛИВТ, 1992. — 312 с.
23. Гладков Г. Л., Журавлев М. В., Соколов Ю. П. Оценка воздействия на окружающую среду инженерных мероприятий на судоходных реках: учеб. пособие для вузов. — СПб.: Изд-во А. Кардакова, 2005. — 241 с.
24. Гладков Г. Л. Развитие теории и практики руслового процесса в трудах К. В. Гришанина

(к 100-летию со дня рождения) // Журнал университета водных коммуникаций. — СПб.: СПГУВК, 2009. — Вып. 1. — С. 219–229.

УДК 627.7(28)

Р. С. Чалов,
д-р географ. наук, профессор,
Московский государственный университет
им. М. В. Ломоносова

МНОГОЛЕТНИЙ И СЕЗОННЫЙ РЕЖИМЫ ПЕРЕКАТОВ И ИХ УЧЕТ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ ПУТЕВЫХ РАБОТ НА СУДОХОДНЫХ РЕКАХ¹

LONG-TERM AND SEASONAL RIFTS RATES AND THEIR REGISTRATION WHILE CARRYING OUT ROUTE WORKS ON NAVIGABLE RIVERS

На основе обобщения материалов исследований перекатов на судоходных реках России показано многообразие режимов деформаций перекатов. Выделены основные типы деформаций и определены условия, в которых они проявляются. На этой основе предложены пути оптимизации путевых работ, включая снижение затрат на их проведение, в том числе при разработке землечерпательных прорезей.

On the basis of summarizing the survey data on the navigable rivers rifts in Russia rates variety of rifts deformation is shown. The main types of deformation are marked out and conditions of their phenomenon are determined. As a result the author suggests the ways of route works optimization including their costs reduction including costs cuts of dredge cuts engineering.

Ключевые слова: перекал, деформации, переформирования, побочни, руслообразующие наносы, гидрологический режим, гряды, скорость.

Key words: rift, deformations, reformatations, point bars, bed-formation sediments, hydrological mode, rifts, velocity.

ПЕРЕКАТЫ представляют собой крупные, сложно построенные и очень динамичные формы руслового рельефа, определяющие условия эксплуатации рек как водных путей. В 1930–1960-е гг. перекатам была посвящена обширная литература, в которой рассматривались особенности их переформирования как в многолетнем, так и сезонном масштабах времени и обосновывались принципиальные схемы трассирования прорезей для обеспечения требуемых в навигацию (гарантированных) глубин [6; 8; 10; 15; 20]. Последние публикации этого периода относятся к началу 1970-х гг. [4; 13; 21].

В дальнейшем проблема перекатов отошла на второй план, поскольку с конца 1960-х и до начала 1990-х гг. акценты в исследованиях русловых процессов на судоходных реках сместилось на изучение деформаций форм самого русла (серий излучин, разветвлений) или серий перекатов без учета режима их переформирования для разработки проектов коренного улучшения водных путей.

Происшедшее с начала 1990-х гг. резкое сокращение дноуглубительных работ привело к восстановлению на реках исходной (до коренной реконструкции) морфологии русел, естественного руслового режима и бытовых глубин на перекатах. В этих условиях на первый план вновь выдвинулись задачи изучения переформирований перекатов и оптимизации

¹ Выполнено при поддержке РФФИ (проект № 09-05-00221).

путевых работ на основе выявленных особенностей их многолетнего и сезонного режима как основы для трассирования землечерпательных прорезей и варьирования плавучей и береговой обстановки для своевременного перемещения фарватера.

Цель настоящей статьи — на основе обобщения материалов исследований перекатов на судоходных реках России показать многообразие режимов их деформаций, выделить основные их типы, определить условия, в которых они проявляются, и на этой основе предложить пути оптимизации путевых работ, включая снижение затрат на их проведение, в том числе при разработке землечерпательных прорезей.

Многолетние переформирования перекатов

Смещение перекатов в пределах перекатных участков — наиболее яркое проявление многолетнего режима деформаций перекатов. Скорости смещения перекатов обычно составляют от 20–30 до 300–500 м/год в зависимости от устойчивости русла и водоносности реки [20]. Смещаясь к нижнему концу перекатного участка, они либо размываются, если русло сужается, происходит слив в русло с выклинивающейся поймы затопивших ее в половодье (паводок) осветленных вод, их побочни надвигаются на относительно стабильные перекаты, расположенные на излучинах или в узлах разветвлений русла на рукава.

На смещение перекатов и их побочней на реках еще в конце XIX в. обратил внимание Н. С. Лелявский [5]. Впоследствии сведения о динамике побочней перекатов, включая анализ условий, определяющих характер и интенсивность их смещения, приводились многими исследователями по конкретным рекам. Полноценное исследование динамики перекатов впервые выполнил Н. И. Маккавеев [6], установивший зависимость скорости смещения перекатов C_n от величины руслоформирующего расхода воды Q_ϕ и устойчивости русла L (числа Лохтина):

$$C_n = 0,05 \frac{Q_\phi}{L}.$$

Г. И. Шамов [23] трансформировал формулу Н. И. Маккавеева, заменив число Лохтина $L = \frac{d}{H}$ (здесь H — километрическое падение, м/км; d — средний диаметр частиц наносов, мм) составляющими его элементами: километрическое падение безразмерным выражением уклона I , а Q_ϕ — средним максимальным расходом воды

$$C_n = 50 \frac{Q_{\text{ср.макс}} I}{d}.$$

К. В. Гришанин [3] применил другой подход к оценке подвижности побочней перекатов, считая их функцией стока, характеристик наносов и гидравлических особенностей потока. Решая уравнения динамики русловых потоков совместно с уравнением деформации в виде

$$\frac{1}{1-\Sigma} \cdot \frac{\partial W}{\partial H} - b_p \frac{\partial z}{\partial t} = 0$$

(здесь x — продольная координата; $W = sQ$ — объемный расход наносов; s — средняя объемная концентрация влекомых и взвешенных руслообразующих наносов; Q — расход воды; $z = H - h$ — отметка дна; H — высота уровня водной поверхности; h — средняя глубина; b_p — ширина русла; Σ — коэффициент пористости русловых отложений), он получил два выражения для скорости смещения побочней:

$$\frac{dx}{dt} = \frac{m}{1-\Sigma} \cdot \frac{W}{H} \quad \text{и} \quad \frac{dx}{dt} = \frac{m}{1-\Sigma} \cdot V_{\text{пол}} \cdot s,$$

где m — показатель степени в формуле расхода наносов ($W \sim Q^m$); $V_{\text{пол}}$ — скорость течения в половодье. При этом величина скорости смещения побочней определяется в м/с. Сопоставляя результаты расчета с фактическими данными, К. В. Гришанин пересчитал последние, выраженные в м/год, на среднегодовую скорость смещения в м/сут, а затем — на продолжительность (в секундах) половодья (паводка), во время прохождения которого происходит смещение побочней. Приведенные им результаты показывают хорошую сходимость натуральных и расчетных данных.

На Выгегде и Северной Двине средние скорости смещения перекатов соответственно

равны 90–100 в 150–200 м/год число Лохтина на Северной Двине не превышает 2,8, на Вычегде колеблется от 3,4 до 5,6. В верхнем течении Оби, где устойчивость русла близка к северодвинской, скорости перемещения перекатов достигают 300 м/год. В этом случае сказывается различие в гидрологическом режиме: на Северной Двине — короткое высокое половодье и продолжительная межень, на Оби — растянутое половодье и короткая межень. На Амударье ($L < 1$, продолжительное половодье, растягивающееся почти на полгода) перекаты смещаются до 1000 м/год и более. На нижней Лене скорость перемещения перекатов обычно составляет 200–300 м/год, и только в относительно маловодных рукавах (20 % от общего расхода) — 100 м/год и менее.

Перемещающиеся перекаты характерны для неразветвленных, относительно прямолинейных или слабоизвилистых русел. На

таких участках они встречаются группами, и их побочни расположены в шахматном порядке. Побочни, смещаясь вниз по участку с пологими излучинами, увеличивают свои размеры в нижних крыльях у выпуклых берегов и уменьшаются в размерах вплоть до отторжения или размыва (с последующим восстановлением по мере смещения) у вогнутых берегов. На реках с разветвленным руслом перемещающиеся перекаты встречаются на участках незначительного протяжения между перекатами, занимающими постоянное положение на реке (например, между отдельными разветвлениями) или в рукавах. Скорости их замедляются, когда побочни располагаются у выпуклых берегов излучин, и, наоборот, растут при прохождении побочней в зонах ускорения течения. Соответственно происходит периодическое уменьшение и увеличение размеров побочней.

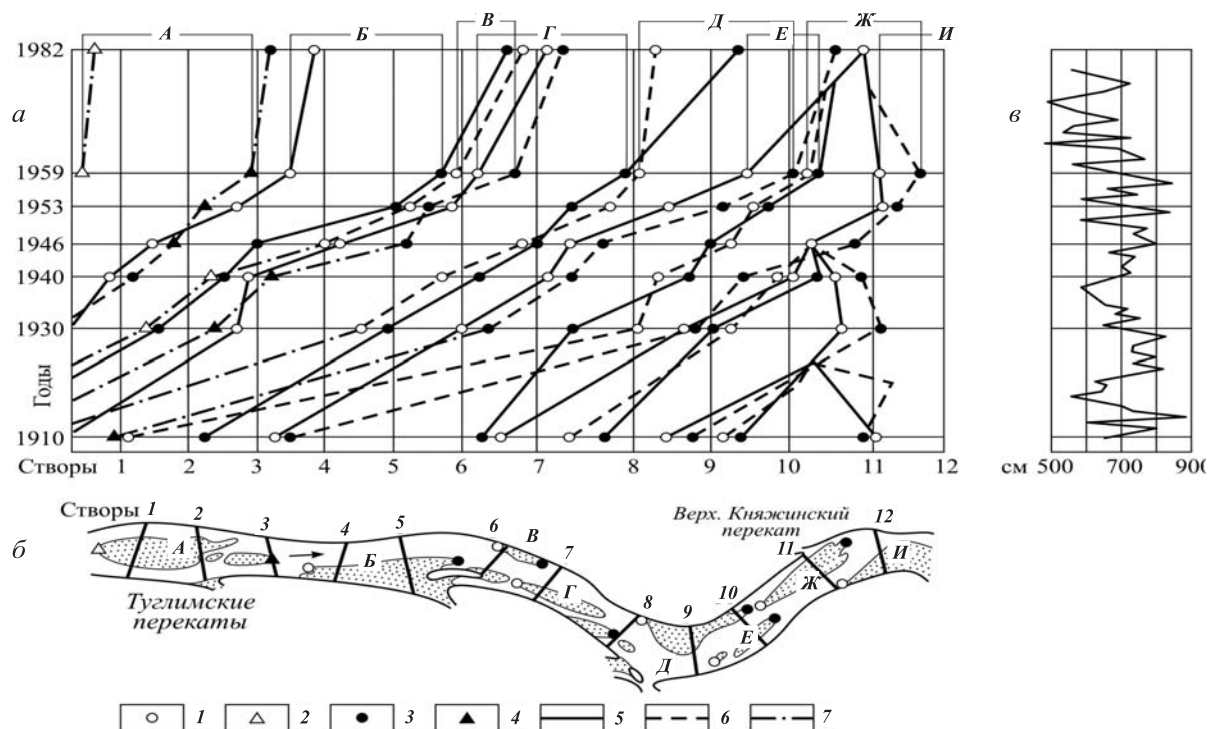


Рис. 1. Перемещение побочней перекатов на р. Вычегде (Туглимские — Верхнекняжинский перекаты):

а — график перемещения перекатов; б — план русла (по съемке 1959 г.);

в — график колебаний максимальных уровней по гидрол. посту Яренск.

1 — приверх побочня; 2 — приверх осередка; 3 — ухвостье побочня; 4 — ухвостье осередка;

5 — изменение положения правобережных побочней; 6 — то же левобережных побочней;

7 — то же осередков. Буквами обозначены побочни перекатов

Смена периодов интенсивного и замедленного смещения перекатов вниз по течению также связана с колебаниями водности рек в период половодья. Эти связи демонстрирует рис. 1, на котором представлен график смещения побочней перекатов на нижней Вычегде (Туглимского — Верхнекняженского), совмещенный с графиком колебания максимальных уровней воды на гидрологическом посту Яренск [20; 22 с доп.].

Приведенный пример достаточно типичный не только для Вычегды, но и для других рек бассейна Северной Двины, Вилюя, Оки, Дона и других рек с таким же морфодинамическим типом русла. В начале участка формируется сложный перекат с осередком, который затем примыкает к левому берегу и образует нижний побочень переката. Сформировавшийся таким образом перекат смещается вниз по течению со средней скоростью 80–90 м/год. Такие переформирования, то есть превращение осередка в побочень, происходят периодически через 20 лет вследствие чего побочни перекатов испытывают неравномерное перемещение: до 250 м/год вдоль вогнутых берегов, где они частично размываются, и около 25 м/год у выпуклых берегов, увеличиваясь в размерах. В первом случае создаются благоприятные условия для искусственного отторжения побочня и, по-существу, ликвидации переката; во втором прорези следует трассировать, используя направляющее воздействие вогнутого берега на вышележащей излучине.

Пределом развития описанной группы перекатов является стабильный перекат (Верхнекняженский). Смещаясь к нему, каждый перекат претерпевает значительные переформирования: происходит отчленение левобережного побочня, и образующийся осередок со временем причленяется к нижнему правобережному побочню у выпуклого берега излучины, увеличивая его размеры. Одновременно приближение смещающегося переката к стабильному (на крутой излучине, в узле разветвления, на подходе реки к коренному берегу) сопровождается общим снижением их скоростей. В результате происходит своеобразное «сжатие» динамической оси потока на следующих друг за другом перекатах; ра-

диусы ее кривизны уменьшаются в 2–2,5 раза, а фарватер искривляется, огибая побочни. При этом создаются благоприятные условия для естественного отторжения побочня: $l/L > 1,6$, где l — длина русла по стрежню, L — шаг побочня [7; 12], которое следует использовать при путевых работах (нередко перевод фарватера в побочневый проток может быть осуществлен без землечерпания).

Перекаты, осложненные осередками, имеют такие же динамические характеристики, но на фоне общего смещения наличие осередка обуславливает попеременное развитие то правой, то левой протоки, причем отмирание правой бывает вызвано более интенсивным смещением верхнего правобережного побочня, закупоривающего заход в нее (рис. 2).

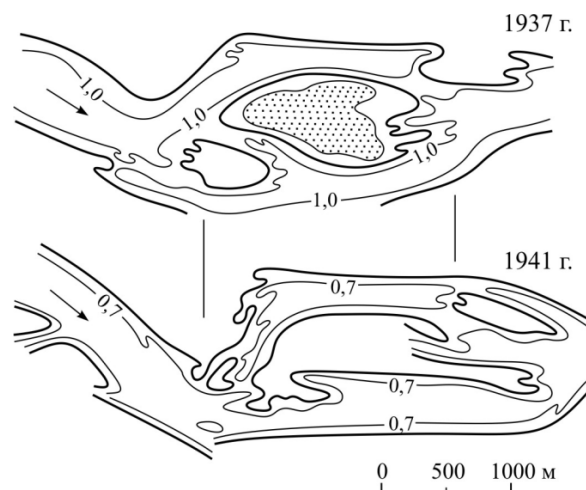


Рис. 2. Сопоставленные планы смещающегося сложного (с осередком) переката (р. Северная Двина, Верхнекорбальский перекат)

Начало развития левой протоки совпадает с приближением к нему нижнего побочня вышерасположенного переката. Одновременно выше по течению вновь формируется осередок, около которого образуется новый сложный перекат. Полный цикл таких переформирований составляет до 20 лет. За это время развиваются и отмирают последовательно обе протоки, и завершение цикла совпадает с размывом переката, оказавшегося уже на несколько километров ниже места возникновения.

Временной интервал от формирования переката в начале перекатного участка до его размыва или надвижения на относительно стабильный перекат зависит от его длины и скорости смещения побочней. На Вычегде перекатные участки имеют длину около 13 км; при средней скорости смещения 80–90 м/год каждый из перекатов проходит этот путь в течении около 150 лет. При этом образование в начале участка нового переката и надвижение переката на стабильный в вершине развитой излучины происходит в среднем через 20–30 лет. На верхней Оби циклы, связанные со смещением перекатов на участках длиной 10–12 км, продолжаются от 10 до 40–50 лет. Побочни и осередки перемещаются со скоростью до 200–500 м/год [6]. При этом на участке одновременно существует 6–8 смещающихся перекатов с шагом 1–1,5 км. На средней Оби, имеющей более устойчивое русло, смещение перекатов происходит со скоростями, в 2–3 раза меньшими. Обычно такие перекаты имеют побочни, расположенные в шахматном порядке, и перемещаются между относительно стабильными перекатами на излучинах или в узлах разветвления русла. Ниже устья Томи перекаты смещаются со скоростью 100–300 м/год, но при приближении к стабильному перекату в вершине излучины скорость смещения побочней резко уменьшается, через каждые 15–20 лет происходит обмеление русла, стрежень потока искривляется. Такая цикличность должна учитываться при планировании путевых работ.

Режим перекатов, формирующихся на неразветвленных участках, где русло проходит вдоль высокого берега, находится в зависимости от формы ведущего берега и геологического строения русла и берегов [12]. Смещаясь на участок ниже мыса коренного берега, побочень переката замедляется и растет в высоту. При этом корыто его оказывается под направляющим воздействием на поток мыса и углубляется. При дальнейшем смещении переката вниз по течению это воздействие ослабевает, поток на корыте переката распластывается, и оно мелеет. Одновременно в тыловой части побочня, вдоль коренного берега, из-за искривления протока возле него формируется побочневый проток, что еще больше способствует обмелению корыта переката.

При последовательном расположении смещающегося переката возле выступов коренного берега и у выровненных его отрезков периоды углубления корыта переката чередуются во времени с периодами его обмеления. Ниже плеча коренного берега такой перекат обычно трансформируется в крупную гряду, пересекающую русло под углом 20–30°. Огибая такую гряду, стрежень потока образует крутой изгиб. Почти одновременно у левого берега в тыловой части побочня возникает неширокий (30–70 м) побочневый проток с глубинами не более 0,5 м. Когда отношение длины изгиба к его шагу $l/L \sim 1,6$, происходит отторжение побочня, и на его месте образуется осередок, который со временем отклоняется к противоположному берегу, наращивая расположенные там отмели. Подобные циклы имеют продолжительность 9–10 лет; за это время перекат смещается вниз по течению на 2,5–4 км.

Переформирования относительно стабильных перекатов вне зависимости от их положения на реке заключаются в удлинении верхнего побочня или росте косы в его ухвостье, образовании затонской части и миграции в течение ряда лет корыта переката от верхнего побочня к нижнему и затем быстром его перемещении (за одно половодье или паводок) к верхнему в направлении наибольшего поперечного уклона водной поверхности (рис. 3).

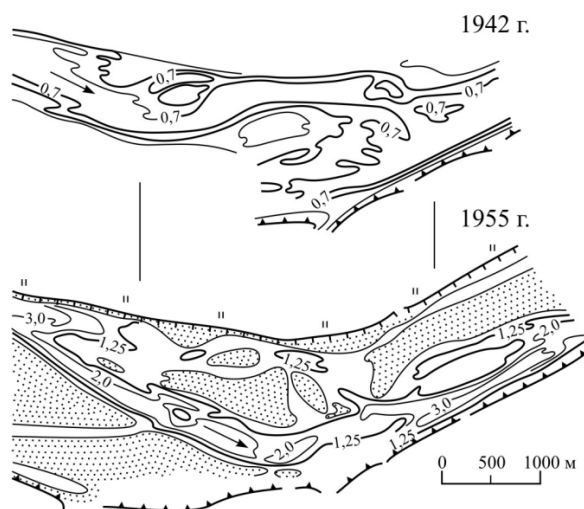


Рис. 3. Многолетние изменения положения корыта переката на Верхнетомском перекате, р. Северная Двина

Это сопровождается обмелением корыта возле нижнего побочня, усилением его подпорного воздействия на поток в верхней плесовой ложине и ростом поперечного уклона между нею и верхней частью нижней плесовой ложины или затонской частью переката. Перемещение корыта в верхнее положение, наоборот, сопровождается размывом или отторжением ухвостья верхнего побочня с образованием в последнем случае осередка, частичной или полной ликвидацией затонской части переката и объединением ее с нижней плесовой ложинкой. В этом положении на корыто переката поступает меньше наносов, и оно углубляется. Возникающий в ходе этих переформирований осередок со временем причленяется к нижнему побочню. На Северной Двине полный цикл таких переформирований составляет 5–10 лет, на Вычегде — около 20 лет. На верхней Оби он изменяется от 2–3 до нескольких десятков лет, проявляясь особенно четко у перекатов, находящихся в местных расширениях русла, в разветвлениях и на излучинах.

У перекатов при слиянии рукавов (в ухвостьях островов) продолжительность циклов составляет от 3–5 до 20–22 (в среднем 10–12) лет. Нередко наибольшие глубины наблюдаются при смещении корыта к нижнему побочню, поскольку здесь оно располагается в зоне ускорения течения на извилине динамической оси потока, огибающего побочень переката. Однако наличие затонской части, развитой в ухвостье верхнего побочня, возникающее из-за веерного расхождения струй потока на седловине переката, а также подзастружное течение в подвалье переката быстро нейтрализуют гидравлическую выгодность нижнего положения корыта.

Строгой периодичности в переформированных перекатов обычно не наблюдается, так как на рост косы влияют мощность половодья, продвижение на перекат сверху побочней и осередков, а также направляющее воздействие на поток ведущего берега непосредственно выше переката, в верхней плесовой ложине. В годы с высокими половодьями преимущественное развитие, при прочих равных условиях, получает корыто переката в нижнем положении, которому соответствует радиус кривизны

динамической оси потока; наоборот, низкие половодья благоприятствуют углублению и закреплению корыта возле верхнего побочня.

Направляющее воздействие ведущих берегов наиболее отчетливо проявляется в состоянии перекатов на меандрирующих реках. Как правило, такие перекаты характеризуются малой изменчивостью положения корыта, на которое направляется поток вогнутым берегом, и его относительно большими естественными глубинами. Такой стабильностью отличаются перекаты на малых и средних реках. На излучинах больших рек, имеющих широкое русло (до 1000 м и более), направляющее влияние ведущих берегов ослабевает, и перекаты здесь характеризуются цикличностью в своих многолетних переформированиях.

В разветвлениях русла переформирования, связанные с изменениями положения корыта переката, занимающего относительно постоянное положение, обуславливают периодический размыв и образование побочня у оголовка острова. Во время высоких половодий динамическая ось потока спрямляется и проходит вдоль или ближе к оголовку острова, где углубляется смещающееся сюда корыто переката и размывается оголовок острова. Этому способствует смещение ухвостья верхнего побочня, находящегося перед заходом в рукав, или развитие косы, закрепляющее корыто переката в нижнем положении. В маловодные годы, наоборот, корыто переката возле оголовка острова мелеет из-за увеличения кривизны динамической оси потока и отторжения части или всего верхнего побочня; динамическая ось потока и корыто переката перемещаются в верхнее положение.

Переформирования относительно стабильных перекатов связаны также с продвижением на них побочней, смещающихся с выше-расположенного участка. На перекатах в узлах разветвления обычно имеются осередок, примыкающий к оголовку острова, и побочни, находящиеся на заходе в правый и левый рукава. Продвижение на них побочней с вышележащего участка приводит к их росту и удлинению со скоростями 200–250 м/год на Северной Двине, 400–500 м/год на Оби и до 700–800 м/год на Лене. В результате происходит периодическое обмеление и развитие обоих рукавов, то есть

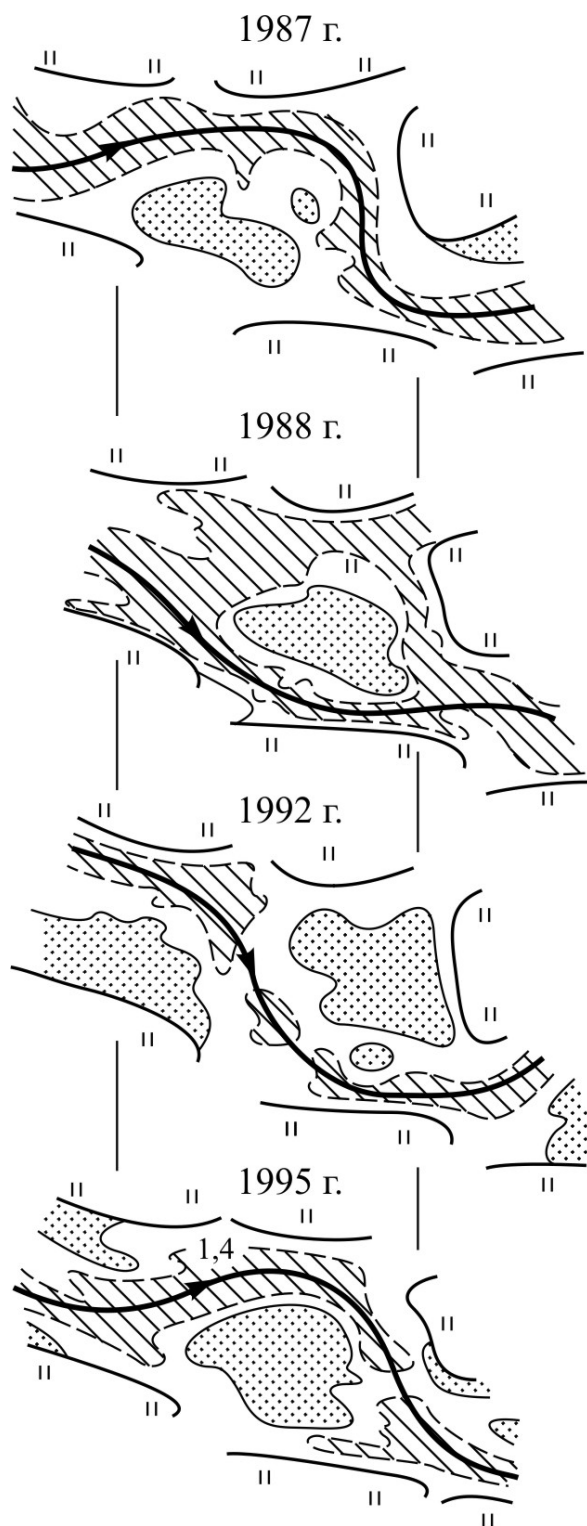


Рис. 4. Переформирование переката в узле разветвления русла (у оголовка острова), связанное с последовательным продвижением побочной на заход в основной (судоходный) рукав (Фокинский перекат на верхней Оби, [6])

многолетние переформирования перекатов в конечном счете сказываются в режиме форм русла, в данном случае — его разветвлений. Это не происходит, если надвигающийся на один рукав побочень отторгается, а образовавшийся осередок причленяется к оголовку острова, способствуя обмелению второго рукава.

Периодическое продвижение на узел разветвления побочной, смещающихся вдоль берега, со стороны которого находится заход в основной рукав, сопровождается резким искривлением динамической оси потока и смещением корыта переката в нижнее положение. При этом побочень у оголовка острова может быть полностью размыт, а судовой ход прижимается к оголовку острова. На Фокинском перекате верхней Оби (рис. 4) продвижение правобережного побочня, его отторжение, образование осередка, причленение осередка к оголовку острова совершается за 6–8 лет, после чего цикл повторяется.

На крутых вынужденных излучинах с водоворотной зоной возле вогнутого берега в ее вершине смещение побочной с вышележащего участка к выпуклому берегу приводит к общему обмелению переката, поскольку его корыто оказывается в зоне аккумуляции наносов у вогнутого берега. Если это совпадает с экстремально высокими половодьями, когда сливающиеся с поймы воды оказывают на поток в верхнем крыле излучины подпорное воздействие, обмеление переката наиболее существенно. На Таганском перекате Оби под влиянием смещающегося левобережного побочня, надвигающегося на вершину излучины, его корыто перемещается к вогнутому берегу.

Попытки перевода фарватера к вогнутому берегу оказываются безуспешным из-за быстрой заносимости прорезей. После разработки прорези у выпуклого берега судовой ход вновь расположился возле него, перекат стал глубоким. Подобная ситуация с развитием побочня в вершине излучины и обмелением переката повторялась в 1975–1982 и 1995–1998 гг.; на промежуточном этапе (1983–1995) перекат был глубоким. В целом цикл переформирования переката составляет 15–20 лет.

Режим относительно стабильных перекатов в узлах слияния основных рукавов, разделенных группой островов, определя-

ется развитием кос в устье каждого острова. Различная интенсивность развития кос, связанная с неодинаковой водностью межостровных протоков, обуславливает постепенное искривление динамической оси потока на перекате по мере ее смещения в нижнее положение; корыто переката при этом мелеет, поскольку часть потока отвлекается в затонины между косами, образующими верхний побочень. Благодаря им при руслоформирующих расходах вдоль нижней части островного массива создаются повышенные уклоны, происходит отторжение кос и объединение затонин в единую ложбину, сосредоточивающую основной расход воды на перекате. Таким образом, на перекатах в устьях рукавов сложных разветвлений в годы, когда динамическая ось потока прижимается к устьям островов, происходит ее выпрямление и углубление корыта переката; в последующем развитие кос приводит к смещению корыта переката в нижнее положение, где оно становится мелким, а стрежень потока искривляется.

Таковы переформирования Белогорских перекатов на нижней Лене, представляющих собой перекат-россыпь, охватившие с 1920-х гг. несколько этапов перемещения стрежневой зоны потока и судового хода на перевале реки от левого берега к правому. Перемещаясь в левую сторону русла, фарватер настолько искривлялся, что на отдельных изгибах оказывался ориентированным против общего направления течения (рис. 5).

Одновременно происходит естественное углубление части русла, проходящей вдоль устьев островов, куда перемещается основное течение реки. Однако вновь образующиеся косы вызывают искривление корыта переката и его общее смещение в нижнее положение. Период, когда корыто переката перемещается из верхнего положения возле устьев островов в нижнее, охватывает около 12–14 лет. Полный цикл переформирования Белогорских перекатов длится около 25–30 лет.

Аналогично развиваются перекаты в русле с чередующимися односторонними разветвлениями, образованными группами островов возле противоположных берегов.

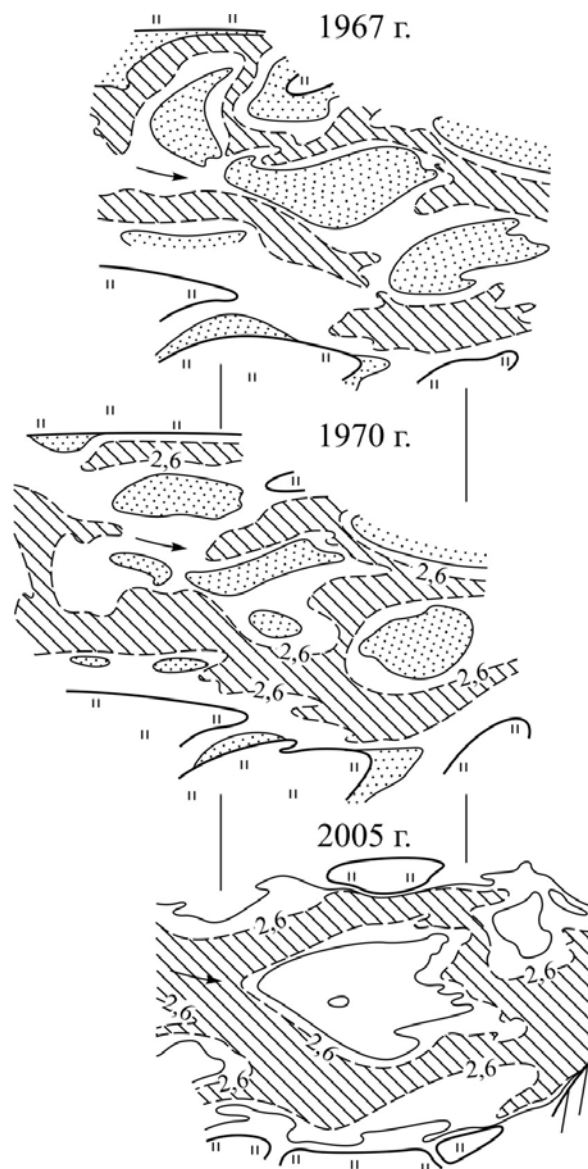


Рис. 5. Переформирования переката в узле слияния рукавов под влиянием смещения кос, развивающихся в устьях островов, расчлененных межостровными протоками (Белогорские перекаты на р. Лене)

Рассмотренные закономерности многолетних переформирований перекатов являются наиболее характерными, в той или иной мере повторяющимися при наличии специфических особенностей практически у всех перекатов. Знание их позволяет прогнозировать происходящие изменения и учитывать при трассировании прорезей, используя при этом естественные тенденции переформирований перекатов.

Сезонные переформирования перекатов

Сезонные переформирования перекатов в системе «верхний побочень—седловина—нижний побочень», накладываясь на многолетний режим перекатов, сами определяются изменениями водности реки в течение года, от одного сезона к другому.

В межень обсыхают побочни перекатов, и поток, сосредоточиваясь на седловине переката, формирует корыто — более глубокую ложбину, по которой в маловодный период на судоходных реках проходит фарватер. Во время половодья побочни затоплены, ширина водной поверхности возрастает в 1,5–2 раза, а стрежень потока часто располагается над побочнями. Происходит смещение верхнего побочня вниз по течению, его удлинение или рост косы в устье с образованием затонины на месте верхней части нижней плесовой ложины (рис. 6, а).

Корыто переката оттесняется в сторону нижнего побочня. Одновременно в подвалье переката возникает подзастружное течение, направленное от устья верхнего побочня к нижнему. Благодаря ему в этом же направлении перемещаются наносы, способствующие обмелению корыта переката по мере его смещения к нижнему побочню. В итоге между верхней плесовой ложбиной и верхней частью нижней плесовой ложины или затонской частью переката возникает поперечный уклон, наибольшие значения которого наблюдаются вдоль устья верхнего побочня. Во время осенних паводков, когда уровни воды в реке увеличиваются, в направлении наибольшего поперечного уклона водной поверхности смещается стрежень потока, происходит размыв гребня переката и здесь, возле верхнего побочня, вновь располагается корыто переката. Нередко это сопровождается отторжением устья побочня, образованием осередка на седловине переката и полной ликвидацией затонины. Если мощность потока во время паводков недостаточна, то это происходит на следующий год во время половодья. Образовавшийся осередок в дальнейшем причленяется к нижнему побочню, увеличивая его размеры.

Таким образом, на протяжении одного весенне-летне-осеннего сезона на реках

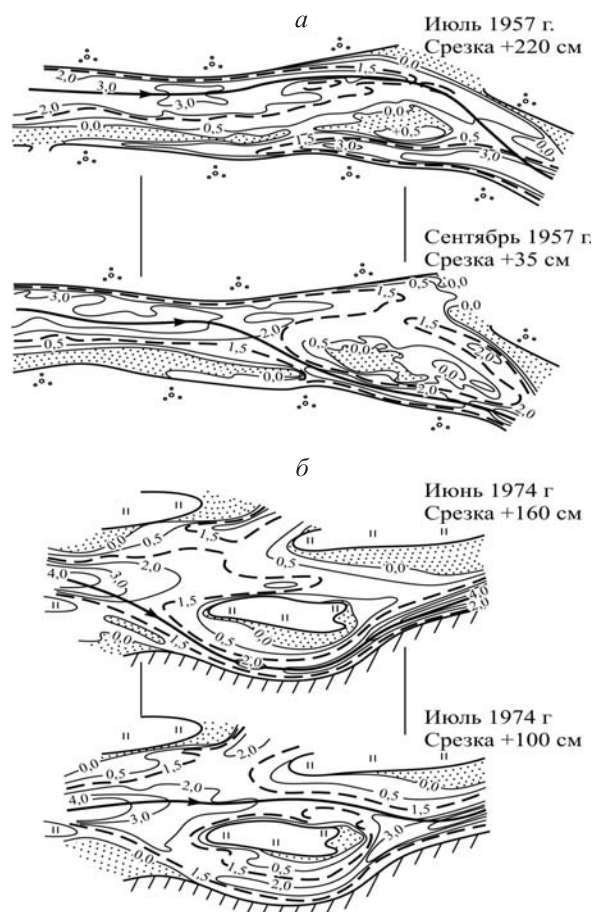


Рис. 6. Сезонные переформирования перекатов верхней Оби:

- а — смещение корыта переката от нижнего побочня к верхнему (Нижнедресвянский перекат);
б — изменение положения главного течения рукава по протокам возле элементарного острова, образующего вторичное разветвление в рукаве, вследствие смещения побочней (Кундышевский перекат)

с неустойчивым или слабоустойчивым руслом, имеющим половодье, межень и осенние паводки, сезонные деформации перекатов заключаются во внутригодовом смещении корыта переката от верхнего побочня к нижнему, а иногда и его возвращение в исходное положение (к верхнему побочню). На реках с более устойчивым руслом и соответственно меньшей интенсивностью переформирований подобные перестройки переката осуществляются в течение ряда лет и, следовательно, уже относятся к категории многолетнего режима перекатов.

На этом фоне во время летне-осенних паводков может происходить общее смещение побочней, которые надвигаются на узлы разветвлений русла, особенно вторичные в основных рукавах реки, вызывая миграцию стрежня потока («судового хода») до двух-трех раз за навигацию по протокам возле небольших островов (рис. 6, б), отторжение побочней от берегов, периодическое развитие в разные фазы режима проток возле осередков на сложных перекатах и т. д.

Наиболее характерной особенностью сезонного режима перекатов является *аккумуляция наносов (обмеление, намыв) и размыв их гребней в разные фазы водного режима*. В общей форме в половодье при руслоформирующих расходах воды происходит образование самих перекатов. На спаде половодья (паводка) и в межень поток сосредоточивается в сравнительно узкой части русла между побочнями, осуществляя размыв гребня, в котором формируется седловина, а затем и корыто переката. Однако относительная маловодность потока по сравнению с половодьем и снижение водности при переходе к межени не обеспечивают вынос всего накопившегося на перекате материала, и он сохраняется в виде мелководной перемычки между побочнями, разделяющей плесовые лощины. В среднее по высоте половодье амплитуда отметок дна на перекатах больших рек составляет 1,5–2 м, в высокие половодья достигает 3–4 м.

Интенсивность аккумуляции наносов на перекате во время половодья тем больше, чем больше сток наносов. В предельном случае, типичном для таких рек, как Амурь или Хуанхэ, повышение отметок дна Δz следует за подъемом уровней ΔH и $\Delta z = \Delta H$. На большинстве же рек $\Delta z < \Delta H$, то есть повышение отметок дна отстает от повышения уровней, хотя это и приводит на перекатах к выравниванию поверхности дна в системе «побочень–седловина–побочень», и отметки на седловине переката становятся близки к отметкам поверхности побочней. Однако полного выравнивания отметок не происходит, и побочни часто оказываются более высокими, чем седловина. При условии $\Delta z = \Delta H$ прирост глубины на гребне переката Δh с ростом высоты уровня воды H не происходит из-за ак-

кумуляции на нем наносов: при подъеме уровней воды происходит затопление побочней, вследствие чего на перекате растет площадь живого сечения, уклоны водной поверхности уменьшаются, а скорости течения соответственно оказываются меньше, чем в пределах вышележащей плесовой лощины.

На спаде половодья (паводка) и в межень ситуация на перекате меняется. При этом начинает сказываться подпорное воздействие переката [12]. Уклоны на гребне переката становятся больше, скорости течения растут, на гребне переката происходит размыв, формируется корыто переката. При этом зона размыва по мере спада уровней сокращается не только по ширине из-за снижения водности потока, но и по длине, сосредоточиваясь в узкой пригребневой части гряды (рис. 7, а).

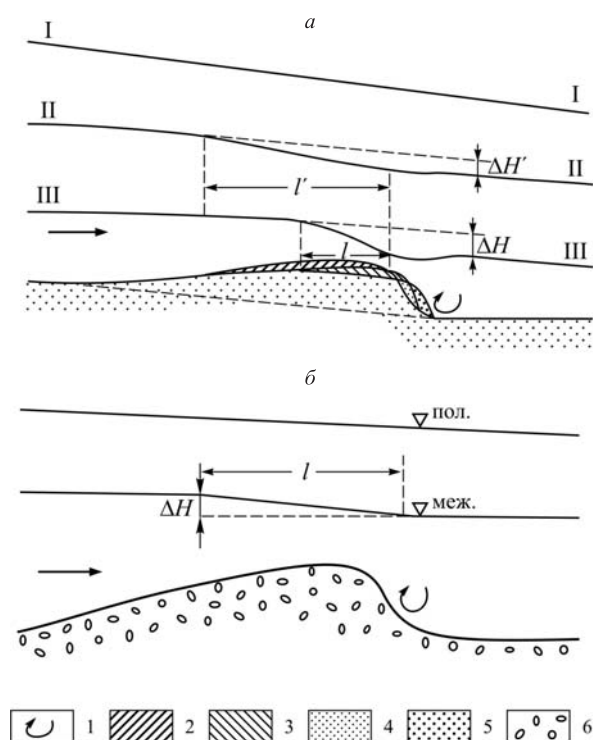


Рис. 7. Изменение продольного профиля водной поверхности на песчаном (а) и галечно-валунном (б) перекатах (I–I — половодье; II–II — спад половодья, III–III — межень, м; ΔH — перепад уровней; l — длина зоны спада уровней. I — валец в подвалье гряды; 2 — слой размыва на гребне переката на спаде половодья; 3 — то же в межень; 4 — слой аккумуляции наносов в подвалье на спаде половодья; 5 — то же в межень, б — галечно-валунные отложения

Таким образом, с уменьшением в половодье поверхностных уклонов на перекатах происходит отложение наносов. При спаде воды отложения размываются и, как правило, в межень отметка перекатов снижается [6; 8; 12]. Эта формулировка из-за типичности явления и сравнительно простого объяснения превратилась в общепризнанную схему сезонного развития перекатов, войдя в учебную литературу как единственно возможная. Однако многочисленные наблюдения, основанные на анализе регулярных планов перекатов, полученных изыскательскими партиями на водных путях, позволяют утверждать, во-первых, что во внутригодовом цикле наибольшая аккумуляция наносов (намыв) на большинстве перекатов независимо от их местоположения и многолетней динамики происходит уже во время спада половодья или паводков. На подъеме уровней и на пике половодья (паводка) рост мощности потока, его скоростей и транспортирующей способности обуславливают массовое вовлечение наносов в движение и смещение побочней.

С понижением уровней (и водности) половодья снижается транспортирующая способность потока $W_{тр}$, что обуславливает образование гряды переката и накопление (аккумуляцию) на ней наносов. Лишь в межень, а иногда и при невысоких дождевых паводках корыта перекатов размываются и углубляются, так как поток, концентрируясь в его пределах, имеет здесь повышенные уклоны. Иными словами, модель режима «перекаты намываются в половодье, размываются в межень» справедлива в обобщенном виде, осредняющем изменения за большие промежутки времени, соответствующие основным фазам водного режима (половодье в целом, межень в целом).

Во-вторых, в действительности сезонные переформирования перекатов намного разнообразнее, чем в приведенной схеме. Так еще Г. И. Шаповалов [23] по режиму аккумуляции наносов и размыва предложил выделить две группы перекатов: 1) с намывом гребня в половодье и в начале его спада, его последующим размывом, который может наблюдаться в конце спада уровней; 2) размывающиеся в течение половодья (паводка) и намываемые

в конце его спада; в дальнейшем они или размываются или продолжают медленно размываться. Неоднозначность сезонного режима перекатов отмечал Н. И. Маккавеев [8]. Позднее он разделил их по сезонному изменению глубин на три группы: 1) со стабильными и мало изменяющимися отметками; 2) размываемые в половодье (паводки) и намываемые («наращиваемые») в межень; 3) намываемые («наращиваемые») в половодье и размываемые в межень.

В-третьих, если в меженный период поток на седловине переката расплывается, то размыв корыта переката не происходит или он очень незначительный. На нижней Вычегде, например, из-за этого глубины на перекатах в межень снижаются до 0,7 м.

На реках с галечными и галечно-валунными наносами вследствие формирования на спаде уровней перекаты превращаются в практически жесткие водосливы, на которых понижение уровней воды сопровождается дополнительной их посадкой и снижением глубин (рис. 7, б). Стрежень потока избирает при этом на таких перекатах наиболее короткий путь в направлении нижней плесовой лощины, часто по нормали к оси русла. Линии тока на перекате спрямляются, здесь устанавливается максимальный продольный уклон, местные уклоны водной поверхности достигают 2,0 ‰ и более против 0,1 ‰ в плесовых лощинах, происходит местное увеличение скорости, но гребень переката при этом вдоль стрежня меженного потока не размывается, так как скорости его V_{ϕ} оказываются меньше неразмывающих $V_{н}$ для галечно-валунных наносов, слагающих отмостку [1]. Поэтому размыва гребня переката не происходит.

При подъеме уровней, когда $V_{\phi} > V_{р}$, происходит разрушение отмостки, гребень переката размывается. На пике половодья (паводка) ширина активного перемещения наносов максимальна, в предельно возможном случае охватывающая весь перекат вместе с побочнями. На нижней Катуни [14] размыв гребней галечно-валунных перекатов наблюдается уже в низкое половодье, при расходах воды 1500–1800 м³/с. При этом средние скорости течения при руслоформирующем расходе воды (1750 м³/с) составляют 2,05 м/с, макси-

мальные — 3,0 м/с, зона смещения наносов достигает 0,6–0,7 b_p . При меженных расходах (500 м³/с) скорости течения уменьшаются до 0,99 м/с, что значительно меньше неразмывающей для галечников (1,36 м/с), происходит резкая остановка наносов и обмеление перекатов. Амплитуда изменения отметок гребней перекатов от половодья к межени достигает 1,5 м.

Рассмотренные случаи определяются спецификой гидравлического режима потока, и уменьшение глубин связано не с аккумуляцией наносов (намывом), а со стабилизацией отметок дна. На песчаных перекатах с веерообразным рассредоточением потока и снижением удельных расходов воды на их седловине это сопровождается накоплением наносов, поступивших с верхового склона гряды, и повышением отметок дна в конце спада уровней и в межень.

Режим сезонных деформаций перекатов (обмеление в половодье — размыв на спаде уровней — частичное обмеление в межень и при летне-осенних паводках) характерен для верхних перекатов в каждой паре смежных перекатов в пределах перекатных участков. Иная ситуация складывается на следующем виде по течению перекате, на что впервые обратил внимание Н. И. Маккавеев. Аккумуляция наносов во время руслоформирующих расходов воды на верхнем перекате создает дефицит наносов на нижележащем, где в этот период сток наносов $W < W_{тр}$. Поэтому смежный нижележащий перекат размывается вплоть до полного его исчезновения. Однако по мере размыва верхнего переката соотношение между W и $W_{тр}$ меняется на противоположное из-за поступления сюда продуктов размыва. В итоге здесь аккумулируются наносы, поступающие с вышележащего переката, которые вновь формируют перекат, представляющий уже гряду меньшего размера между побочными двух больших макроформ руслового рельефа. Ниже по течению на следующих перекатных участках схема повторяется.

Обмеление перекатов в межень иногда наблюдается на реках с разветвленным руслом, если происходит перераспределение стока воды между рукавами от половодья к межени, особенно при выполнении рукавом

наносоотсасывающих функций. Перекаты, находящиеся на заходе в рукав, водность которого по мере понижения уровней уменьшается, мелеют; в половодье же, когда в этот рукав направляется все большая часть расхода воды, перекат размывается. Во втором рукаве имеет место противоположная тенденция, которая усиливает проявления «нормального» хода вертикальных деформаций переката: обмеление в половодье, размыв в межень.

Н. И. Маккавеев [12] отмечал размыв в половодье и аккумуляцию наносов на перекатах в межень на реках с зарегулированным стоком — естественным у рек, вытекающих из озер (Нева) или искусственным в нижних бьефах водохранилищ. Размыв перекатов в половодье и рост отметок гребней с падением уровней характерен для приплотинного участка Оби ниже Новосибирской ГЭС. Это явление наиболее четко проявлялось в первые 20 лет после сооружения плотины, особенно в многоводные годы; отметка Бугринского переката с падением уровней в многоводном 1973 г. возросла почти на 1,5 м; размыв в половодье в 1970-е гг. отмечался у перекатов на участке длиной 60–70 км ниже плотины (Чаусском, Дрегуновских и др.). Почти все дноуглубительные работы на судовом ходу здесь проводились в августе-сентябре, при меженных уровнях. В 1990-е гг. подобный режим сохранялся на ряде перекатов на участке длиной 30–40 км от гидроузла. Например, отметки Мочищенского переката в 1998 г. с падением уровней на 2,5 м возросли на 40–80 см. Размыв перекатов в половодье объясняется дефицитом наносов на приплотинном участке Оби из-за задержки наносов в водохранилище.

Перекаты, связанные с выходами в русле скал, также отличаются тем, что аккумуляция наносов на них происходит в межень, когда в наибольшей мере сказывается подпор от скальных перемычек. Их размыв происходит обычно в половодье или при уровнях низкой межени, когда перекаты превращаются в водосливы с широким порогом, на которых возникает кривая спада уровней. На Дрегуновском перекате р. Оби в половодье 1988 г. размыв дна превысил 2,5 м. В межень с падением уровней на 3 м рост отметок дна составил 0,5–2 м, но

в глубокую межень вновь начался размыв корыта переката [16].

Размыв перекатов в половодье и аккумуляция на них наносов в межень характерны для рек криолитозоны [17]. Вследствие промерзания побочной и отмельных частей русла, где лед ложится зимой на дно, во время половодья поток оказывается недонасыщенным наносами, а поток у которого $W_{тр} \gg W$, размывает только те части русла, где мерзлота отсутствует: плесовые лощины и корыта перекатов между промерзшими отмелями. Возникновению условия $W_{тр} \gg W$ способствует также малое поступление в это время наносов в реку с водосборов, в пределах которого сток воды осуществляется по еще неоттаявшим грунтам. В межень и особенно при прохождении летне-осенних паводков, когда в русле и на водосборе деятельный слой достигает наибольшей толщины, поток насыщается наносами и аккумулирует их на перекатах. Этому способствует большая кривизна извилин динамической оси потока, огибающей побочной, которая в значительной мере формируется в зимнюю межень подо льдом и отличается большой кривизной. На спаде половодья и в летнюю межень радиусы кривизны стрежня потока больше, чем у подледного потока зимой. Вследствие этого меженный поток спрямляет существующую углубленную ложбину, она оказывается вне основного течения, и в ней на корыте переката происходит аккумуляция наносов [17]. Подобные явления характерны для средней и нижней Лены, Яны, Индигирки, Колымы — рек с широкопойменным, в значительной промерзающим песчаным руслом.

Существенную роль в сезонной динамике перекатов играет движение донных гряд. К. В. Гришанин [3] придавал большое значение грядам длиной порядка ширины русла. Их образование и перемещение по перекаату обуславливает резкие колебания отметок гребней перекатов, ко-

торые происходят независимо от хода уровня. Такие различия в характере связи хода уровней и отметок дна на перекатах в разные фазы гидрологического режима связаны с особенностями движения гряд. На Днестре при высоких уровнях воды на перекатах формируются крупные гряды, длина и высота которых составляет соответственно 300–800 и 1,0–1,6 м. Скорости смещения этих гряд незначительны и на отметках дна и глубинах сказываются только в многолетнем плане. При низких уровнях в межень на дне формируются микроформы руслового рельефа длиной 15–25 м и высотой 0,3–0,7 м, скорость смещения которых составляет в среднем 0,5 м/ч. За сутки каждая гряда смещается примерно на свою длину, вызывая в каждой точке соответствующие изменения глубин. Такие гряды, перемещающиеся по верховому склону переката в направлении от верхней плесовой лощины к гребню, вызывают колебания отметок дна в пределах до 0,7 м, которые оказываются соответственно выше и ниже на 0,15–0,35 м относительно средней линии (рис. 8).

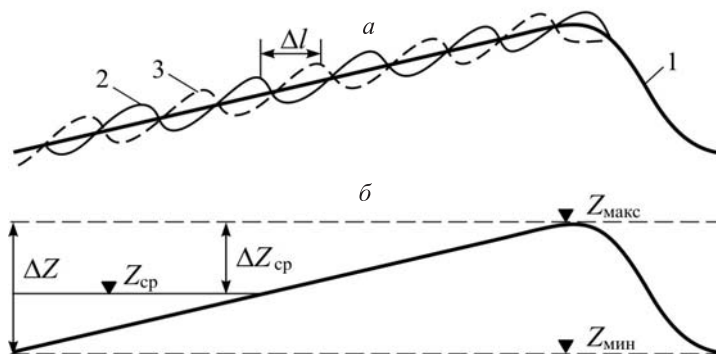


Рис. 8. Колебание отметок дна на верховом склоне переката из-за смещения гряд-микроформ (а) и амплитуда отметок дна на перекаате в пределах отдельной гряды-микроформы (б).

Отметки дна: $Z_{ср}$ — средние; $Z_{макс}$ — наибольшие;

$Z_{мин}$ — наименьшие; ΔZ — их амплитуда;

Δl — величина смещения гряды за время t .

1 — осредненный профиль переката;

2 — исходное положение гряд на перекаате;

3 — положение гряд через интервал времени Δt

Повышение по отношению к ней отметок дна создают эффект обмеления переката в межень. Колебания отметок дна вслед-

ствие формирования, перемещения и размыва гряд в разные фазы водного режима (как в половодье, так и в межень) в зависимости от формы поперечного сечения русла описал Л. А. Турыкин [18] на р. Чулыме. На перекатах с широкими побочнями в половодье гряды, перемещающиеся по верховым склонам и по гребням перекатов, вызывают повышение максимальных отметок дна на величину, равную высоте гряд, 0,2–0,4 м. С падением уровня и в межень на гребне переката скорости течения растут, гряды разрушаются и отметки дна понижаются на величину, равную высоте гряд. При прямоугольном поперечном сечении в половодье при больших скоростях течения наносы на гребне переката перемещаются в гладкой фазе и гряды-микроформы формируются при понижении уровня воды и уменьшении скоростей течения, вызывая соответствующее повышение (на 0,2–0,4 м) осредненных отметок дна. Таким образом, в половодье разрушение гряд на перекате создает эффект его размыва; в межень их формирование аналогично по своей результативности аккумуляции наносов. Естественно, что возможны случаи наложения процессов размыва/аккумуляции наносов на формирование или разрушение

гряд, усиливая, ослабляя или нейтрализуя друг друга. Это явление — повышение средних отметок гребня переката в межень из-за формирования грядовых микроформ — отметил также А. Н. Бутаков [2].

Знание закономерностей сезонных преформирований перекатов лежит в основе планирования сроков проведения землечерпательных работ на реках, эксплуатируемых как водные пути сообщения. Правильно составленный их прогноз позволяет в определенных ситуациях (перекат к межени размывается) отказаться от их выполнения и ограничиться своевременным перемещением береговых и плавучих знаков судоходной обстановки, сосредоточив внимание на перекатах, мелеющих в лимитирующий (маловодный) период. Вместе с тем обмеление перекатов в половодье еще не означает необходимость его углубления, так как уровни воды растут быстрее повышения отметок дна. Таким образом, оптимизация путевых работ связана с прогнозом сезонных деформаций перекатов. Его разработке способствует сохранение на водных путях изыскательских русловых партий, осуществляющих мониторинг состояния перекатов посредством выполнения регулярных промерно-съемочных работ.

Список литературы

1. Борсук О. А. Русловые процессы на верхнем Алдане и их учет при транспортном освоении реки / О. А. Борсук [и др.] // Эрозия почв и русловые процессы. — 1955. — Вып. 10. — С. 157–188.
2. Бутаков А. Н. Гидравлика развития мезоформ речного русла. — М.: Изд-во РУДН, 1999. — 216 с.
3. Гришанин К. В. Устойчивость русел рек и каналов. — Л.: Гидрометеиздат, 1984. — 144 с.
4. Гришанин К. В. Сезонные деформации перекатов // Тр. IV Всесоюз. гидрол. съезда. — Л.: Гидрометеиздат, 1976. — Т. 10: Русловые процессы. — С. 13–21.
5. Лебявский Н. С. Об исследованиях перемещения песчаных кос у г. Александровки // Тр. III съезда русских деятелей по водным путям в 1896 г. СПб., 1896. — Ч. 2. (Вопросы гидротехники свободных рек. — М.: Речиздат, 1948. — С. 146–156).
6. Маккавеев Н. И. Русловой режим рек и трассирование прорезей. — М.: Речиздат, 1949. — 202 с.
7. Маккавеев Н. И. Русло реки и эрозия в ее бассейне. — М.: Изд-во АН СССР, 1955. — 347 с.
8. Маккавеев Н. И., Советов В. С. Трассирование землечерпательных прорезей на перекатах равнинных рек европейской части СССР // Тр. ЦНИИ РФ. — 1940. — Вып. 3: Вопросы пути. — 60 с.

9. Михайлова Н. М. Типизация и сезонный режим перекатов Северной Двины, их влияние на условия судоходства // Эрозионные, русловые процессы и проблемы гидроэкологии. — М.: МГУ, 2004. — С. 145–152.

10. Петровский В. В., Сахарова Е. И. О переформированиях Красноборского переката (Северная Двина) // Русловые исследования для улучшения условий судоходства. — М.: Речной транспорт, 1958. — С. 19–33.

11. Попков И. Ф. Классификация перекатов // Тр. ЦНИИВТа. — 1937. — Вып. 179. — С. 5–41.

12. Проектирование судовых ходов на свободных реках // Тр. ЦНИИЭВТа. — М.: Транспорт, 1964. — Вып. 36. — 262 с.

13. Руководство по проектированию коренного улучшения судоходных условий на затруднительных участках свободных рек. — Л.: Транспорт, 1974. — 310 с.

14. Русловые процессы и водные пути на реках Обского бассейна. — Новосибирск: РИПЭЛ-плюс, 2001. — 300 с.

15. Садовский Г. Л. Пособие по трассированию землечерпательных прорезей. — М.: Речной транспорт, 1961. — 183 с.

16. Сурков В. В., Чалов Р. С. Сезонная и многолетняя цикличность в развитии перекатов верхней и средней Оби // География и природные ресурсы. — 2002. — № 4. — С. 79–85.

17. Тананаев Н. И. Сток наносов и русловые процессы на реках криолитозоны: автореф. дис. ... канд. географ. наук. — М.: МГУ, 2007. — 27 с.

18. Турыкин Л. А. Грядовой рельеф речного русла и его влияние на сезонные деформации перекатов // Геоморфология. — 1993. — № 2. — С. 82–88.

19. Турыкин Л. А., Чалов Р. С. Об оценке сезонных деформаций перекатов на реках с паводочным режимом // Метеорология и гидрология. — 1985. — № 8. — С. 77–82.

20. Чалов Р. С. Динамика перекатов и ее количественная характеристика // Вопросы географии. — М.: Географгиз, 1963. — Сб. 63. — С. 100–111.

21. Чалов Р. С. Режим перекатов на участках сопряженных разветвлений русла // Морфология речных русел и их моделирование. — М.: ГГИВОДГЕО, 1972. — С. 30–39.

22. Чалов Р. С. Географические исследования русловых процессов. — М.: Изд-во МГУ, 1979. — 232 с.

23. Шамов Г. И. Речные наносы. — Л.: Гидрометеиздат, 1959. — 380 с.

МАКРОСТРУКТУРА СКОРОСТНОГО ПОЛЯ ПОТОКА
И ФОРМЫ ДВИЖЕНИЯ РУСЛОВЫХ НАНОСОВTHE VELOCITY MACROSTRUCTURE OF THE WATER FLOW
AND MOVEMENT FORMS OF THE CHANNEL SEDIMENT

В статье рассматриваются три фрагмента из области динамики русловых потоков: три теоретических определения, сформулированные К. В. Гришаниным, в сравнении с результатами экспериментов, выполненных авторами доклада в разное время в Русловой лаборатории ГГИ.

Three theoretical propositions from dynamics of alluvial stream stated by K. V. Grishanin are considered. It's compared with results of a series experiments carried out by authors in the Channel laboratory of SHI.

Ключевые слова: русловые наносы, формы движения, турбулентность, скорости, вихри, шероховатость, речной поток, гидравлическая модель.

Key words: bed sediments, velocity shapes, turbulence, velocities, eddies, roughness, river stream, hydraulic model.



ФИЗИЧЕСКИЙ эксперимент замечателен тем, что он, с одной стороны, открывает новое в изучаемых явлениях и процессах, а с другой — дает материал для проверки правильности гипотез, теоретических построений, верности и эффективности избранного направления исследований.

Эти положения иллюстрируются в докладе рассмотрением трех фрагментов из области динамики русловых потоков, сформулированных прежде теоретически К. В. Гришаниным и подтвержденных и развитых затем экспериментально авторами доклада.

Фрагмент 1. Определяющими в турбулентной структуре руслового потока (по эффективности его воздействия на речное дно) являются большие вихри, поперечный размер которых близок или равен глубине потока и которые формируют глобальные масштабы в энергетическом спектре турбулентности.

Предположив, что период времени между прохождением через фиксированный створ двух последовательных больших вихрей дол-

жен зависеть от темпа генерации этих вихрей, то есть от интенсивности порождения турбулентности, и, кроме того, должен быть связан с размерами вихрей и, следовательно, с поперечным размером потока, а также приняв во внимание, что производство энергии турбулентности равно диссипации энергии, Гришанин получил формулу для периода больших вихрей в виде

$$T = \frac{h}{U} \left(\frac{C^2}{g} \right)^{1/3}, \quad (1)$$

а для шага больших вихрей формулу в виде

$$L = TU = h \left(\frac{C^2}{g} \right)^{1/3}, \quad (2)$$

где h — глубина потока, U — средняя скорость течения, C — коэффициент Шези, g — ускорение силы тяжести.

Отношение h/L определяет величину числа Струхала для цепочки больших вихрей руслового потока

$$Sh = \frac{h}{TU} = \left(\frac{g}{C^2} \right)^{1/3}. \quad (3)$$

При значениях коэффициента Шези C в пределах от 30 до 70 м^{0,5}/с число Sh меняется от 0,22 до 0,13, а обратная ему величина — безразмерный шаг цепочки L/h — от 4,5 до 8 [1].

Выполненные в Русловой лаборатории эксперименты с фиксацией поля актуальных скоростей методами стационарной и следящей фото- и киносъемки дали возможность непосредственно получить большие вихри в вертикальной плоскости, совмещенной с продольной осью лотка, и определить некоторые их свойства, состоящие в следующем [4–7].

1. Большие вихри заполняют поток на всю его глубину. Продольный размер их в этом случае (то есть шаг больших вихрей) составляет в среднем для условий гладкого стеклянного дна $6,7h$.

2. Большие вихри имеют асимметричную форму: крутую ветвь подъема жидкости в тыловой (обращенной против переносного течения) части и пологую ветвь опускания жидкости ко дну в лобовой части.

3. В пределах больших вихрей происходят наибольшие отклонения продольной и вертикальной компонент актуальной скорости от их средних значений, а вертикальная компонента скорости в тыловой восходящей части вихря (в условиях гладкого стеклянного дна) превышает в среднем в 1,5 раза вертикальную компоненту в лобовой нисходящей части вихря.

Серией экспериментов, выполненных авторами доклада совместно с З. Д. Копалиани, было показано влияние шероховатости дна на свойства вихрей [5]. С изменением поверхности дна от гладкого стеклянного до гравия крупностью 13–15 мм шаг больших вихрей уменьшился с 7 до $4,2h$, а максимальные значения вертикальной компоненты, отнесенной к средней скорости потока, увеличились с 0,075 до 0,15, то есть в 2 раза. При этом гидравлический уклон потока как интегральный показатель потерь энергии возрос с 0,0035 до 0,012, то есть увеличился в 3 раза.

4. Большие вихри имеют сложную внутреннюю структуру, они составлены тремя-че-

тырьмя структурными элементами меньшего размера, которые, в свою очередь, также наполнены еще меньшими элементами. Это свойство структуры турбулентного потока проявляется в непрерывности частотно-энергетических спектров.

5. Все структурные элементы потока имеют преимущественно однозначное направление вращения, совпадающее с направлением вектора градиента осредненной продольной скорости.

6. Относительно более устойчивыми элементами в общей неустойчивости турбулентной структуры оказываются большие вихри. Именно они придают внутренней нестационарности турбулентного потока квазипериодический характер. Применительно к большим вихрям получена эмпирическая зависимость, связывающая их шаг (продольный размер) с глубиной потока (с вертикальным размером). Зависимость имеет вид

$$L = kh, \quad (4)$$

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

Из формулы (4) получаем формулу для определения периода больших вихрей в виде

$$T = kh/U. \quad (5)$$

Результаты выполненных в Русловой лаборатории ГГИ экспериментов раскрыли многие детали структуры русловой макротурбулентности и вместе с тем подтвердили и в качественной форме, и в количественных показателях, и в структуре соотношений (1)–(5) теоретические построения К. В. Гришанина относительно больших вихрей руслового потока.

Практическая полезность соотношений (1)–(5) заключается, в частности, в том, что, например, определив стоя на берегу реки период вихрей (по возмущениям поверхности потока массами воды, поднимающимися из подвалов развитых гряд) и измерив каким-либо поплавком поверхностную скорость потока, из зависимостей (1) или (5), задаваясь значениями C или k , вычисляют глубину потока.

Далее из зависимостей (2) или (4) вычисляют продольный размер (или шаг) больших

вихрей. По продольному размеру больших вихрей определяют длину донных гряд, а по глубине потока, используя известные соотношения, определяют высоту гряд.

Если известен уклон потока (например, с топографической карты), то могут быть определены (с использованием формулы динамической скорости $V_* = \sqrt{ghI}$) характерные значения всех трех компонент актуальной скорости потока [7].

Вместе с тем соотношения (1)–(5) и другие установленные нами свойства больших вихрей оказались полезной и даже необходимой основой в разработке методических подходов к моделированию участков равнинных рек на деформируемых моделях.

Фрагмент 2. Н. Е. Кондратьевым выделены четыре структурных уровня взаимодействия твердой среды и речного потока: взаимодействие осуществляется на уровне отдельных частиц наносов, на уровне микроформ и мезоформ руслового рельефа и на уровне макроформ, включающих речную излучину с приуроченным к ней пойменным массивом.

Уже на элементарном структурном уровне отдельно взятой частицы сложились существенно разные представления о механизме этого взаимодействия и, в частности, о механизме выведения частиц русловых наносов из состояния покоя.

В связи с этим К. В. Гришанин писал: «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 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» [3, с. 200–201].

Этим четким определением К. В. Гришанин снял различные толкования о захвате частиц придонными вихрями, воздействии эффекта Магнуса, вертикальной компоненте мгновенной скорости и т. д.

В Русловой лаборатории ГГИ была выполнена серия экспериментов, в которых в небольшом стеклянном лотке методом кино съемки 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 кад/с. Основные характеристики экспериментов приведены в табл. 1 [10].

Многократный просмотр кинофильма в замедленном по сравнению со съемкой режиме и обработка последовательных кадров съемки привели к следующему выводу.

При малой кинетичности потока выход частиц из состояния покоя совершается преимущественно путем перекачивания, то есть под воздействием силы лобового гидродинамического давления.

При средней и большой кинетичности потока (групповое и в грядовой форме движение частиц) выход частиц из состояния покоя совершается преимущественно под воздействием вертикального силового импульса, способствующего подскоку частицы. В этом случае частицы как бы плывут в потоке вблизи дна, почти не вращаясь вокруг своего центра. Вертикальная компонента мгновенной скорости составляет в этих случаях на высоте 1–2 мм от поверхности дна (с которого и подсакивают частицы) не более 4 см/с, в то время как гидравлическая скорость подсакивающих частиц песка крупностью 1,0–1,25 мм составляет около 10–12 см/с.

Таблица 1

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

Фрагмент 3. Возникновение и развитие микроформ руслового рельефа обычно связывается с воздействием макротурбулентности на деформируемое дно. Но ведь макротурбулентность — это довольно широкая полоса непрерывного спектра пульсаций. Как же эта полоса производит на дне формы вполне определенной, устойчивой длины?

Обсуждая разработки по этой проблеме Д. Картрайта, Дж. Ф. Кеннеди, А. Рейнольдса и Ф. Энгелунда, К. В. Гришанин делает следующий вывод, который он начинает вопросом: «...каким образом непрерывный, широкий спектр турбулентных пульсаций приводит к образованию квазипериодических донных волн? Ответ, который мы теперь имеем, гово-

рит, что в силу специфических свойств системы “поток–русло” эта система по-разному реагирует на возмущения с разной длиной волн — эта система обладает избирательной способностью» [3, с. 221].

Эксперименты, выполненные в Русловой лаборатории ГГИ, обнаружили вполне конкретное взаимодействие нестационарного турбулентного руслового потока с подрусловой водой, заключенной в порах грунта, слагающего дно русла. Оно проявляется в передаче пульсаций скорости и давления из придонной зоны руслового потока в зернистую толщу с подрусловой водой. Но демпфирующим действием грунта эта передача осуществляется с некоторой утратой амплитуды и некоторым

запаздыванием по фазе (фазовым сдвигом Δt). При некоторых скорости течения, глубине потока и крупности грунта фазовый сдвиг может составить половину периода больших вихрей

$$\Delta t = \frac{1}{2} T, \quad (6)$$

способствуя формированию максимального обезвешивания частиц грунта на границе раздела «поток–дно» применительно в этом случае к шагу больших вихрей. Очевидно, что в зависимости от конкретных значений скорости, глубины и крупности частиц грунта ситуация максимального обезвешивания грунта может создаваться не обязательно самыми большими вихрями.

Возможность подобных проявлений системы «поток–русло» и составляет ее избирательную способность по отношению к спектру пульсаций скорости и давления руслового потока.

Одним из результатов моделирования микроформ руслового рельефа в лотковых моделях разного масштаба (1:1; 1:2; 1:5 и 1:10) было полное отсутствие подобия руслового рельефа, образовавшегося в модельном руселотке масштаба 1:2, хотя начальными и граничными условиями этого эксперимента соб-

людались все традиционно предписываемые требования: обеспечивалось геометрическое, кинематическое и динамическое подобие, то есть соответственно:

$$B/h = idem, \quad (7)$$

$$Re_m \gg Re_{кр}, \quad (8)$$

$$Fr = idem. \quad (9)$$

Наносы на модели масштаба 1:2 были уменьшены в 2 раза по сравнению с прототипом (с $1,0 \div 2,0$ мм до $0,5 \div 1,0$ мм), чем обеспечивалось подобие их подвижности. И тем не менее, как видно на рис. 1, в лотковой модели масштаба 1:2 сформировались даже качественно непохожие на условную натуру короткие и крутые песчаные гряды барханного типа, то есть доминирующими по воздействию на песчаный грунт крупностью $0,5 \div 1,0$ мм оказались турбулентные возмущения иного линейного размера, чем того требовал масштаб моделирования [8; 9].

Положительный результат в этом эксперименте был достигнут, как видно на рис. 1, только после замены песка более крупным: подобие было достигнуто и по морфологическим, и по гидравлическим характеристикам потока и русла (потребовалась всего лишь 7-процентная форсировка расхода воды, чтобы привести в движение

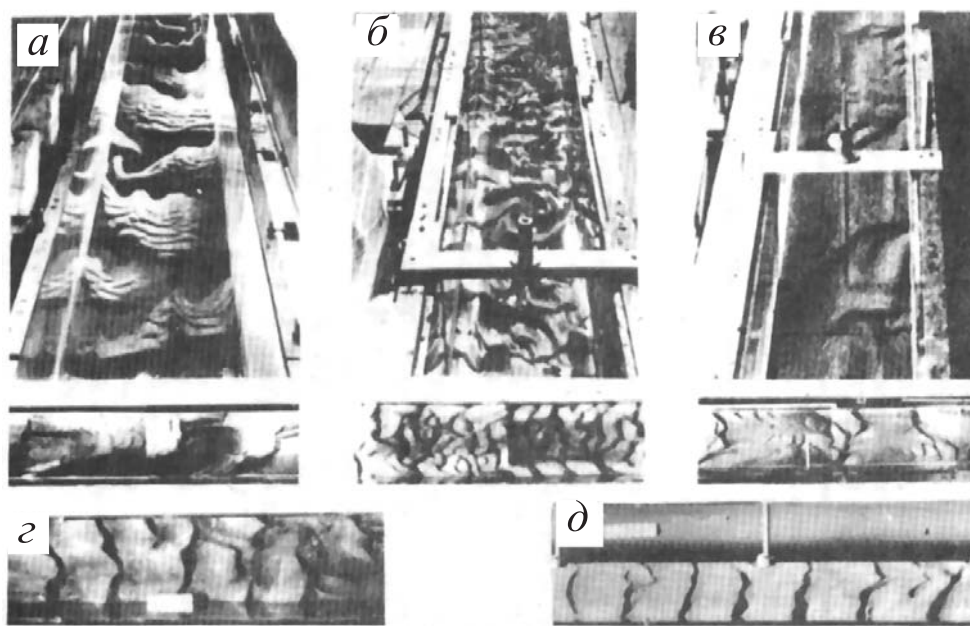


Рис. 1. Рельеф дна в перспективном и плановом изображении

a — масштаб 1:1 «натура», $d = 0,5 \div 1,0$ мм; $б$ — масштаб 1:2, $d = 0,25 \div 0,5$ мм;
 $в$ — масштаб 1:2, $d = 0,5 \div 1,0$ мм; $г$ — масштаб 1:5, $d = 0,1 \div 0,2$ мм; $д$ — масштаб 1:10, $d < 0,1$ мм

песок крупностью 1,0–2,0 мм, то есть крупность условной природы.

Таким образом, сформулированный К. В. Гришаниным вывод об избирательной способности системы «поток–русло» и результаты выполненной масштабной серии лотковых экспериментов привели нас к необходимости введения в состав известных критерияльных условий дополнительного и обязательного условия (если речь идет о деформируемой модели), ответственного за подобие механизма взаимодействия потока и русла, сложенного зернистым несвязным грунтом (что равносильно подобию механизма взаимодействия руслового потока с подрусловой водой). Это дополнительное условие может быть выражено соотношениями

$$\Delta t/T = idem \quad (10)$$

и

$$A_2/A_1 = idem, \quad (11)$$

где Δt — фазовый сдвиг, T — период больших вихрей, A_1 и A_2 — амплитуда пульсирующей величины (скорости или давления) соответственно в русловом потоке и в подрусловой воде, относящиеся к периоду T [8–9].

Сложность установления характеристик Δt и A_2 не закрывает, однако, возможности экспериментирования на деформируемых моделях участков рек.

Избирательная способность системы «поток–русло» проявляется как некий масштабный эффект в довольно узком диапазоне сочетания гидравлических характеристик и крупности русловых наносов. Поэтому, если сложная ситуация возникает с моделированием горной реки, выйти из нее можно некоторым изменением масштаба модели (имеющийся опыт моделирования участков горных рек подтверждает такую возможность).

При моделировании участков равнинных рек условия (10) и (11) становятся незначимыми из-за мелкозернистости русловых наносов и, как следствие, ламинаризации подруслового потока. В этом случае для подобию структуры русловой макротурбулент-

ности достаточно выполнить условия (7)–(9). Вместе с тем появляется трудность с моделированием крупности и подвижности русловых наносов.

Очевидно, что модельные наносы, как и натурные, должны формировать ламинаризованный подрусловой поток. Но, оставаясь по крупности даже на уровне мелкозернистого песка, они все равно будут значительно крупнее, чем того требует масштаб модели.

Для подобию подвижности таких наносов должна быть подобрана соответствующая плотность материала, то есть на модели должен использоваться заменитель естественного песка. Нарушение подобию по относительной зернистой шероховатости устраняется выбором такого масштаба модели, при котором отношение крупности модельных наносов к глубине потока не превышало бы 0,001. К. В. Гришанин, анализируя связь безразмерной глубины с относительной гладкостью русла, отмечает: «Таким образом, верхняя граница области автомодельности по относительной зернистой шероховатости определяется значением относительной шероховатости $d_{50}/H = N = 0,001$ » [2, с. 101]. К такому же выводу пришли и мы, анализируя результаты большой серии лабораторных экспериментов [9].

Таким образом, соблюдение рассмотренных выше условий подобию и использование отмеченных приемов приведения к подобию ситуаций, возникающих в области проявления масштабных эффектов, позволяет рассчитывать на подобное воспроизведение руслового процесса по крайней мере на структурном уровне внутрирусловых морфологических образований.

В заключение отметим, что рассмотренные в нем три фрагмента динамики русловых потоков, будучи генетически связанными между собой, объединены еще и одной целью: попыткой экспериментального обоснования методики моделирования руслового процесса на деформируемых моделях с использованием замечательных идей К. В. Гришанина.

Список литературы

1. Гришанин К. В. Динамика русловых потоков. — Л.: Гидрометеиздат, 1969. — 428 с.
2. Гришанин К. В. Устойчивость русел рек и каналов. — Л.: Гидрометеиздат, 1974. — 144 с.
3. Гришанин К. В. Динамика русловых потоков. — Л.: Гидрометеиздат, 1979. — 312 с.
4. Клавен А. Б. Исследование структуры турбулентного потока // Тр. ГГИ. — 1966. — Вып. 136. — С. 65–76.
5. Клавен А. Б., Копалиани З. Д. Лабораторное исследование кинематической структуры турбулентного потока с сильно шероховатым дном // Тр. ГГИ. — 1973. — Вып. 209. — С. 67–90.
6. Клавен А. Б. Некоторые свойства крупномасштабной русловой турбулентности // Русловые процессы: тр. IV ВГС. — 1976. — Т. 10. — С. 252–259.
7. Клавен А. Б. Оценка характеристик турбулентности русловых потоков // Тр. ГГИ. — 1982. — Вып. 278. — С. 36–43.
8. Клавен А. Б. Структура потока и гидравлическое моделирование руслового процесса // Тр. V ВГС. — 1988. — Т. 10, кн. 2. — С. 216–225.
9. Клавен А. Б., Коковин В. Н. Опыт гидравлического моделирования донного рельефа // Тр. ГГИ. — 1990. — Вып. 337. — С. 109–123.
10. Клавен А. Б. К вопросу о механизме и формах движения русловых наносов // Тр. ГГИ. — 2002. — Вып. 361. — С. 184–195.

УДК 551.482.212

К. М. Беркович,
д-р географ. наук, ст. науч. сотр.,
Московский государственный университет
им. М. В. Ломоносова

НАПРАВЛЕННЫЕ АНТРОПОГЕННЫЕ ДЕФОРМАЦИИ РУСЕЛ РАВНИННЫХ РЕК

DIRECTIONAL ANTHROPOGENIC CHANNEL DEFORMATIONS OF LOWLAND RIVERS

Разработка русловых карьеров приводит к врезанию русла. На основании региональной зависимости расхода взвешенных руслообразующих наносов от расхода воды для участка р. Белая — г. Уфа рассчитан общий сток наносов, который необходим для формирования и восстановления руслового рельефа. Понижение отметок дна рассчитано как функция объема добычи, которая может быть оценена с учетом приемлемого по экологическим или экономическим признакам понижения отметок дна и уровня воды.

Development of channel pits leads to channel cutting. For the plot of the White River in Ufa the total runoff of sediment, which is required for the formation and recovery of the channel topography is calculated. It is based on the regional relationship between bed-forming suspended sediment and water discharge. Decrease the bottom elevations calculated as a function of volume of extraction, which can be assessed taking into account of acceptable environmental or economic criterions of the water level marks and the bottom decrease.

Ключевые слова: деформации, карьеры, река, русло, поток, морфология, эрозия, руслообразующие наносы.

Key words: deformations, quarries, river, channel, stream, morphology, erosion, bed-formation sediments.

НАПРАВЛЕННЫЕ деформации русел — систематическое врезание или отложение наносов, которые трансформируют весь продольный профиль и морфологические характеристики русла. В настоящее время они развиваются под влиянием хозяйственной деятельности человека. Наибольшее влияние на развитие направленных деформаций русла, преимущественно вертикальных, оказывают разработка русловых карьеров и создание водохранилищ.

С точки зрения гидрологии и геоморфологии река — динамическая флювиальная система, которая транспортирует воду и наносы, размывает горные породы, образует новые отложения. За историю своего развития реки неоднократно меняли долины и русла. Колебания климата, тектонические движения земной коры обеспечивали формирование глубоких долин на этапах врезания и заполнения аллювием при аккумуляции, а также их расширение в ходе боковой эрозии. Направленные деформации определяются длительным дисбалансом транспорта наносов и на равнинных реках развиваются в геологическом масштабе времени. Направленные деформации русла реки определяются несколькими факторами: поступлением наносов с водосбора и из притоков, морфометрическими характеристиками русла (глубиной, шириной, уклоном), расходом воды и скоростью течения. Для русел большинства равнинных рек, сформировавшихся в относительно стабильных климатических и тектонических условиях нескольких последних тысячелетий, не характерны естественные направленные деформации.

В последние два-три столетия условия формирования речных русел во многих регионах значительно изменились. Это явилось следствием хозяйственной деятельности человека. Наиболее заметные последствия вызывает инженерное вмешательство в рельеф речного русла посредством сооружения плотин и других сооружений, выполнения земляных работ, так как при этом нарушается геолого-геоморфологическая основа природной системы. Поток реагирует на такие нарушения изменением скорости течения и транспортирующей способности. В результате возникают интенсивные направленные деформации.

Деформации русла определяются характеристиками стока воды и наносов, а также крупностью донных отложений. Наибольшее влияние на развитие направленных деформаций русла, преимущественно вертикальных, оказывают разработка русловых карьеров и создание водохранилищ.

Разработка русловых карьеров приводит к радикальным изменениям в морфологии русла. Типичные карьеры оставляют после себя выемки глубиной 6–10 м, которые занимают часть, а иногда и всю ширину русла. Объем выработок ограничивается доступностью материала нужного размера и редко регламентируется с точки зрения стока наносов и русловых процессов. Характерно, что нередко добываемый крупный материал в некоторых местах является частью древних отложений и не восполняется, если он не может транспортироваться рекой в современных гидрологических условиях.

Разработка карьера способствует врезанию реки как выше, так и ниже по течению. Верхняя кромка карьера размывается вследствие формирования кривой спада, донный материал выносится и отлагается в выемке. Благодаря этому процессу (эрозии и аккумуляции) происходит миграция понижения дна вверх по течению. Понижение отметки дна реки во времени выше карьеров на верхней Оке и нижней Белой в последние 40 лет происходило линейно и составило 0,7 и 1,5 м. На верхней Оке прослеживается достаточно четкая зависимость понижения отметки дна и расстояния от верхней кромки карьера:

$$\Delta z = 0,0014x - 2,5.$$

Эрозия, сопровождающая разработку карьеров, подтверждается анализом деформаций русла р. Оки ниже Кузьминского гидроузла. В 1973–1993 гг. увеличение объема русла на участке длиной 100 км было больше объема добычи на величину, соответствующую слою эрозии до 40 см.

Врезание ограничивается наличием в составе донных отложений крупнообломочного материала или близким к поверхности залеганием скальной постели аллювия. В этом случае продольный профиль реки в результате врезания приобретает ступенчатые очертания. Подобное явление наблюдается на верхней Оке и на нижней Томи. В первом слу-

чае ступени формируются на перекатах, сложенных крупным материалом. На Томи в ходе врезания обнажился скальный порог.

Направленные деформации могут быть выявлены по понижению уровня воды при одном и том же расходе или непосредственным сравнением разновременных съемок русла. Так, на Оке снижение меженных уровней проявилось за 55 лет на всем участке от Калуги до Рязани. Сравнение съемок показало, что понижение отметок дна на участке верхней Оки от Серпухова до Коломны с 1949 по 1992 г. составило в среднем 1,3 м. Дно р. Белой на участке длиной 140 км ниже Уфы за 1979–1995 гг. понизилось на 0,9 м. В эту величину входит, очевидно, как разработка карьеров, так и врезание.

Деформации русла определяются следующим соотношением:

$$\Delta W = W_{\text{BY}} - W_{\text{BYX}} + W_{\text{II}} - W_{\text{K}},$$

где $W_{\text{вх}}$ — расход наносов на входе на участок, $W_{\text{вых}}$ — расход наносов на выходе, $W_{\text{д}}$ — добавление наносов (из притоков, от размыва берегов и т. п.), $W_{\text{к}}$ — потеря наносов за счет разработки карьеров. Там, где входной и выходной

расходы примерно равны, дополнительные потери за счет добычи соответствуют понижению отметок дна.

Для оценки баланса наносов на участке следует учитывать руслообразующие наносы. Наиболее крупные из состава руслообразующих переносятся в форме влекомых наносов, как правило, в составе донных гряд. Часть руслообразующих наносов переносится в составе взвешенных наносов, перемещаясь от одной крупной русловой формы к другой. Определение стока руслообразующих наносов производится с учетом повторяемости расходов воды. Вместе с тем если из карьеров удаляются частицы, которые поток не может переносить ни при каких условиях, то такие частицы исчезают из донных отложений. Такие условия характерны для нижних течений Томи и Белой, из русла которых извлекали плейстоценовый аллювий большой крупности, который не может переноситься современными потоками этих рек.

Анализ данных сетевых наблюдений на р. Белой в Уфе позволил выявить следующую зависимость расхода взвешенных руслообра-

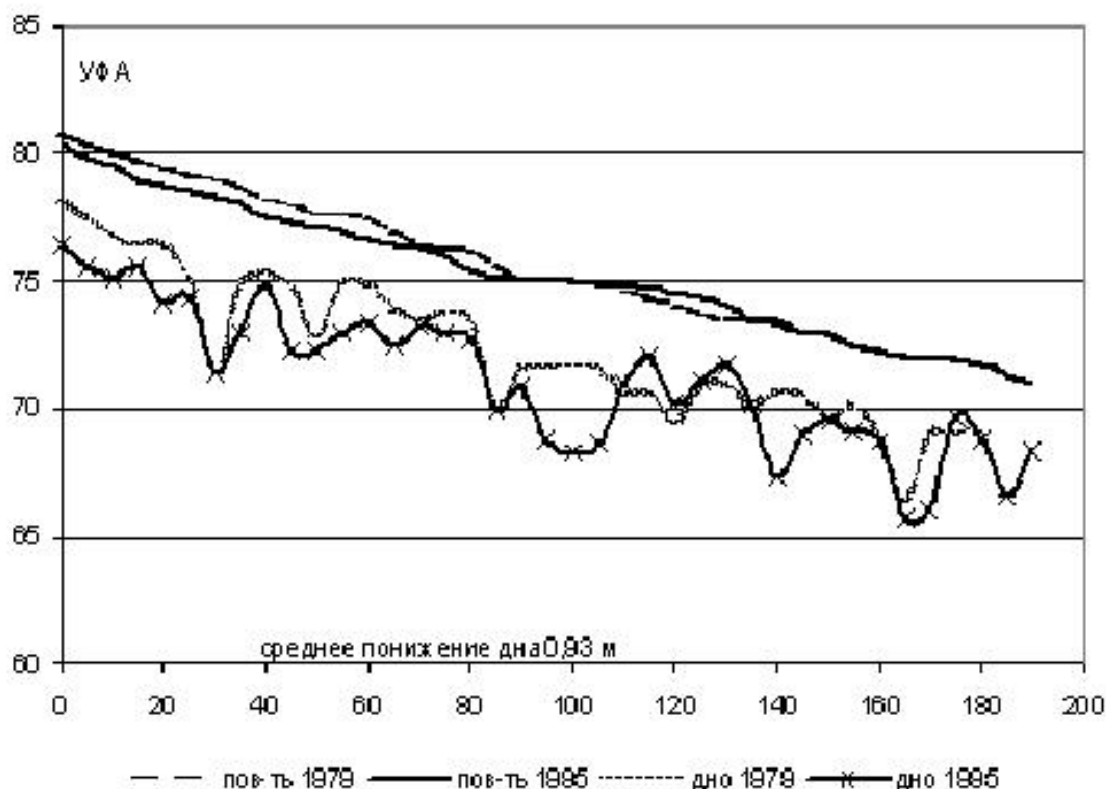


Рис. 1. Изменение русла р. Белой

зующих наносов (R_p) от расхода воды:

$$R_p = 1,6Q^{1,5}.$$

Были выполнены также измерения параметров гряд на участках детальных полевых работ и определен расход влекомых наносов.

Анализ гранулометрического состава проб руслообразующих наносов и донных отложений р. Белой показал, что к руслообразующим относятся наносы, частицы которых крупнее 0,1 мм. Суммарный годовой сток руслообразующих взвешенных наносов составляет 140 тыс. т, что соответствует 6,5–7,0 % от полного стока взвешенных наносов. В период половодья доля руслообразующих наносов может достигать 30 % от стока взвешенных. Годовой сток влекомых наносов, перемещаемых в форме гряд, составляет в среднем 230 тыс. т. Общий сток наносов, который может участвовать в формировании и восста-

новлении руслового рельефа, составляет для нижней Белой 370 тыс. т.

В 1979–1994 гг. из русла на участке длиной 140 км и средней шириной 300 м было добыто 50 270 тыс. м³ песчано-гравийного материала, в среднем 3350 тыс. м³ в год. За этот период сток руслообразующих наносов (вход) составил 3590 тыс. м³ (7 % добычи). Таким образом, убыль материала составила 46 680 тыс. м³, что соответствует среднему слою 1,1 м (46 680:140:300). Полученная величина близко совпадает с данными непосредственных измерений (рис. 1), а это означает, что восстановления руслового рельефа не происходило. Понижение отметок дна можно рассчитать как функцию объема добычи. Предлагая приемлемое по экологическим или экономическим признакам понижение отметок дна (и уровня), можно оценить допустимый объем добычи.

УДК 556.5.072

В. К. Дебольский,

д-р техн. наук, профессор,
Институт водных проблем РАН
(Москва);

Е. И. Дебольская,

д-р техн. наук, ст. науч. сотр.,
Институт водных проблем РАН
(Москва);

О. Я. Масликова,

канд. техн. наук,
Институт водных проблем РАН
(Москва)

МОДЕЛЬ ДЕФОРМАЦИЙ ДНА В НИЖНЕМ БЬЕФЕ ГИДРОУЗЛА С УЧЕТОМ ЛЕДОВЫХ ЗАТРУДНЕНИЙ

THE MODEL OF BED DEFORMATION IN THE LOWER POOL OF THE POWER PLANT UNIT TAKING INTO ACCOUNT OF ICE DIFFICULTIES

Предлагается двухмерная продольно-поперечная модель деформаций русел в условиях ледовых затруднений на широких реках с криволинейными участками с учетом прохождения паводочных и попусковых волн и возможности формирования ледовых заторов.

The longitudinal-transverse model of channel deformations in condition of ice difficulties is on wide rivers with curvilinear reaches is proposed. It's considered of flood and downstream flow waves passing and of the ice jam forming.

Ключевые слова: заторы, деформации, река, русло, бьефы гидроузлов, моделирование, руслоформирование.

Key words: jams, deformations, river, channel, hydrosystems pools, modeling, bed formation.

З

АТОРЫ льда являются наиболее опасным явлением на реках, протекающих в климатических условиях с существенным по протяженности периодом с отрицательными температурами воздуха. На нерегулируемых реках наводнения при формировании ледяных заторов приводят к существенно большему ущербу по сравнению с наводнениями при прохождении половодий.

Ледяные заторы, формирующиеся в нижних бьефах гидроузлов, расположенных в суровых климатических условиях, вызывают определенные потери в выработке энергии за счет образующегося при этом подпора. Кроме того, наводнения, развивающиеся при этом, как и в случае с нерегулируемыми реками, часто можно отнести к катастрофическим. В связи с этим рассмотрение возможности описания возникновения указанных ледовых затруднений и тем более возможности их прогнозирования имеет очевидную практическую значимость.

Моделирование гидродинамических процессов в настоящее время является одним из наиболее современных и точных методов прогноза развития катастрофических ситуаций. Проведение натурных исследований гидродинамики потоков и процессов деформаций дна в условиях резкой нестационарности течений, свойственной нижним бьефам, и особенно в период формирования ледовых затруднений практически невозможно. Лабораторное моделирование связано с еще более значительными трудностями из-за невозможности выполнения всех критериев подобия одновременно. В связи с этим одним из эффективных способов изучения воздействия ледяного покрова на руслоформирование в нижних бьефах

является математическое моделирование.

В основу предлагаемой модели положена двумерная модель заторообразования [1], разработанная ранее, дополненная условием подвижного дна и двумерными уравнениями деформаций или транспорта наносов (уравнениями сохранения массы для всех переносимых наносов).

Под действием волны возмущения (в рассматриваемом нами случае это волна попуска с гидротехнического сооружения), которая сама по себе служит причиной наводнения, создаются, кроме того, условия для образования ледовых заторов. Развитие заторов в свою очередь либо приводит к увеличению интенсивности затопления, вызванного волной возмущения, либо после прекращения действия волны попуска является единственной причиной продолжения затопления. Задача о деформациях дна и берегов в таких условиях зависит не только от параметров водного объекта, попуска, характеристик наносов и сочетаний этих параметров, но также и от времени и места возникновения затора, его продолжительности.

Основные уравнения, граничные условия, критерии разрушения ледового покрова, условия подныривания льдин под кромку сплошного ледяного покрова, условия в месте образования затора и алгоритм расчета двумерной модели заторообразования были описаны в работе [1]. Для краткости приведем только основные уравнения этих моделей. Двумерные уравнения жидкости и уравнение неразрывности, получаемые при интегрировании основных трехмерных уравнений по глубине потока при наличии льда и отсутствии ветра, использовались в виде

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -g \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(A_x \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(A_y \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \left(\frac{\tau_{yx} - \tau_{dx}}{\rho h} \right); \quad (1)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -g \frac{\partial H}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left(A_x \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(A_y \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \left(\frac{\tau_{xy} - \tau_{dy}}{\rho h} \right); \quad (2)$$

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial Hu}{\partial x} + \frac{\partial Hv}{\partial y} = 0, \quad (3)$$

где x, y — декартовы координаты; причем, положительная ось x направлена по потоку, а ось y поперек; u, v — осредненные по глубине

потока продольная и поперечная компоненты скорости воды соответственно; g — ускорение свободного падения; $H = h + h_0$ — уровень

или отметка поверхности воды; h_0 — отметка дна; h — глубина потока; $\tau_{dx, lx}$ и $\tau_{dy, ly}$ — компоненты касательного напряжения на дне и поверхности льда соответственно; A_x и A_y — продольный и поперечный коэффициенты турбулентной вязкости соответственно.

Для определения коэффициентов турбулентной вязкости использовались соотношения $A_x = \gamma_x hu$, $A_y = \gamma_y hu$, где $\gamma_{x,y}$ — эмпирические константы, полученные в работе [2] для открытых потоков $\gamma_x = 0,06$, $\gamma_y = 0,024$.

Связь между касательными напряжениями на твердых поверхностях $\tau_{dx, lx}$, $\tau_{dy, ly}$ и остальными характеристиками потока задается соотношениями

$$\tau_{di} - \tau_{li} = \frac{\rho \lambda U_i |\vec{U}|}{2}, \quad (4)$$

$$\lambda_{л,д} = \frac{2gn^2}{h^{1/3}}, \quad (5)$$

где λ — коэффициент гидравлического трения, n — зимний обобщенный коэффициент групповой шероховатости в формуле Маннинга, $\vec{U}$ — вектор скорости в плане, $U_1 = u$, $U_2 = v$ индексы $i = 1, 2$ соответствуют x и y координатам, $д$ и $л$ — донной и ледовой поверхностям соответственно.

Уравнение сохранения массы переносимых наносов или уравнение деформаций в двухмерной постановке использовалось, как это принято для открытых потоков [3], в следующей записи:

$$\frac{\partial}{\partial t} ((1-p)z_b) + \frac{\partial Q_{sx}}{\partial x} + \frac{\partial Q_{sy}}{\partial y} = 0, \quad (6)$$

где z_b — отклонение поверхности дна, p — пористость донного материала, Q_{sx} , Q_{sy} — продольная и поперечная составляющие расхода наносов на единицу ширины, для их записи

использовалась наиболее простая зависимость Энгелунда, не предусматривающая деление наносов на взвешенные и донные:

$$Q_{sx} = 0,05u^2 \left(\frac{\tau_{dx}}{(\rho_s - \rho)gd} \right)^{3/2} \sqrt{\frac{d}{(\rho_s/\rho - 1)g}}; \quad (7)$$

$$Q_{sy} = 0,05v^2 \left(\frac{\tau_{dy}}{(\rho_s - \rho)gd} \right)^{3/2} \sqrt{\frac{d}{(\rho_s/\rho - 1)g}}, \quad (8)$$

где d — средний диаметр частиц, ρ_s — плотность частиц, ρ — плотность воды.

ВЫВОДЫ

Численные эксперименты по предложенной модели показали, что:

- в отличие от потока с открытой поверхностью, при прохождении волны возмущения потоке, покрытом льдом, как на приплотинном участке, так и в створах, прилегающих к кромке ледяного покрова, наблюдаются размывы дна. Между этими участками наблюдается заилиние, причем, чем больше длина полыньи, тем оно незначительнее;

- при беззатормном режиме увеличение попуска более интенсивно действует на размыв в створе ГТС, чем у кромки;

- при формировании затора увеличение попуска более интенсивно действует на размыв в створе затора, чем в створе ГТС;

- с ростом шероховатости льда размывы у кромки увеличиваются, а у ГТС уменьшаются;

- увеличение полыньи приводит к увеличению размывов в створе ГТС и уменьшению у кромки;

- при увеличении крупности частиц грунта как в створе ГТС, так и у кромки размывы уменьшаются.

Список литературы

1. Дебольская Е. И., Дербенев М. В., Масликова О. Я. Численное моделирование ледовых затворов // Водные ресурсы. — 2004. — Т. 31, № 5.
2. Орлов А. С., Долгополова Е. Н., Дебольский В. К. К оценке характеристик поля скорости и переноса примеси в открытых потоках // Водные ресурсы. — 1985. № 1.
3. Gessler D. Application of 3D Mobile bed, hydrodynamic model / D. Gessler [et al.] // J. of Hydraulic Engineering. — 1999. — Vol. 125, № 7.

ВЛИЯНИЕ ОСТАТОЧНОГО ОБЩЕГО ПЕРЕГИБА
И ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ НА ОБЩУЮ ПРОЧНОСТЬ КОРПУСАTHE INFLUENCE OF GENERAL RESIDUAL HOGGING
AND RESIDUAL STRESSES ON GENERAL HULL STRENGTH

Данная работа посвящена изучению методов восстановления общей продольной прочности корпусов судов, имеющих остаточный общий прогиб или перегиб. Предложен и обоснован способ определения остаточной изогнутой оси корпуса судна и соответственно ее максимальной стрелки прогиба. Этот способ непосредственно по измерению кривизны корпуса на отдельных участках позволяет определять ординаты остаточной изогнутой линии.

The article deals with the investigation of methods of restoration for general longitude strength of hulls having residual deflection or hogging. The author suggests and proves the method of defining the residual bent ship's hull axle and its maximum deflection. This method permits to define coordinates of the residual bent line by measuring the hull curvature in particular sections.

Ключевые слова: остаточный прогиб/перегиб, Эйлеровы напряжения, остаточные напряжения, редуцированные коэффициенты, кривизна, изгибающий момент.

Key words: residual deflection/hogging, Eulerian stresses, residual stresses, reducing coefficients, curvature, bending moment.



ОРМА корпуса судна влияет на распределение сил поддержания, которые в сочетании с распределением сил веса по длине создают изгибающий момент на тихой воде, являющийся важной составляющей расчетного изгибающего момента, определяющего общую прочность корпуса судна. Изменение формы корпуса, связанное с появлением в процессе эксплуатации и ремонта остаточного общего прогиба или перегиба, приводит к изменению изгибающего момента и, следовательно, к изменению обеспеченности общей прочности корпуса. Зависимость для расчета дополнительного изгибающего момента на тихой воде $\Delta M_{m.в}$ получена много лет назад [1], давно используется в учебниках и учебных пособиях по технологии судоремонта [2; 3] и в виде формулы (1) по предложению профессора Г. В. Бойцова вошла в Правила Российского речного регистра [4]:

$$\Delta M_{m.в} = \pm 0,19 f_{ост} \delta BL^2, \quad (1)$$

где $f_{ост}$ — остаточная стрелка прогиба/перегиба (максимальная по сечениям);

L и B — длина и ширина корпуса соответственно, м;

δ — коэффициент общей полноты.

Зависимость (1) физическая и хорошо описывает влияние изменения формы корпуса на его прочность. Это влияние не всегда отрицательное. Если форма остаточного изгиба корпуса совпадает с формой, вызываемой действием расчетного изгибающего момента, а максимальный изгибающий момент противоположного знака существенно меньше расчетного, то дополнительный изгибающий момент ($\Delta M_{m.в}$) будет уменьшать расчетный и увеличивать нелимитирующий изгибающий момент противоположного знака, что ведет к увеличению обеспеченности общей прочности корпуса.

Влияние на общую прочность прямо пропорционально точности определения изгибающего момента, вычисление которого весьма проблематично, так как действующие до настоящего времени методики предусматривают его определение как разность между измеренным прогибом/перегибом корпуса судна при заданной нагрузке и рассчитанным упругим прогибом при той же нагрузке. Точность расчета последнего невелика, так как

зависит от точности определения внешней нагрузки и изменения момента инерции поперечного сечения корпуса по длине и времени. Отмеченные обстоятельства привели к тому, что до выхода Правил [4] остаточный общий прогиб/перегиб не измерялся и не оценивался. Опасность того или иного прогиба определялась по признакам наметившегося перелома (разрывы, трещины, потеря устойчивости балок продольного набора и их книц, комингсов грузовых люков, резкие поперечные складки палубного настила, обшивки днища, бортов и т. п.). С выходом Правил [4] необходимо повысить требования к определению стрелки остаточного прогиба/перегиба.

Нами предложен и обоснован способ определения остаточной изогнутой оси корпуса судна [5; 6] и соответственно ее максимальной стрелки прогиба. Этот способ непосредственно по измерению кривизны корпуса на отдельных участках позволяет определять ординаты остаточной изогнутой линии по формуле

$$y_{\text{ост}}(x) = \frac{\sum_1^n c_i^{\text{ост}} l (L - L_i)}{L} x - \sum_1^n \left(\frac{c_i^{\text{ост}} \left(x - \left(L_i - \frac{l}{2} \right) \right)^2}{2} \right) \Big|_{x \geq L_i - \frac{l}{2}} - \left(\frac{c_i^{\text{ост}} \left(x - \left(L_i + \frac{l}{2} \right) \right)^2}{2} \right) \Big|_{x \geq L_i + \frac{l}{2}}, \quad (2)$$

где $y_{\text{ост}}(x)$ — ордината остаточной изогнутой оси корпуса, м;

$c_i^{\text{ост}}$ — кривизна на i -м участке по длине судна, 1/м;

l — длина участка, на котором измеряется кривизна, м;

L_i — расстояние от начала изогнутой оси до середины участка, на котором измеряется кривизна;

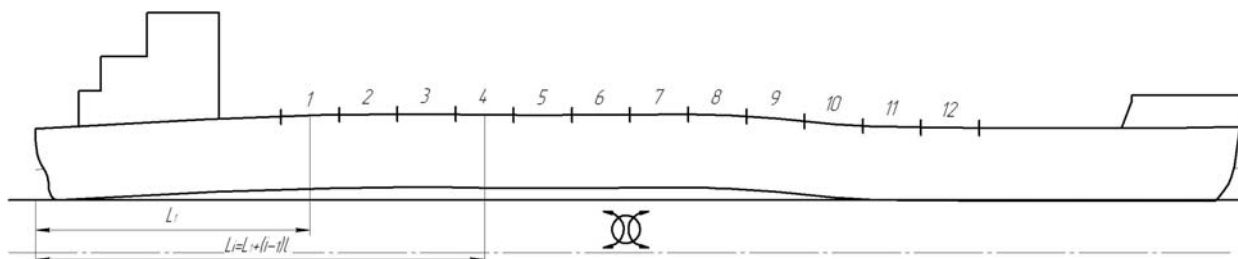


Рис. 1. Участки измерения кривизны

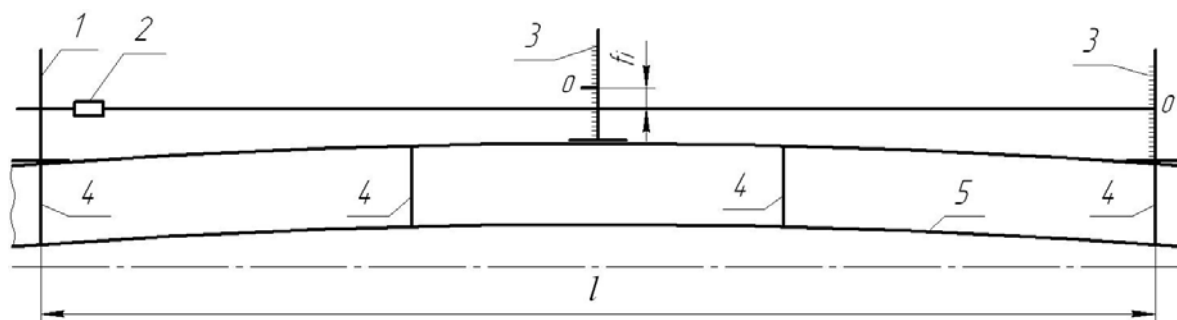


Рис. 2. Схема определения кривизны участка:

l — магнитная стойка с шарниром; 2 — лазерный визир;

3 — передвижная стойка с линейкой;

4 — бимсы; 5 — карлингс

$$x \geq L_i - \frac{l}{2} \text{ и } x \geq L_i + \frac{l}{2} \text{ — показатели,}$$

указывающие, что слагаемые учитываются только в том случае, когда выражение в скобках, возводимое в квадрат, имеет положительное значение;

L — расчетная длина судна, м.

Места измерения кривизны на палубе судна показаны на рис. 1, а схема определения кривизны на участке — на рис. 2.

Измеряемым параметром для определения кривизны является высота хорды f , соединяющей концы участка длиной l , а кривизна на участке рассчитывается по формуле

$$c_i^{\text{ост}} = \frac{8f_i}{l^2}. \quad (3)$$

Предложенный способ расчета остаточного общего прогиба/перегиба позволяет повысить его точность за счет исключения погрешности, связанной с установлением упругой составляющей, зависящей от распределения нагрузки на корпус и изменяющейся по длине и по времени эксплуатации жесткости корпуса. Задача определения остаточного прогиба становится чисто геометрической, а не прочностной.

На обеспеченность общей прочности корпуса влияют также остаточные деформации и появляющиеся из-за них остаточные напряжения в крайних связях эквивалентного бруса.

Остаточные напряжения растяжения в крайних связях эквивалентного бруса приводят к уменьшению коэффициента запаса на выносливость, несмотря на то что вызывают повышение предела выносливости. Отмеченное хорошо иллюстрируется на диаграмме предельных амплитуд, представленной на рис. 3 и получаемыми ниже зависимостями для коэффициентов запаса.

Коэффициент запаса на выносливость (n_p) определяется по формуле (4), приводимой в учебниках и учебных пособиях по сопротивлению материала, например в [7]:

$$n_p = \frac{\sigma_{-1}}{k\sigma_a + \Psi\sigma_m} = \frac{\sigma_R}{\sigma_{\max}}, \quad (4)$$

где σ_{-1} — предел выносливости материала при симметричном цикле напряжений;

σ_a и σ_m — амплитуда цикла напряжений

и среднее напряжение в цикле соответственно от внешней нагрузки в рассматриваемой связи корпуса (координаты точки A на диаграмме предельных амплитуд);

k — обобщенный эффективный коэффициент понижения предела выносливости (учитывает концентрацию напряжений, состояние поверхности и масштабный фактор);

$$\Psi = \lg \alpha = \frac{2\sigma_{-1} - \sigma_o}{\sigma_o} \text{ — коэффициент;}$$

σ_o — предел выносливости материала для отнулевого цикла растяжения;

σ_R — предел выносливости рассматриваемой связи для цикла растяжений, подобного вызванному внешней нагрузкой;

$\sigma_{\max}$ — максимальные напряжения цикла, вызванные внешней нагрузкой.

Наличие остаточных напряжений растяжения в связи корпуса ($\sigma_{\text{ост}}$) не изменит амплитуду цикла напряжений, а лишь приведет к увеличению средних напряжений в цикле (точка A'). Как видно на диаграмме предельных амплитуд, в результате увеличатся максимальные и минимальные напряжения в цикле и, следовательно, изменится коэффициент асимметрии цикла, возрастет предел выносливости. Выражение для коэффициента запаса на выносливость примет вид

$$n'_p = \frac{\sigma_{-1}}{k\sigma_a + \Psi(\sigma_m + \sigma_{\text{ост}})}. \quad (5)$$

После преобразования получим

$$n'_p = n \cdot \varphi_{\text{ост}}^6, \quad (6)$$

где $\varphi_{\text{ост}}^6$ — понижение коэффициента запаса на выносливость из-за остаточных напряжений.

$$\varphi_{\text{ост}}^6 = \frac{1}{1 + \frac{\sigma_{\text{ост}}/\sigma_m}{1 + k\sigma_a/\Psi\sigma_m}}. \quad (7)$$

Остаточные напряжения приводят к уменьшению запаса прочности. Если амплитуда цикла напряжений мала при значительных средних напряжениях в цикле от внешней нагрузки (точка C на диаграмме предельных амплитуд), то коэффициент запаса прочности определяется по формуле

$$n_T = \frac{\sigma_T}{\sigma_{\max 1}}, \quad (8)$$

где $\sigma_{\max 1}$ — максимальные напряжения в цикле от внешней нагрузки;

σ_T — предел текучести материала.

С учетом остаточных растягивающих напряжений выражение для коэффициента запаса прочности примет вид

$$n'_T = \frac{\sigma_T}{\sigma_{\max l} + \sigma_{\text{oct}}}. \quad (9)$$

После преобразования выражение (9) можно представить в виде

$$n_T' = n_T \Phi_{\text{ост}}^T, \quad (10)$$

где $\varphi_{\text{ост}}^T$ — понижение коэффициента запаса прочности из-за остаточных напряжений

$$\phi_{\text{oct}}^T = \frac{1}{1 + \frac{\sigma_{\text{oct}}}{\sigma_{\text{max}}}}. \quad (11)$$

Измеряя высоту хорды на отдельных участках палубы заданной длины (например, по карлингсу между несколькими бимсами), можно достаточно точно определить произошедшие деформации на этом участке, а следовательно, имеющиеся остаточные напряжения.

Если считать, что сохраняется гипотеза плоских сечений, а участок палубы заданной длины изогнулся по дуге окружности, то относительное удлинение этого участка будет

$$\epsilon_{\text{oct}} = \frac{H - z_{\text{HO}}}{R}, \quad (12)$$

где $\frac{1}{R} = c$ — кривизна деформированного участка палубы;

H — высота борта;

$z_{но}$ — расстояние от основной плоскости до нейтральной оси поперечного сечения корпуса.

Используя формулу (3), можно получить выражение для относительного удлинения в зависимости от измеряемой высоты хорды на заданном участке

$$\epsilon_{\text{ост}} = \frac{8f(H - z_{\text{HO}})}{l^2}, \quad (13)$$

тогда остаточные напряжения будут определяться по формуле

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{ocm} &= E\varepsilon_{ocm} && \text{при } \varepsilon_{ocm} \leq \varepsilon_T \\ \sigma_{ocm} &= \sigma_T && \text{при } \varepsilon_{ocm} > \varepsilon_T \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

где E — модуль нормальной упругости, МПа;

ε — относительные удлинения, соответствующие пределу текучести.

С использованием зависимостей (3), (13)–(14) построена номограмма, позволяющая определять кривизну каждого участка для определения ординат остаточной изогнутой оси корпуса и остаточных удлинений для расчета остаточных напряжений и уменьшения коэффициента запаса на выносливость и прочность в зависимости от измеряемой высоты хорды на участке.

С помощью графиков на рис. 4 обрабо-
таны результаты измерения изогнутой оси

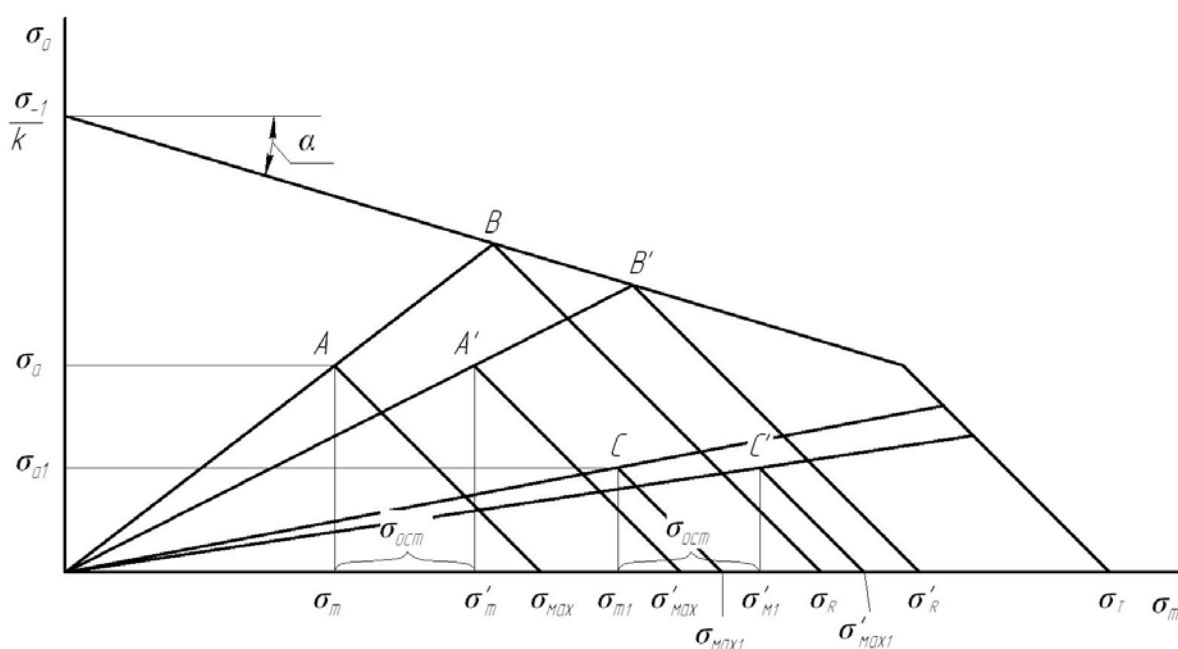


Рис. 3. Диаграмма предельных амплитуд

танкера «Волгонефть 251» [8], получено значение кривизны изогнутой оси на отдельных участках корпуса и по формуле (2) рассчитаны ординаты остаточной изогнутой оси. На рис. 5 показаны значения ординат изогнутой оси:

1 — по результатам измерения [8] для судна в грузу;

2 — упругого прогиба в виде параболы второй степени, вершина которой на миделе определена по формуле академика Ю. А. Шиманского;

3 — остаточной изогнутой оси, равные разности значений 1-й и 2-й;

4 — остаточной изогнутой оси, рассчитанные по формуле (2).

Сравнивая линии 3 и 4, следует отметить, что большего доверия заслуживает последняя, она плавная и состоит из прямолинейных участков, в которых отсутствуют остаточные удлинения, сопрягаемых между собой отрезками параболы второй степени, в которых имеет место остаточное удлинение.

Используя формулы (13) и (14) или график на рис. 4, можно определить остаточные напряжения на участке 35÷55 м; $f = 12,5$ мм; $H - z_{но} = 3$ м; $\sigma_{ост} = 145$ МПа, а на участке 85÷105 м; $f = 7,5$ мм; $H - z_{но} = 3$ м; $\sigma_{ост} = 90$ МПа.

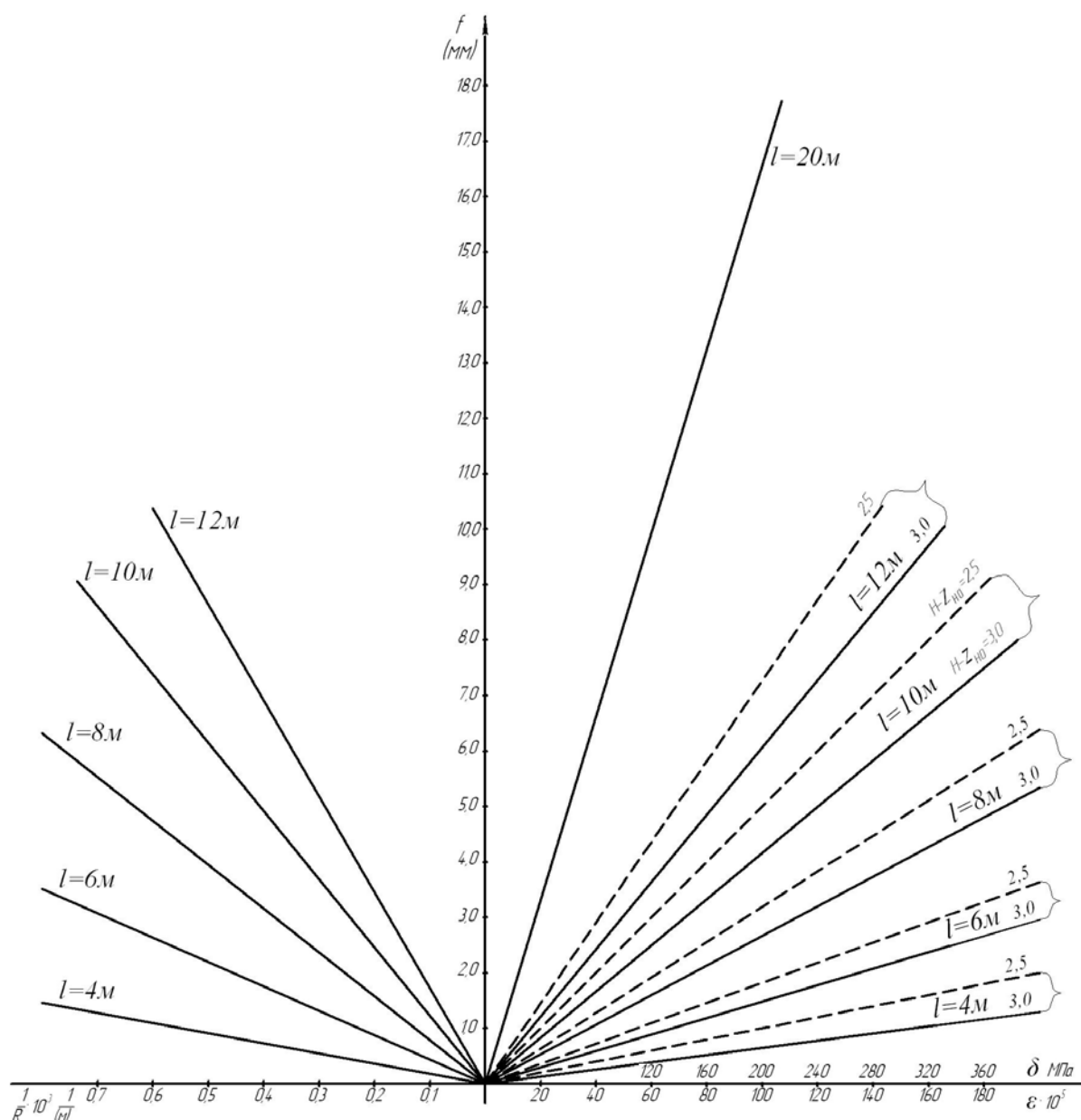


Рис. 4. Кривизна и остаточные относительные удлинения в зависимости от высоты хорды

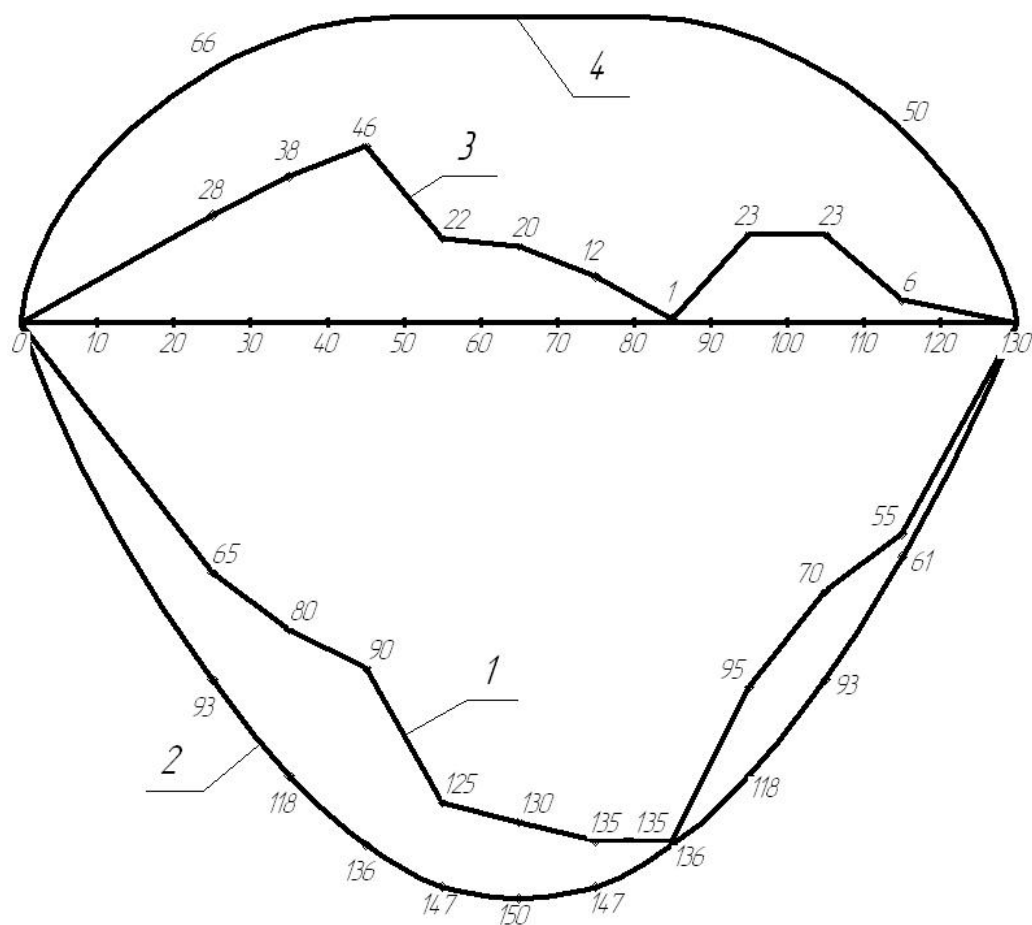


Рис. 5

- 1 — по измерениям в грузу;
 2 — упругий, с использованием формулы академика Шиманского;
 3 — остаточный $y_{\text{ост}} = y - y_{\text{упр}}$;
 4 — остаточный по предлагаемой формуле

Помимо влияния на выносливость материала, остаточные напряжения сжатия могут влиять на изменение общей прочности через уменьшение редуционных коэффициентов пластин. На рис. 6 показаны изменения остаточных деформаций и напряжений в корпусе судна. Нами получены зависимости для определения редуционных коэффициентов гибкой части пластин [9] при продольной системе набора, которые могут быть использованы для изучения влияния остаточных напряжений сжатия на изменение несущей способности пластин

$$\left. \begin{aligned} \varphi &= \frac{1,6}{n} \left(\frac{t}{t^*} \right)^2, \text{ при } \frac{t}{t^*} \leq 0,612 \\ \varphi &= \frac{1,630,63}{n} - \frac{t}{n t^*}, \text{ при } \frac{t}{t^*} > 0,612 \end{aligned} \right\}, \quad (15)$$

где t — толщина пластины, мм;

$$t^* = \frac{a}{100} \sqrt{\frac{1,6 R_{eH}}{78,5}} \text{ — минимальная тол-}$$

щина, при которой пластина не теряет устойчивости даже при напряжениях, равных R_{eH} ;

R_{eH} — предел текучести материала, МПа;

a — длина короткой стороны пластины, мм;

$$n = \frac{|\sigma_m|}{R_{eH}} \text{ — уровень сжимающих напря-}$$

жений в жестких связях;

σ_m — напряжения в жестких связях.

Если в жестких связях имеют место остаточные напряжения ($\sigma_{\text{ост}}$), то они будут складываться с напряжениями от изгиба, вы-

званного внешней нагрузкой, и уровень напряжений, действующих на пластину, будет

$$n' = \frac{|\sigma_m + \sigma_{ост}|}{R_{eH}}, \quad (16)$$

а редуccionные коэффициенты гибкой части пластин с учетом остаточных напряжений будут определяться по формулам

$$\left. \begin{aligned} \varphi' &= \frac{1,6}{n'} \left(\frac{t}{t^*} \right)^2, \text{ при } \frac{t}{t^*} \leq 0,612 \\ \varphi' &= \frac{1,630,63}{n'} - \frac{t}{n' t^*}, \text{ при } \frac{t}{t^*} \geq 0,612 \end{aligned} \right\}. \quad (17)$$

Используя (15)–(17), можно получить выражение, связывающее редуccionный коэффициент пластин с остаточными напряжениями и без них

$$\varphi' = \frac{n}{n + \frac{\sigma_{ост}}{R_{eH}}} \varphi. \quad (18)$$

Следует отметить, что знаменатель в выражении (18) не может быть больше единицы, так как суммарные сжимающие напряжения, действующие на пластину, не могут превышать R_{eH} — предел текучести материала.

Кроме того, если в крайней связи имеют место остаточные напряжения растяжения, то в знаменателе надо ставить знак «–», и так как при продольной системе набора при растяжении редуccionный коэффициент равен единице, то знаменатель в выражении (18) не может быть меньше нуля. Редуccionный коэффициент в этом случае становится больше, чем при отсутствии остаточных напряжений, но не может быть больше единицы.

Изменение работоспособной площади крайней связи можно определить по формуле

$$\Delta F = n_1 a \bar{t}_{ост}^{сеч} (\varphi^{1*} - \varphi^*), \quad (19)$$

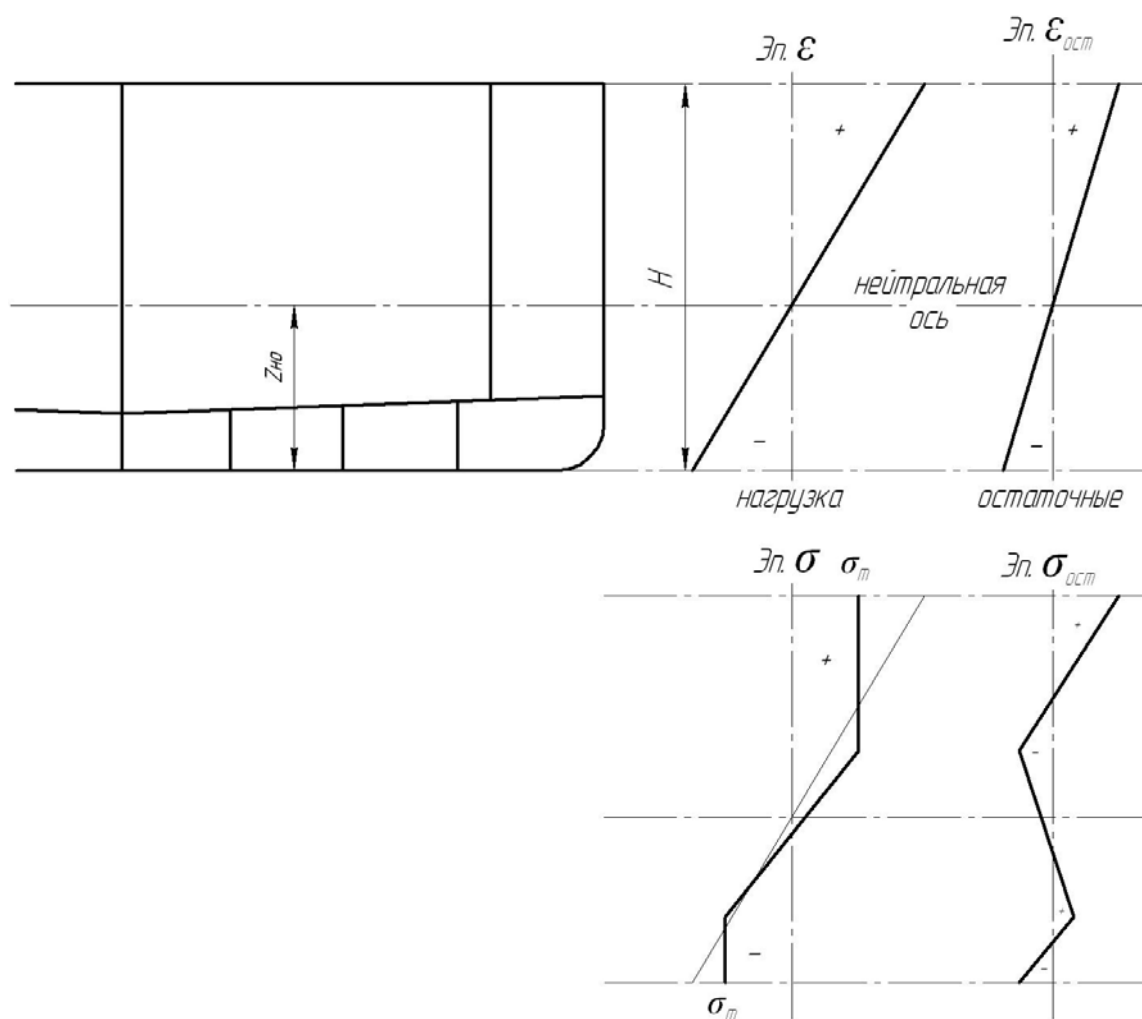


Рис. 6. Эпюры относительных деформаций и напряжений

где n_1 — количество пластин в поперечном сечении крайней связи эквивалентного бруса;

$\bar{t}_{\text{ост}}^{\text{сеч}}$ — средняя остаточная толщина пластин в крайней связи поперечного сечения.

$$\bar{t}_{\text{ост}}^{\text{сеч}} = \frac{\sum_1^k t_{\text{ост}i} b_i}{\sum_1^k b_i}, \quad (20)$$

$t_{\text{ост}i}$ и b_i — остаточная толщина отдельного листа и его ширина соответственно;

k — количество листов в поперечном сечении крайней связи;

ϕ^* и ϕ^* — редуцированные коэффициенты для всей пластины с учетом остаточных напряжений и без них соответственно

$$\phi^* = \frac{1+\phi'}{2}, \text{ а } \phi^* = \frac{1+\phi}{2}.$$

Пропорционально изменению работоспособной площади лимитирующей крайней связи изменяется момент сопротивления корпуса, а следовательно, и обеспеченность общей прочности.

Анализируя формулу (18) можно заметить, что по мере роста сжимающих напряжений в днище от общего изгиба влияние остаточных напряжений на редуцированный коэффициент пластин уменьшается и прекращается, когда днище становится лимитирующей связью при проверке предельной прочности.

Изменение редуцированных коэффициентов пластин может в значительной степени влиять на уменьшение работоспособной площади днища, если оно не является лимитирующей связью, но в этом случае даже большое уменьшение работоспособной площади днища мало скажется на уменьшении прочности.

Остаточные напряжения сжатия могут вызвать потерю устойчивости продольных ребер жесткости. Для анализа влияния остаточных напряжений преобразуем зависимости из Правил РРР [т. 2] для проверки устойчивости продольных ребер жесткости. Для критических напряжений зависимости имеют вид

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{\text{кр}} &= \sigma_y, \text{ при } \sigma_y \leq 0,6 R_{eH} \\ \sigma_{\text{кр}} &= \left(1,12 - 0,312 \frac{R_{eH}}{\sigma_y} \right) R_{eH}, \text{ при } 0,6 R_{eH} < \sigma_y < 2,6 R_{eH} \\ \sigma_{\text{кр}} &= R_{eH}, \text{ при } \sigma_y \geq 2,6 R_{eH} \end{aligned} \right\} \quad (21)$$

где R_{eH} — предел текучести материала, МПа;

σ_y — Эйлера напряжения при сжатии продольных ребер, МПа:

$$\sigma_y = \frac{\pi^2 EJ}{b^2 (f + at)}, \quad (22)$$

где E — модуль нормальной упругости, МПа;

J — момент инерции площади поперечного сечения ребра с присоединенным пояском 0,5 а, но не более 25 т, см⁴;

f — площадь поперечного сечения ребра без присоединенного пояса, см²;

a — расстояние между продольными ребрами, см;

t — толщина пластины, см;

b — пролет ребра, см.

Эйлера напряжения можно представить в виде

$$\sigma_y = \frac{\pi^2 E}{\lambda^2}, \quad (23)$$

где $\lambda^2 = \frac{b^2}{J / (f + at)}$ — гибкость продольного ребра жесткости.

Тогда минимальную гибкость ребра, при которой оно не будет терять устойчивость даже при сжимающих напряжениях, равных R_{eH} , можно определить по формуле

$$\lambda_{\min} = \sqrt{\frac{\pi^2 E}{2,6 R_{eH}}}. \quad (24)$$

Введем характеристику относительной гибкости, используя (23) и (24):

$$\frac{\lambda_{\min}}{\lambda} = \sqrt{\frac{\pi^2 E \cdot \sigma_y}{2,6 R_{eH} \pi^2 E}} = \sqrt{\frac{\sigma_y}{2,6 R_{eH}}}. \quad (25)$$

Редуцированный коэффициент ребра равен

$$\phi_p = \frac{\sigma_{\text{кр}}}{|\sigma_m|} \leq 1. \quad (26)$$

Выразив его через уровень сжимающих напряжений $n = \frac{|\sigma_m|}{R_{eH}}$, получим

$$\phi_p = \frac{|\sigma_{\text{кр}}|}{n R_{eH}}. \quad (27)$$

Используя (27), (25) и (21), получим выражения для вычисления редуцированных коэффициентов сжатых ребер в зависимости от их относительной гибкости

$$\left. \begin{aligned} \varphi &= \frac{2,6}{n} \left(\frac{\lambda_{\min}}{\lambda} \right)^2, \text{ при } \frac{\lambda_{\min}}{\lambda} \geq 0,48 \\ \varphi &= \frac{1}{n} \left(1,12 - \frac{0,12}{\left(\frac{\lambda_{\min}}{\lambda} \right)^2} \right), \text{ при } 0,48 < \frac{\lambda_{\min}}{\lambda} < 1 \end{aligned} \right\} \cdot (28)$$

По полученным зависимостям построен график для определения редуционных коэффициентов продольных ребер жесткости в зависимости от их относительной гибкости, представленных на рис. 7.

Анализ зависимостей (28) и графиков на рис. 7 показывает, что для изменения реду-

ционных коэффициентов из-за остаточных напряжений можно пользоваться зависимостью (18), и выводы о влиянии остаточных напряжений сжатия в ребрах днища на общую прочность будут такие же, как для пластин при продольной системе набора.

У грузовых судов внутреннего и смешанного плавания поперечная система набора встречается редко. Если она имеет место, то уменьшение работоспособной площади из-за остаточных напряжений можно было бы находить по формуле, аналогичной (19), но так как редуционные коэффициенты пластин при толщинах материала, используемого при постройке судов внутреннего и

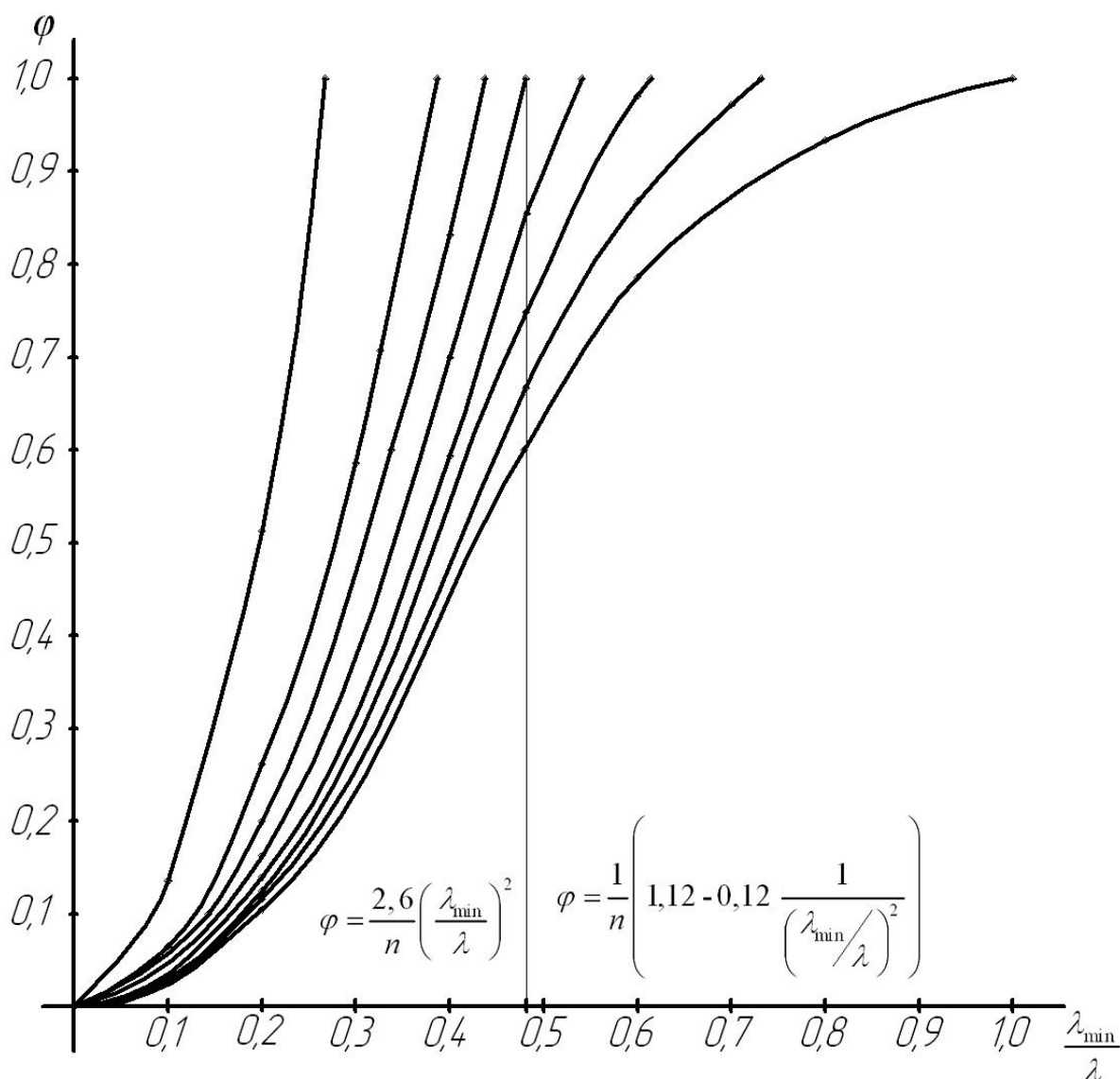


Рис. 7. Редуционные коэффициенты ребер жесткости

смешанного плавания, невелики, и точный расчет их по правилам строительной механики довольно сложен и громоздок, то в Правилах постройки РРР [4] предлагаются значения редуционных коэффициентов пластин, не зависящих от величины сжимающих напряжений, и следовательно, влияние остаточных напряжений в первом приближении можно не учитывать.

В упомянутых Предложениях [4] профессором Г. В. Бойцовым указывается на необходимость учета уменьшения критических напряжений продольного основного набора наружного дна и увеличения коэффициента запаса прочности корпуса про-

порционально коэффициенту

$$k_f = 1 + 0,1 \left[(f_0 / f_{0H}) - 1 \right] \geq 1,$$

где f_0 — остаточный прогиб/перегиб корпуса;
 f_{0H} — нормативное значение остаточного прогиба/перегиба, при превышении которого упомянутый коэффициент следует учитывать.

Предлагаемый способ непосредственного определения остаточных деформаций связи палубы и днища, возможно, позволит автору Предложений [4] более полно обосновать или уточнить формулы для уменьшения критических напряжений в ребрах и увеличения коэффициента запаса прочности.

Список литературы

1. Гунин И. А. Влияние остаточных и температурных прогибов корпуса судна на изгибающий момент от внешних сил // Тр. ЛИВТа. — Л.: Речной транспорт, 1960. — Вып. VI.
2. Лопырев Н. К., Немков П. П., Сумеркин Ю. В. Технология судоремонта. — М.: Транспорт, 1981.
3. Чистов В. Б. Технология ремонта корпусов судов: [конспект лекций] / ЛИВТ. — Л., 1978.
4. Российский речной регистр. Предложения по дополнению «Правил РРР о порядке нормативного учета остаточных общих деформаций корпуса при установлении требований к его прочности».
5. Барышников С. О., Карклина Т. О., Чистов В. Б. Заявка на патент № 2010106960 от 24.02.2010 г. «Способ определения остаточного продольного изгиба корпуса судна».
6. Барышников С. О., Карклина Т. О., Чистов В. Б. Определение остаточного общего прогиба (перегиба) корпуса судна.
7. Чистов В. Б. Сопротивление материалов: конспект лекций. — СПб.: СПГУВК, 2007. — 224 с.
8. Карклина Т. О. Технологические методы стабилизации метрологических характеристик танкеров: дис. ... канд. техн. наук. — Л.: ЛИВТ, 1991.
9. Барышников С. О. Влияние износа корпуса на обеспечение его общей прочности.
10. Российский речной регистр. Правила: в 4 т. — 2008. — Т. 2.

КРИТЕРИАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ И ФОНОВЫЕ ПРОГНОЗЫ
ПЕРЕФОРМИРОВАНИЯ РУСЕЛ РЕКCRITERIA AND BACKGROUND FORECASTS OF THE RIVER
CHANNEL REFORMATIONS

В статье приводится анализ возможности использования критериальных и гидроморфологических зависимостей, учитывающих тип речных русел и представленных в виде некоторых констант и критериев динамического подобия.

The analysis of the using possibility of criterial and hydromorphological relationships taking into account of the river channel type and presented as some constants and criteria of the dynamic similarity is presented in the paper.

Ключевые слова: перестройка русел, прогноз, руслообразующие факторы, речные русла, типизация, меандрирование.

Key words: beds reformation, forecast, bed-formation factors, river channels, typification, meandering.

В ИНФОРМАЦИИ о перестройке русел и пойм рек нуждаются практически все отрасли хозяйства страны, так или иначе связанные с использованием рек и водных ресурсов.

Естественные реки, как правило, находятся в состоянии, близком к состоянию динамического равновесия. Деформации при этом являются обратимыми, то есть определяются транзитом наносов. И прогнозы русловых перестроек могут составляться по ранее наблюдавшимся тенденциям в условиях сложившегося многолетнего режима жидкого и твердого стока. В естественных условиях изменения крупных русловых форм протекают медленно и проявляются в морфологии речных долин. Под влиянием хозяйственной деятельности интенсивность этих процессов может резко возрасти.

Нарушение состояния динамического равновесия возможно в случае изменений факторов руслообразования: водного режима, стока наносов, ограничивающих условий (выходы неразмываемых пород, изменение базиса эрозии, искусственные сооружения). Вследствие этого возникает необратимый процесс, состоящий в качественной перестройке реки. Происходит преобразование морфологического строения русла и поймы, возвращающее

реку в состояние динамического равновесия, что является проявлением ее саморегулирования. Количественные и качественные изменения в русловом процессе, вызванные нарушением естественного водного режима, могут распространяться на большие расстояния.

Так, в связи с регулированием стока, охватывающего нередко целые речные системы, возникает необходимость в оценке деформаций на участках длиной в десятки и сотни километров. В этих условиях прогноз может быть лишь фоновым, то есть характеризующим общие тенденции и определяющим только осредненные характеристики русловых процессов на большие сроки вперед.

Гидролого-морфологический подход, разработанный в ГГИ [5], позволяет при прогнозировании наряду с законами гидравлики учитывать и закономерности природной среды, в которой эти законы действуют. При этом подходе ставится и решается морфологическая задача — определение формы русла, типа руслового процесса, основных морфометрических и гидроморфологических характеристик в зависимости от существующего жидкого и твердого стока. Учет геоморфологической обстановки и режимных факторов, управляющих процессами, позволяет составлять долгосрочные прогнозы русловых пере-

формирований на больших по протяжению морфологически однородных участках рек. Гидродинамическое воздействие потока на размыв русел рек рассматривается при этом как внутреннее звено в причинно-следственных связях. Гидродинамические силы сами определяются условиями водного режима и действуют в среде, подчиненной законам геоморфологии. В этом заключается преимущество используемого подхода.

Составление фоновых прогнозов русловых переформирований при изменении одного или нескольких основных руслообразующих факторов (сток воды, наносов и ограничивающие условия) производится сравнительно недавно [1; 3; 5]. К настоящему времени известны примеры оценок изменения характера русловых деформаций, их интенсивности и параметров речных русел и потока для случаев регулирования, перераспределения и изменения стока под влиянием гидротехнических сооружений и крупных водохозяйственных мероприятий (как при увеличении, так и при уменьшении водности рек), а также в случае изменения положения базиса эрозии (уклона) реки [1; 3; 5]. Этот подход является перспективным и для решения задач, связанных с изменением стока рек вследствие возможного потепления климата. При этом в качестве основного инструмента используются критериальные и гидроморфологические зависимости, учитывающие тип речных русел.

Выявлению и получению критериальных характеристик (зависимостей), необходимых для составления прогнозов, способствовало появление типизаций речных русел [5; 7; 8]. Основа современных типизаций заложена в работах К. И. Россинского и И. А. Кузьмина, которые выделили прямолинейные (слабоизогнутые), извилистые и разбросанные русла и установили главные черты их деформаций: периодическое расширение в первых, развитие излучин-меандр во вторых и блуждание в третьих.

В нашей стране наиболее разработанными и получившими распространение являются типизация русловых процессов ГГИ (предложенная Н. Е. Кондратьевым и И. В. Поповым) и типизация МГУ (авторы Н. И. Макаев и Р. С. Чалов), типизация разработанная

в Российском университете дружбы народов Н. А. Ржаницыным и др. Типизация ГГИ в последующем была расширена И. Ф. Карасевым, который к семи типам динамического равновесия русел (выделенных Кондратьевым и Поповым) добавил два типа русел из классификации А. В. Караушева: русла с глубинной эрозией и русла с необратимой аккумуляцией.

За рубежом известны типизации Л. Б. Леопольда и М. Г. Вольмана, С. Читале, Д. Саймонса, П. Бондуранта. Типизация русловых процессов по Бондуранту, официально принятая в США Проблемным комитетом по наносам при секции гидравлики Американского общества гражданских инженеров, мало отличается от типизации русловых процессов ГГИ.

Первый критериальный график построили американские исследователи Л. Б. Леопольд и М. Г. Вольман. Они установили, что меандрирующие реки переходят в прямолинейные и разветвленные русла при определенном сочетании уклонов и средних из максимальных годовых расходов воды. Близкая зависимость с учетом рек Чехословакии получена Я. Балеком и В. Коларжом, а для рек Германии — И. Целлером.

И. И. Якунин первым из отечественных ученых обратил внимание и оценил по достоинству график Леопольда и Вольмана. Он же ратовал за разработку подобного графика для рек СССР с использованием типизации русел ГГИ и за применение такого рода зависимостей при составлении прогнозов русловых переформирований рек с зарегулированным стоком [9]. Критериальный график для участков рек СССР с различными типами русловых процессов построен В. В. Ромашиным [6].

В последующем в результате рассмотрения многочисленных связей морфометрических и гидравлических характеристик с определяющими факторами были установлены закономерности разграничения типов русловых процессов [1–3; 5; 8]. Сделан вывод о том, что на графиках, соответствующих исходной информации, точки довольно четко группируются по типам русловых процессов, если хотя бы по одной из осей откладывать уклон или выражение, содержащее его. Графики строились на двуслойной логарифмической клетчатке, поскольку разделяющие линии представляют

собой степенные зависимости. Выражая разделяющие линии аналитически (с помощью одного из вариантов метода наименьших квадратов), получаем систему зависимостей, определяющих переход свободного меандрирования в незавершенное и незавершенного в русловую и пойменную многорукавность [3].

Критериальные зависимости типов речных русел, представленные в графическом виде, по своей сущности напоминают известные в физике диаграммы фазовых превращений (кривые фазовых переходов) веществ в природе. Примером может служить известная диаграмма фазовых превращений воды (в виде жидкости, пара и льда), где определяющими факторами являются давление и температура. Таким образом, критериальные значения сочетаний основных руслоформирующих факторов представляют собой динамические комплексы, определяющие фазовое состояние русловых процессов.

В качестве примера можно отметить наличие критериальных значений некоторых энергетических характеристик, являющихся следствием ранее установленных критериальных значений средней скорости потока (соответствующих средним паводочным расходам воды): $v_{cp} \approx 1,20 \div 1,30$ м/с при переходе свободного меандрирования в незавершенное и $v_{cp} \approx 2,00 \div 2,10$ м/с при переходе незавершенного меандрирования в многорукавное русло [3].

Так динамическая скорость потока $v^* = \sqrt{gh_{cp}I}$, отличающаяся от средней скорости делителем $\frac{c}{\sqrt{g}}$, может быть представлена для указанных переходов выражениями

$$\frac{v_{cp}}{c/\sqrt{g}} = \frac{1,2 \div 1,3}{c/\sqrt{g}} \text{ и } \frac{2,0 \div 2,1}{c\sqrt{g}}.$$

Удельная кинетическая энергия потока $E_{кин} = \frac{\alpha Q^2}{2g\omega^2} = \frac{\alpha v_{cp}^2}{2g}$, а еще лучше выражение $E_{кин} = \frac{v_{cp}^2}{2g}$, являющееся скоростным напором h_v , также имеют критериальные значения.

При этом получается, что скоростной напор на границе русел со свободным и незавершен-

ным меандрированием $h_v = \frac{v_{cp}^2}{2g} = \frac{(1,25)^2}{2g} \approx 0,008$ м примерно в 2,5 раза меньше скоростного напора на границе незавершенного меандрирования с русловой и пойменной многорукавностью $h_v = \frac{(2,05)^2}{2g} \approx 0,214$ м.

Получены критериальные зависимости вида: $1/\sqrt{B} = AI_0^b$, обоснование которых содержится в работе К. В. Гришанина [4]. В случае постоянного или слабоменяющегося уклона коэффициент Шези здесь растет пропорционально корню квадратному из скоростей. Значение же уклона меняется от одного участка к другому обратно пропорционально корню квадратному из ширины русла:

$$I \sim \frac{1}{\sqrt{B}}.$$

В данной работе уклон водной поверхности I заменен более устойчивой характеристикой — уклоном дна долины I_0 . При этом резко увеличивается число гидростворов, по которым оказалось возможно использовать данные при получении критериальных зависимостей. Интересно, что одно и то же значение ширины B наблюдается при уклонах долины I_0 , примерно в 3,5 раза больших на границе многорукавных и незавершенно меандрирующих русел по сравнению с уклонами на границе свободного и незавершенно меандрирования.

Получены критериальные зависимости вида: $h_{cp} = A(BI_0)^b$. Эти зависимости являются более надежными по сравнению с полученными ранее [3]: $h_{cp} = AI_0^b$. Этого и следовало ожидать, исходя из выражения для касательной силы, приведенной к единицы длины реки $T = \gamma B h_{cp} I$, имеющей постоянные значения на границах перехода русловых процессов из одного типа в другой [3]. Оказалось, что при одном и том же значении произведения (BI_0) средние глубины при переходе незавершенно меандрирования в русловую и пойменную многорукавность в два раза больше, чем имеют место при переходе свободного меандрирования в незавершенное.

Показано [2], что критериальные характеристики руслового процесса: средняя ско-

рость течения, касательная сила, приведенная к единице длины потока, и удельная мощность потока, могут быть представлены в виде про-

изведения некоторых констант и критериев динамического подобия. Область применения критериальных характеристик расширяется.

Список литературы

1. Антроповский В. И., Минаева Г. Н. Фоновый прогноз переформирования перекатов на р. Вилуе в условиях зарегулированного стока // Тр. ГГИ. — 1974. — Вып. 216. — С. 52–64.
2. Антроповский В. И. Связь характеристик руслового процесса с критериями динамического подобия // Динамика русловых потоков: межвуз. сб. науч. тр. — Л.: Изд-во ЛПИ (ЛГМИ), 1987. — С. 96–102.
3. Антроповский В. И. Гидролого-морфологические закономерности и фоновые прогнозы переформирования русел рек. — СПб., 2006. — 216 с.
4. Гришанин К. В. Динамика русловых потоков. — Л.: Гидрометеиздат, 1974. — 311 с.
5. Кондратьев Н. Е., Попов И. В., Сущенко Б. Ф. Основы гидроморфологической теории руслового процесса. — Л.: Гидрометеиздат, 1982. — 272 с.
6. Ромашин В. В. Типы руслового процесса в связи с определяющими факторами // Тр. ГГИ. — 1968. — Вып. 155. — С. 56–63.
7. Россинский К. И., Кузьмин И. А. Речное русло // Гидрологические основы речной гидротехники. — М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1950. — С. 52–97.
8. Чалов Р. С. Морфодинамика русел равнинных рек / Р. С. Чалов [и др.]. — М.: ГЕОС, 1998. — 228 с.
9. Якунин И. И. Применение гидроморфологических зависимостей к оценке переформирования русла р. Иртыша под влиянием регулирования стока // Тр. ГГИ. — 1961. — Вып. 88. — С. 4–58.
10. Leopold L. B., Wolman M. G. River-channel patterns: braided, meandering and straight // U. S. Geolog. Surv. Prof. Paper. — № 282-B.

УДК 556.537: 551.435.11

А. Ю. Сидорчук,
д-р географ. наук, ст. науч. сотр.,
Московский государственный университет
им. М. В. Ломоносова

МЕТОД МАЛЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ В ТЕОРИИ РУСЛОВОГО ПРОЦЕССА

METHOD OF SMALL PERTURBATIONS IN THE CHANNEL PROCESS THEORY

Методом малых возмущений проведен анализ начальной неустойчивости потока и размываемого дна на основе уравнений плановой гидравлики, записанных в криволинейной ортогональной системе координат с учетом эффектов динамического давления и поперечной циркуляции. Получены области неустойчивости донных волн пяти основных типов и теоретические зависимости размеров этих волн от гидравлических характеристик потока. Сравнение теории с эмпирическими данными по иерархическому комплексу русловых форм в реках и больших лотках показало возможность использования метода малых возмущений для создания теоретической классификации руслового рельефа.

The analysis of flow initial instability and erodible bottom is realized by the small perturbations method. It based on the planned hydraulics equations write down in curvilinear orthogonal co-ordinates and taking into account of the dynamic pressure effect and transverse circulation. Five base types of the bed wave instability and their theoretical relation on hydraulic characteristics are received. Taking into account of the channel forms hierarchy actual data in rivers and in a large flume are compared. It shows an opportunity to use the small perturbations method for the classification of the channel relief.

Ключевые слова: русловой процесс, поток, русло, донные волны, русловые формы, гидравлические характеристики потока.

Key words: river bed evolution, stream channel, ground waves, river bed shapes, hydraulic stream characteristics.

МЕТОДОМ малых возмущений проведен анализ начальной неустойчивости потока и размываемого дна на основе уравнений плановой гидравлики, записанных в криволинейной ортогональной системе координат с учетом эффектов динамического давления и поперечной циркуляции. Получены области неустойчивости донных волн пяти основных типов и теоретические зависимости размеров этих волн от гидравлических характеристик потока. Сравнение теории с эмпирическими данными по иерархическому комплексу русловых форм в реках и больших лотках показало возможность использования метода малых возмущений для создания теоретической классификации руслового рельефа.

В теории руслового процесса центральным является постулат М. А. Великанова о взаимодействии потока и русла. Наиболее близкие к современным воззрениям формулировки этого постулата находим у Н. И. Макавеева [3, с. 137]: «В наиболее общей форме процесс руслообразования можно определить как процесс “отображения” поверхностью твердой среды (т. е. грунтами, слагающими ложе) особенностей движения воды и перемещаемых ею наносов». Для описания этого явления предложено множество методов, но только метод малых возмущений, по выражению К. В. Гришанина [1, с. 62], «...поставил, наконец, решение этой проблемы на научную основу».

Анализ главных работ по использованию метода малых возмущений в теории руслового процесса приводит к следующим выводам:

1) метод предельно чувствителен к степени упрощения уравнений гидродинамики при выводе уравнений двумерной гидравли-

ки. При осреднении по глубине трехмерных уравнений необходимо максимально сохранить влияние таких эффектов, как динамическое давление и поперечная циркуляция;

2) форма уравнений должна быть тако-
ва, чтобы процедура линеаризации уравнений могла быть проведена с минимальной потерей членов;

3) геометрия малых возмущений гидравлических характеристик должна быть задана в максимально общей форме, чтобы спектр волн возмущений был непрерывен как в продольном, так и поперечном направлениях.

В наиболее общей форме интегрирование по глубине трехмерных уравнений движения и неразрывности потока в криволинейных ортогональных координатах провел Н. А. Картвелишвили [2]. Анализ малых возмущений потока и русла в рамках этих уравнений проводится в стандартной форме с дополнительным учетом неустойчивости размываемого дна. Компоненты скорости, отметки поверхности воды и дна, кривизна ортогональных координат записываются в виде суммы двух составляющих — для основного осредненного потока и русла, и для возмущения. Результирующая система уравнений для возмущений потока и русла линеаризуется — члены, содержащие произведения и степени компонент возмущений отбрасываются. Использование криволинейных ортогональных координат позволило сохранить при линеаризации члены, содержащие кривизну свободной поверхности, и элементы поперечного перемещения потока.

Как принято в линейной теории начальной неустойчивости, возмущения компонент скорости течения, отметок поверхности потока и дна считаются малыми и описывают-

ся продольными синусоидальными волнами. Форма возмущений в поперечном направлении определяется из линеаризованных уравнений двумерной гидравлики. Их преобразования приводят к обыкновенному дифференциальному уравнению второй степени относительно функции, которая описывает изменение поперек потока возмущений свободной поверхности. Для этой функции граничные условия у берегов потока могут быть не равными нулю. Это определяет непрерывность спектра возмущений, как в продольном, так и поперечном направлениях. В таком случае дифференциальное уравнение второй степени имеет нетривиальные решения при всех действительных собственных значениях и сводится к дисперсионному линейному алгебраическому уравнению для комплексной скорости волн возмущений.

Дисперсионное уравнение решалось численно для широкого диапазона гидравлических характеристик потока, продольных и поперечных волновых чисел. При этом рассматривались только наиболее медленные неустойчивые волны, которые могут отображаться в рельефе речного русла. Выделено несколько областей неустойчивых волн дна русла (скорость роста амплитуды во времени положительна) с различными типами зависимостей между их длиной, шириной и гидравлическими характеристиками потока:

1. Область ультрамикроформ — двумерных и трехмерных коротковолновых возмущений с хорошо выраженным максимумом скоростей роста амплитуды волн при длинах порядка глубины потока. Ей соответствуют многочисленные данные экспериментов о характеристиках рифелей в больших лотках и на реках. Антидюны также соответствуют ультрамикроформам, так как антидюны фактически являются рифелями, которые формируются в потоках с высокой кинетичностью.

2. Область микроформ — трехмерных изометричных возмущений. Этой области в натуральных реках и лотках соответствуют дюны и заструги. Они видны на спектрах отметок дна рек в виде локальных максимумов спектральной плотности. Такие максимумы отсутствуют на теоретическом спектре возмущений, в области микроформ нет пред-

почтительной длины волны с наибольшей скоростью роста амплитуды. Появление этих максимумов в донном рельефе реальных рек объясняется нелинейными эффектами взаимодействия потока и русла.

3. Область мезоформ — трехмерных вытянутых в плане возмущений. Степень вытянутости увеличивается с увеличением длины волны возмущения. В область мезоформ ложатся как крупные донные формы в реках — шалыги, так и русловые формы, влияющие на конфигурацию меженного русла, — песчаные волны, осередки и побочни. Граница между крупными донными формами и мелкими русловыми формами в естественных реках достаточно неопределенная. Для такого рода русловых образований важно определить верную номенклатуру, так как длина микроформ и мелких мезоформ увеличивается с увеличением кинетичности потока, а длина крупных мезоформ и макроформ уменьшается при увеличении числа Фруда.

4. Область макроформ — трехмерных возмущений с хорошо локализованным максимумом скорости роста амплитуды волны. Эти волны также вытянуты в плане, и степень вытянутости зависит от гидравлического сопротивления, кинетичности потока и интенсивности поперечной циркуляции. Области макроформ соответствуют крупным побочни и осередки, острова и излуины русла. Измерения на естественных реках показывают, что длина побочней, островов и меандров обычно меньше, чем длина волн наиболее вероятных возмущений в области макроформ. Скорость роста амплитуды макроформ определяется не только начальной неустойчивостью, но и вторичными нелинейными эффектами, влиянием ширины русла, размыва берегов и горизонтальных деформаций русел.

5. Область мегаформ — трехмерных длинноволновых возмущений со слабо выраженным максимумом скорости роста амплитуды. Характеризуются значительной вытянутостью по потоку. А в естественных руслах мегаформами может быть образована параллельная рукавность, выделяемая на Оби, нижней Лене и нижней Волге. Она формируется в широком и относительно неглубоком русле, когда на значительном расстоянии река про-

текает двумя (несколькими) рукавами, слабо связанными между собой лишь короткими поперечными протоками и разделенными цепью островов или пойменными массивами.

Метод малых возмущений позволяет показать, как континуум волн и вихрей в потоке «отображается» в размываемом русле в виде континуума русловых форм самых различных размеров, от ряби и рифелей до меандров и систем разветвлений рукавов рек. К. В. Гришанин [1, с. 47] полагает, что «неравномерный рост возмущений с различными длинами волн приводит к выделению доминирующей длины волны и тем самым преобразует широкий спектр возмущений скорости в узкополосный спектр возмущений поверхности дна». В некоторых случаях взаимодействие потока и русла приводит к сужению спектра русловых

образований относительно спектра структур потока — таково образование ультрамикрочерн. В других случаях широкому диапазону размеров структур потока соответствует также широкий диапазон длин русловых черн — таковы микрочерны и мезочерны. Для этих русловых образований объективно сложно найти однозначные связи с гидравлическими характеристиками потока. Третий вариант процесса — макроформы. Здесь взаимодействие потока и русла приводит к преобразованию широкого спектра возмущений скорости в узкий спектр возмущений поверхности дна, однако нелинейные эффекты приводят к значительному смещению «линий» этого спектра. При этом наряду с первым внутренним масштабом, глубиной русла появляется второй внутренний масштаб — ширина потока.

Список литературы

1. Гришанин К. В. Устойчивость русел рек и каналов. — Л.: Гидрометеиздат, 1974. — 143 с.
2. Картвелишвили Н. А. Потоки в недеформируемых руслах. — Л.: Гидрометеиздат, 1973. — 279 с.
3. Маккавеев Н. И. Русло реки и эрозия в ее бассейне. — М.: Изд-во АН СССР, 1955. — 346 с.

УДК 556.535.6

З. Д. Копалиани,

канд. техн. наук., ст. науч. сотр.,
Государственный гидрологический институт
(Санкт-Петербург);

М. М. Жук,

Государственный гидрологический институт
(Санкт-Петербург)

К ПРОБЛЕМЕ ОЦЕНКИ СТОКА РУСЛОВОГО МАТЕРИАЛА В РЕКАХ

ON THE PROBLEM OF THE BED LOAD YIELD ASSESSMENT IN RIVERS

Предложен метод оценки стока донных наносов на основе использования стандартной гидрометрической информации, получаемой на гидрологической сети Росгидромета. Для четырех гидрометрических створов Нижней Кубани получены региональные зависимости для расчета расхода и годового стока донных наносов, а также многолетние кривые зависимости годового стока донных наносов от годового стока воды.

Method of the bed load discharge assessment based on the conventional hydrometric measurements made on the state Hydrological network is proposed. Regional relationships for the computation of the bed load discharge and annual yield as well as multi-annual bed-load–water volume curves are derived for the lower Kuban River four sites.

Ключевые слова: речная гидравлика, сток руслового материала, расход наносов, гранулометрический состав, формы транспорта наносов.

Key words: river hydraulics, flow of bed material, sediment transport rate, granulometric composition, sediment transport shapes.

ОЦЕНКА стока руслового материала в реках является центральной проблемой современной речной гидравлики, теории руслового процесса и транспорта наносов в речных руслах, до сих пор не нашедшая удовлетворительного решения. Повышение надежности и эффективности природоохранных мероприятий и решения многочисленных и разнообразных задач, связанных с реками, напрямую зависит от качества и точности методов расчета характеристик стока руслового материала и русловых деформаций в речных системах в естественных и измененных хозяйственной деятельностью человека условиях. Это, прежде всего, такие задачи, как проектирование гидроузлов (темпы занесения и заиления водохранилищ и размывы русел в нижних бьефах ГЭС), проектирование, строительство и эксплуатация речных водозаборов, переходов различных коммуникаций через реки (ЛЭП, подводных переходов трубопроводов, мостовых переходов), реконструкция речных русел и пойм в различных целях (увеличение пропускной способности для борьбы с паводками, регулирование русел, спрямление излучин, перекрытие рукавов и т. д.), проектирование и эксплуатация речных карьеров для добычи строительного аллювия, проектирование судоходных прорезей для обеспечения судоходства, оценка объемов стока наносов и пляжеобразующего материала в устьях рек и др.

Решение проблемы оценки стока руслового материала в руслах рек упирается в необходимость решения более частной задачи — создание надежных методов расчета расхода донных наносов в реках. В работе [11] выполнен подробный обзор этой проблемы и дан анализ причин ее неудовлетворительного состояния. Показано, что около 200 расчетных методов, зависимостей и рекомендаций, разра-

ботанных к настоящему времени зарубежными и отечественными исследователями, при их практическом применении дают весьма противоречивые результаты, различающиеся в десятки и сотни раз. Перечисленные в работе [11] трудности (несогласованность терминологии, неоднозначность методов расчета форм и видов транспорта наносов, степени их подвижности и сортировки в процессе перемещения, отсутствие надежных данных измерений и недостаточный учет специфики равнинных и горно-предгорных, больших, средних и малых рек и др.) еще больше усугубляются при переходе к более общей задаче определения стока руслового материала в реках. Здесь дополнительные сложности связаны с необходимостью учета гидрологического режима реки — изменчивостью гидравлических характеристик и режима транспорта руслового материала для каждой фазы водности: межени, половодья, паводков, фаз подъема, пика и спада уровня (расходов) воды, их продолжительности и интенсивности, а также характеристик многолетних колебаний водного режима.

Существуют различные подходы к решению задачи оценки расхода и стока руслового материала в руслах рек при наличии, недостаточности и отсутствии данных наблюдений и измерений.

Наряду с данными измерений батометрами различных конструкций для определения расхода и стока донных наносов широко используется объемный метод, основанный на данных занесения наносами водохранилищ и отстойников руслоперегораживающих сооружений, карьерных выемок, совмещения карт и русловых съемок различных лет и дат съемок, эхолотирования русла с перемещающимися по дну русловыми микро- и мезоформами. Вопросы, связанные с методикой определения характеристик стока донных наносов пе-

речисленными методами, освещены в работах [4; 13; 14; 17; 19–22].

Часто величина стока донных наносов определяется как некоторая доля (в процентах) от общего объема стока наносов. При этом, указанное процентное соотношение назначается произвольно [17; 19–21]. В работе [10] предложена методика количественного определения соотношения расходов донных и взвешенных наносов в реках.

Метод оценки стока влекомых наносов на неизученных реках, предложенный в работах И. И. Алексеевского [1–3] в МГУ, вызывает существенные возражения, а количественные оценки стока влекомых наносов и соотношений стока влекомых и взвешенных наносов, полученные на основе этого метода для крупных рек России, в ряде случаев представляются сомнительными [3; 18]. Возражение вызывает принятая Алексеевским схематизация руслового рельефа с выделением пяти порядков гряд А, Б, В, Г, Д со смешением мезоформ и микроформ (активных и пассивных форм транспорта донных наносов). Определение морфометрических и гидравлических характеристик русла и геометрических и динамических характеристик руслового рельефа в этом методе производится косвенно через порядки водотоков, которые, в свою очередь, определяются далеко не однозначно, что вносит неопределенность в расчеты. Отсутствие самой процедуры выполнения расчетов (примеров) в публикациях И. И. Алексеевского и Р. С. Чалова [1–3; 18] не позволяет оценить достоверность этого метода и точность результатов расчетов.

Наиболее взвешенные оценки реального положения, сложившегося за последние 50 лет в научной литературе, освещающей различные аспекты проблемы оценки, расчетов и прогнозов расхода и стока руслового материала в речных руслах, представлены в фундаментальных трудах К. В. Гришанина [5–8].

Так, в отличие от чрезмерно оптимистичных оценок состояния этой проблемы в работах некоторых авторитетных зарубежных исследователей, являющихся авторами методов и формул, вошедших в соответствующий Национальный стандарт США, считающих возможным рассчитывать расход и сток дон-

ных наносов в реках с точностью до 15 % [23], Гришанину принадлежит наиболее трезвый, глубоко обоснованный анализ и ценные замечания о реальном положении дел и возможных путях терпеливого продвижения вперед знаний и методов количественной оценки расхода и стока донных наносов в реках. Так, в монографии [8], изданной в 1990 г., Гришанин отмечал: «Сегодня при применении формул расхода влекомых наносов к естественным потокам приходится встречаться с ошибками, исчисляемыми десятками, а иногда и сотнями процентов. Нам остается лишь терпеливо работать над совершенствованием методов расчета. На выполнение этой программы может уйти несколько десятилетий. Но даже когда она будет выполнена, точность расчета расхода наносов останется далекой от точности обычных инженерных расчетов. Большим успехом будет возможность рассчитывать расходы наносов в реках, ошибаясь менее чем в 1,5 раза».

Отправным моментом при выполнении данного исследования послужил часто повторяющийся в работах Гришанина тезис об актуальности и целесообразности развития региональных методов и формул расчета расхода руслового материала [6; 8]. В работе [6] Гришанин пишет: «Единственный возможный в настоящее время выход из этого положения состоит в создании и применении региональных формул расхода наносов. Эти формулы должны иметь максимально простую структуру и не содержать более одного-двух эмпирических параметров. Отражая в недифференцированной форме влияние всей совокупности местных условий, эти значения будут действительны лишь в пределах того участка реки, где сделаны измерения» и там же ниже: «Применение региональных формул есть, разумеется, временная мера, обусловленная недостатком наших знаний о транспорте наносов. Она не должна внушать пессимистического отношения к возможностям теории. Накопление региональных зависимостей может дать полезный материал для обобщений». Наряду с отмеченным, вторым отправным стимулирующим моментом для выполнения данного исследования послужил тот факт, что Гришанин во всех своих публикациях

в качестве наиболее обоснованного метода для расчета расхода донных наносов при грядовой форме транспорта донных наносов (основной форме транспорта руслового материала в реках) из множества существующих предложений неизменно рекомендовал зависимости ГГИ для скорости перемещения гряд, их высоты и расхода донных наносов начиная с 1979 г. (момента появления этого метода) [11; 15; 16].

Цель настоящего исследования состояла в разработке региональных зависимостей для расчета расхода и стока донных наносов (руслового материала, перемещающегося в грядовой форме) в гидрометрических створах нижней Кубани на основе использования стандартной информации, получаемой на гидрологической сети Росгид-

ромета: измеренных расходов воды, данных о крупности донных и взвешенных наносов, мутности и расходе взвешенных наносов.

По данным наблюдений Росгидромета, гранулометрический состав донных отложений на нижней Кубани изменяется существенно во времени и в пространстве, приспосабливаясь к внутригодовым изменениям

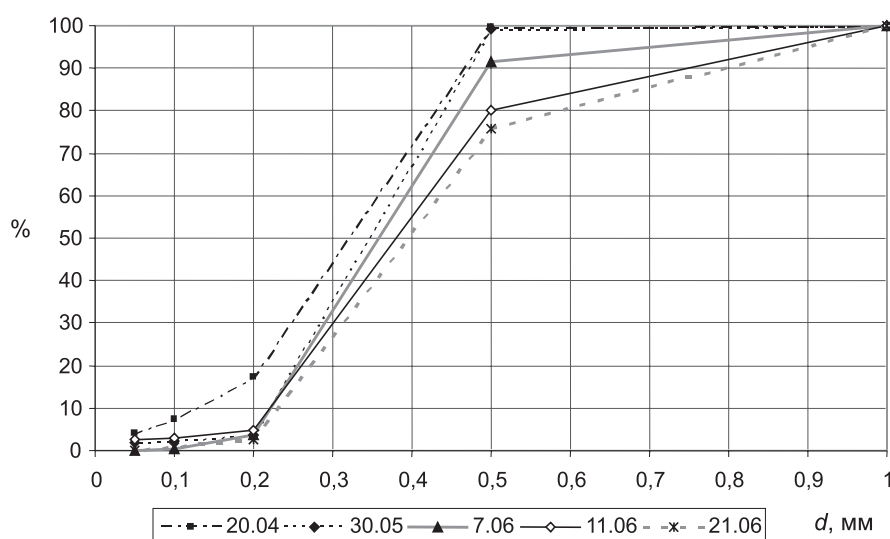


Рис. 1. Гранулометрический состав донных наносов
р. Кубань у г. Краснодара (в 60 м от П. Н. в. п.)

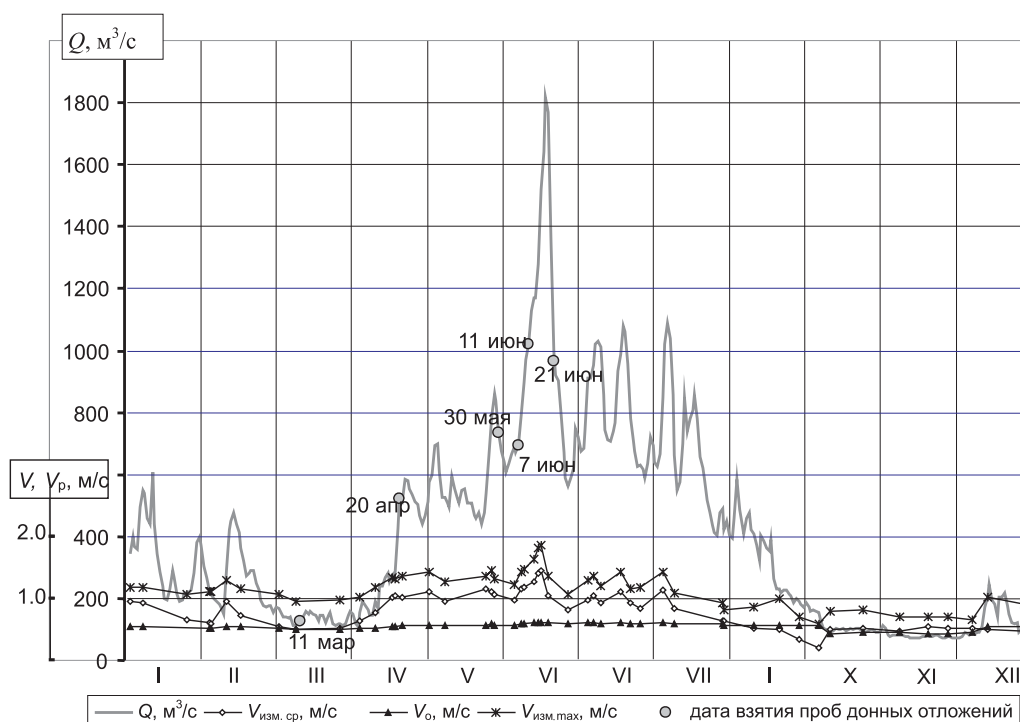


Рис. 2. Годовой сток воды р. Кубань у г. Краснодара, 1966 г.

гидрологических и гидравлических условий на различных участках и частях русла.

На рис. 1 в качестве примера представлены кривые гранулометрического состава проб донных отложений р. Кубань у г. Краснодара, взятых в 1966 г. в точке, отстоящей на 60 м от постоянного начала в створе гидрометрического поста за различные даты, соответствующие различным расходам воды в реке (см. рис. 2).

Как следует из рис. 1, на всех кривых можно выделить три участка с интервалом крупностей 0,05–0,20 мм; 0,20–0,50 мм и 0,50–1,00 мм. Самая мелкая часть проб крупностью менее 0,20 мм на всех кривых составляет менее 5 %, за исключением пробы, взятой в начале половодья (20 апреля), когда она составляла 17 %. Значение диаметра 50 % обеспеченности для отдельных проб в различные даты меняется в пределах 0,32–0,40 мм, увеличиваясь по мере прохождения половодья. Доля крупных частиц (0,50–1,00 мм) в пробах донных отложений также закономерно увеличивается по мере прохождения половодья от 0 до 25 %. По данным измеренных расходов воды в гидрометрическом створе р. Кубань у Краснодара (50 измерений в 1966 г.), на рис. 3 нанесены кривые $V=f(H)$ максимальных и средних ско-

ростей потока в отмеченном поперечном сечении русла и неразмывающие скорости потока в этом сечении $V_0=f(H)$ для средних значений гранулометрического состава донных отложений $d_{50\%}$, отобранных в различных частях русла в этом створе (11.06.1966 г.) в 60, 120 и 160 м от постоянного начала.

Как видно из рис. 3, значения скоростей потока при средних глубинах русла более 2,0 м, соответствующих расходам воды более 244 м³/с, всегда больше значений неразмывающих скоростей потока. Это означает, что большую часть года донные отложения в русле р. Кубань у г. Краснодара находятся в состоянии движения. Отмеченное наглядно иллюстрируется также нижними кривыми на рис. 2.

Значения неразмывающих скоростей потока для построения соответствующих кривых на рис. 3 определялись по формуле В. Н. Гончарова [16].

Основной формой транспорта песчаного материала, слагающего русло равнинных рек, как отмечалось, является грядовое движение донных наносов в виде гряд-микроформ донного рельефа. Это малоинерционные образования на дне речных потоков, формирующиеся в результате наличия в потоке крупномасштабных турбулентных вихрей длиной

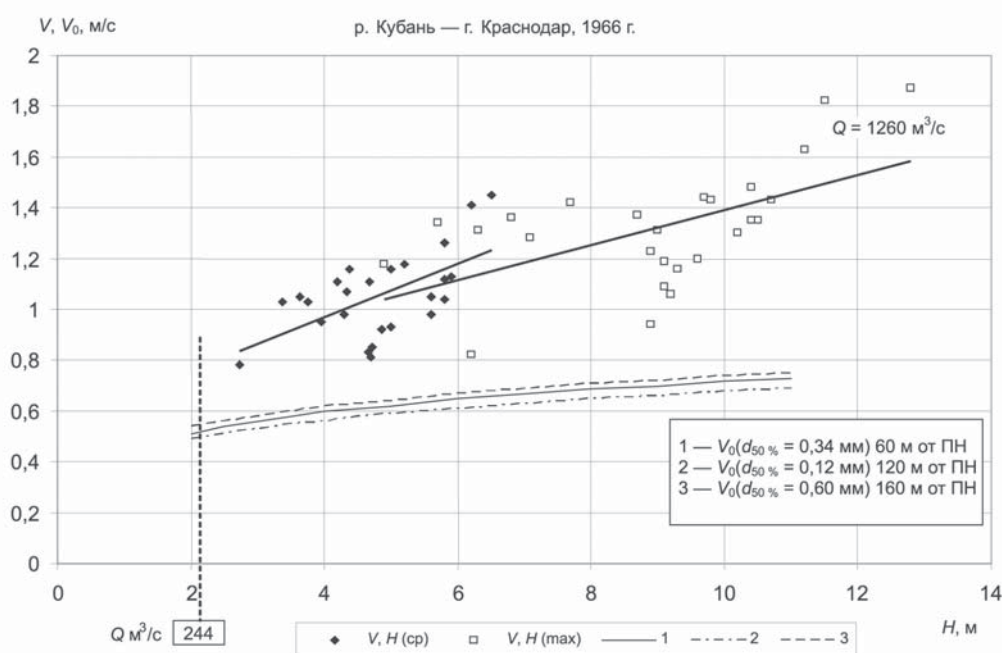


Рис. 3. Максимальные и средние скорости потока в поперечном сечении русла, по данным измеренных расходов воды и неразмывающей скорости потока

несколько глубин потока, соответствующие по размерам (длине) этим вихрям. Длина таких гряд-дюн составляет обычно 2,0–10,0 глубины потока, а их высота 0,08–0,20 глубины. Эти формы обычно соответствуют местному гидравлическому режиму (глубине, скорости) потока на данной вертикали или быстро перестраиваются и приходят в соответствие с изменяющимися гидравлическими характеристиками потока.

На основе многолетних измерений геометрических и динамических характеристик при грядовом транспорте донных наносов в руслах больших, средних и малых равнинных рек (более 20 рек), а также в лабораторных гидравлических лотках и на размываемых моделях речных русел (более 10 исследований) в ГГИ были получены обобщенные зависимости для определения высоты и скорости перемещения гряд установившегося профиля [15; 16].

По последним, уточненным данным [12] для высоты гряд можно принять

$$h_T = 0,13H \quad (1).$$

Скорость их перемещения определяется зависимостью

$$C_T = 0,019vFr^3 \quad (2).$$

На основе этих зависимостей и очевидного равенства

$$q_T = \alpha h_T C_T \quad (3),$$

где: q_T — расход донных наносов, а α — коэффициент формы гряд, равный 0,6, получена зависимость для расчета расхода донных

наносов в грядовой форме (в рыхлом теле) на заданной вертикали в виде [15; 16]

$$q_T = 0,01h_T vFr^3, \text{ м}^3/\text{с}. \quad (4)$$

С целью обоснования метода оценки характеристик транспорта донных наносов (расхода и годового стока) на нижней Кубани в июле 2008 г. ГГИ был выполнен комплекс натурных исследований на различных участках и в ее дельтовых рукавах Кубань и Протока, в ходе которых измерялись геометрические характеристики гряд, глубины и скорости потока над грядами и гранулометрический состав наносов, слагающих эти гряды. Это дало возможность, используя приведенные выше зависимости (1)–(4), рассчитать характеристики грядового движения и расход донных наносов в форме гряд на участках нижней Кубани, где выполнялись натурные исследования. Результаты измерений и расчетные характеристики транспорта наносов на этих участках приведены в табл. 1. Как следует из табл. 1, гряды имеют повсеместное распространение на нижней Кубани, за исключением небольшого подучастка на р. Кубани 165,0–163 км при расходе воды 648 м³/с (17.07.2008 г). критерий подвижности донных наносов по неразмывающей скорости v/v_0 в период производства полевых исследований (6–19 июля) везде имел положительное значение, то есть донные наносы перемещались в форме гряд с геометрическими и динамическими характеристиками, представленными в табл. 1.

Таблица 1

Диапазоны изменения измеренных и расчетных характеристик потока и структурного (грядового) транспорта донных наносов на нижней Кубани

Характеристики потока и гряд	р. Кубань, 165–163 км от устья	р. Кубань, 175–174 км от устья	рукав Кубань, 106–105 км от устья	рукав Протока, 105–104 км от устья
Дата измерений	17.07.08	19.07.08	8.07.08	10.07.08
Расход воды Q , м³/с	648	695	204	261
Количество гряд	52	53	14	17
Длина гряды l_T , м	6,00–19,0	7,00–26,50	7,00–14,0	14,0–25,0
Высота гряды h_T , м	0,20–0,70	0,25–1,30	0,25–0,65	0,45–2,10
Глубина потока над грядой H , м	4,10–7,80	2,30–7,90	3,9–5,0	3,40–6,30
Относительная высота гряд h_T/H	0,03–0,10	0,04–0,25	0,06–0,13	0,10–0,33

Таблица 1
(Продолжение)

Относительная длина гряд l_r/H	1,03–2,86	1,42–5,32	1,79–2,98	2,22–7,35
Средняя скорость потока над грядой V , м/с	0,52–0,81	0,75–0,83	0,81–0,83	0,43–1,02
Критерий подвижности частиц V/V_0	0,86–1,23	1,21–1,44	1,33–1,43	1,29–1,63
Число Фруда $Fr = V/\sqrt{gH}$	0,08–0,09	0,09–0,16	0,12–0,13	0,12–0,15
Скорость движения гряд, м/сут	0,41–1,12	1,04–,85	2,06–3,30	2,32–4,15
Относительная скорость движения гряд V/C_r	62 400–102 400	13 350–67 400	21 00–34 000	15 700–27 200
Удельный расход донных наносов в форме гряд $q_r = 0,6h_r C_r$, м ³ /сут*м	0,0–0,47	0,21–1,35	0,55–0,83	0,77–4,6

Выполненные измерения и расчеты, приведенные в табл. 1, дают основание, используя многолетние данные гидрологических измерений в гидрометрических створах нижней Кубани и зависимости (1)–(4), рассчитать характеристики стока донных наносов в указанных створах (расходы и годовой сток донных наносов) и установить зависимости для расчета годового стока донных наносов от объема годового стока воды.

В табл. 2 представлены данные измеренных в течение 1966 г. расходов воды на р. Кубань у г. Краснодара и соответствующие им расчетные величины расхода донных на-

носов, которые позволяют построить зависимость расхода донных наносов от расхода воды в этом створе в 1966 г. (см. рис. 4). В этом же году наблюдались и были измерены расходы воды в широком диапазоне их значений вплоть до 1830 м³/с (наибольший расход воды в реке после максимального расхода воды летнего паводка наблюдался в 2002 г.) В 1966 г. здесь было измерено 50 расходов воды.

Зависимость полного расхода донных наносов в м³/сут (в рыхлом теле) от расхода воды по данным измерений 1966 г. аппроксимируется формулой (рис. 4)

$$Q_r = 0,0000002Q^3 - 0,0002Q^2 + 0,53Q - 39,0. \quad (5)$$

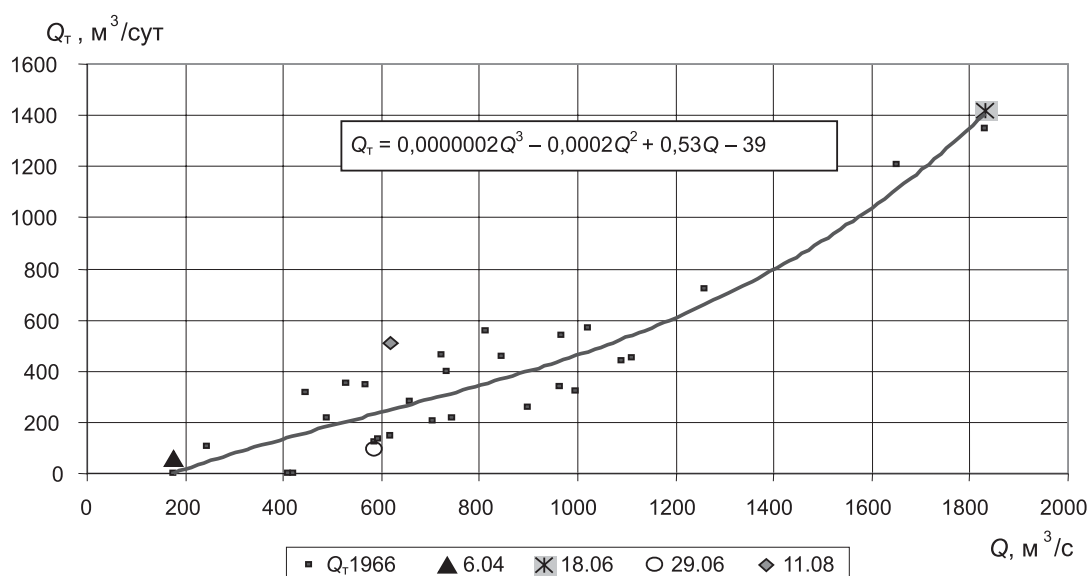


Рис. 4. Зависимость полного расхода донных наносов от расхода воды
р. Кубань у г. Краснодара, 1966 г.

Таблица 2

Измеренные расходы воды и расчетные значения расхода донных наносов р. Кубань у г. Краснодара, 1966 г.

Дата измерения	Уровень воды (см) над 0 поста	Расход воды (м³/с)	Средняя скорость течения V (м/с)	Средняя глубина H (м)	Ширина реки B (м)	$Fr = \frac{V}{\sqrt{gH}}$	Высота гряды $h_r = 0,13 H$ (м)	Удельный расход донных наносов $q_r = 0,11 V/h_r F r^3$ (м³/с м)	Полный расход донных наносов	
									$q_r B$ (м³/с)	$q_r B$ (м³/сут)
6.04	108	175	0,64	2,58	106	0,13	0,335	0,000005	0,00052	45
4.05	345	723	1,11	4,19	156	0,17	0,545	0,000035	0,00539	466
10.05	263	490	0,95	3,95	131	0,15	0,514	0,000019	0,00250	216
27.05	369	812	1,16	4,38	160	0,18	0,569	0,000040	0,00645	557
29.05	394	844	1,11	4,68	162	0,16	0,608	0,000033	0,00530	458
30.05	356	735	1,07	4,34	158	0,16	0,564	0,000029	0,00463	400
7.06	334	659	0,98	4,3	156	0,15	0,559	0,000021	0,00323	279
10.06	432	968	1,16	5	166	0,17	0,65	0,000038	0,00627	541
11.06	441	1020	1,18	5,20	166	0,17	0,676	0,000040	0,00658	568
15.06	518	1260	1,26	5,8	171	0,17	0,754	0,000049	0,00834	721
17.06	589	1650	1,41	6,2	189	0,18	0,806	0,000074	0,01398	1208
18.06	615	1830	1,45	6,50	193	0,18	0,845	0,000081	0,01560	1348
21.06	444	964	1,05	5,6	164	0,14	0,728	0,000024	0,00393	339
29.06	318	585	0,81	4,7	153	0,12	0,612	0,000009	0,00141	122
7.07	424	900	0,98	5,6	164	0,13	0,728	0,000018	0,00298	257
9.07	452	997	1,04	5,8	166	0,14	0,754	0,000023	0,00376	325
12.07	367	746	0,93	5,00	160	0,13	0,65	0,000016	0,00249	216
20.07	462	1090	1,12	5,80	167	0,15	0,754	0,000030	0,00509	439
24.07	337	704	0,92	4,87	157	0,13	0,633	0,000015	0,00238	205
28.07	310	594	0,83	4,67	154	0,12	0,607	0,000010	0,00158	136
6.08	469	1110	1,13	5,90	167	0,15	0,767	0,000031	0,00523	451
11.08	303	617	0,85	4,73	153	0,12	0,615	0,000011	0,00171	148
30.08	261	422	0,64	4,72	140	0,09	0,614	0,000004	0,00050	44
31.08	240	409	0,63	4,16	158	0,10	0,541	0,000004	0,00057	49

При получении этой зависимости, как следует из табл. 2, для расчетов расходов донных наносов использовались осредненные значения глубин и скоростей потока по поперечному сечению русла.

Для доказательства правомерности такой процедуры на кривой (см. рис. 4) нанесены точки, отображающие результаты подробного расчета расхода донных наносов в поперечном сечении р. Кубань (по расходным книжкам) в 8 отсеках соответствующих поперечных сече-

ний за различные даты и их суммирование по поперечному сечению. Совмещение поперечных профилей русла, соответствующих датам измерений 06.04; 18.06 и 11.08.1966 г. представлены на рис. 5.

Полученная зависимость полного расхода донных наносов от расхода воды (5) позволяет рассчитать ежедневные значения полного расхода донных наносов (рис. 6) и величину годового стока донных наносов (табл. 3).

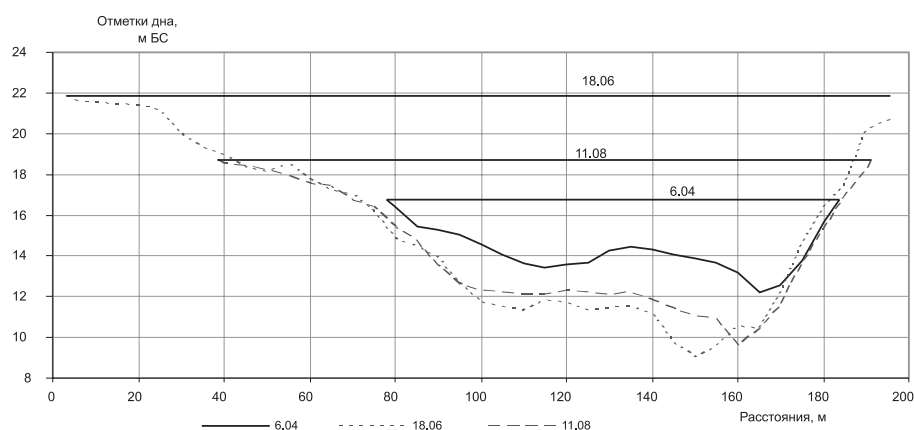


Рис. 5. Совмещенные поперечные профили русла р. Кубань у г. Краснодара (1966)

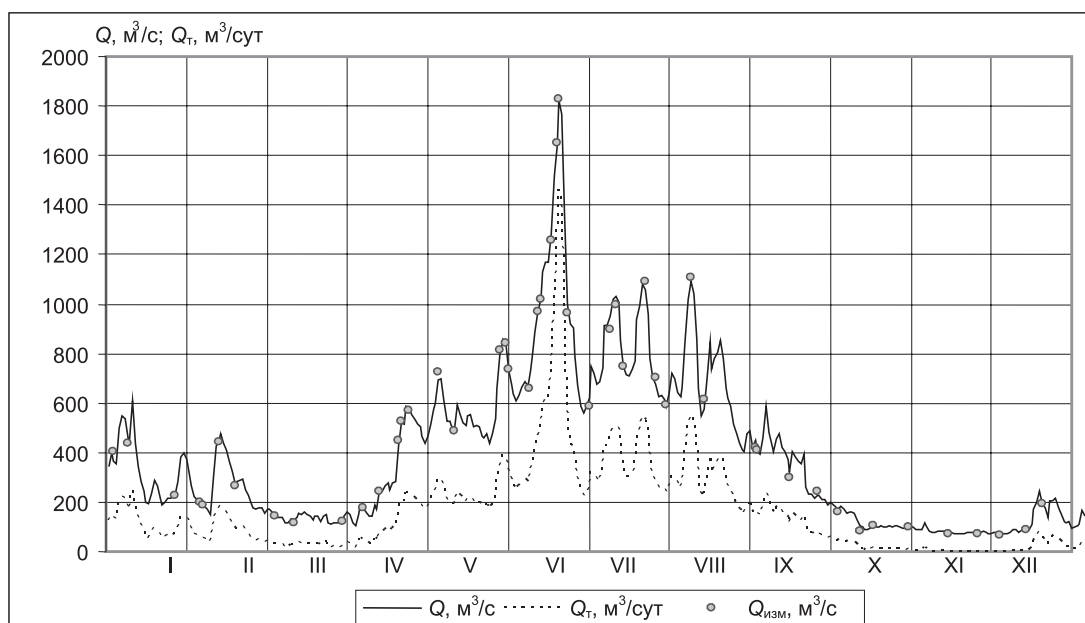


Рис. 6. Годовой сток воды и сток донных наносов р. Кубань у г. Краснодара

На рис. 7 представлены зависимости полного расхода донных наносов от расхода воды р. Кубань у г. Краснодара, полученные

аналогичным образом за 1956, 1965, 1968 гг., по которым имелись данные измеренных расходов воды.

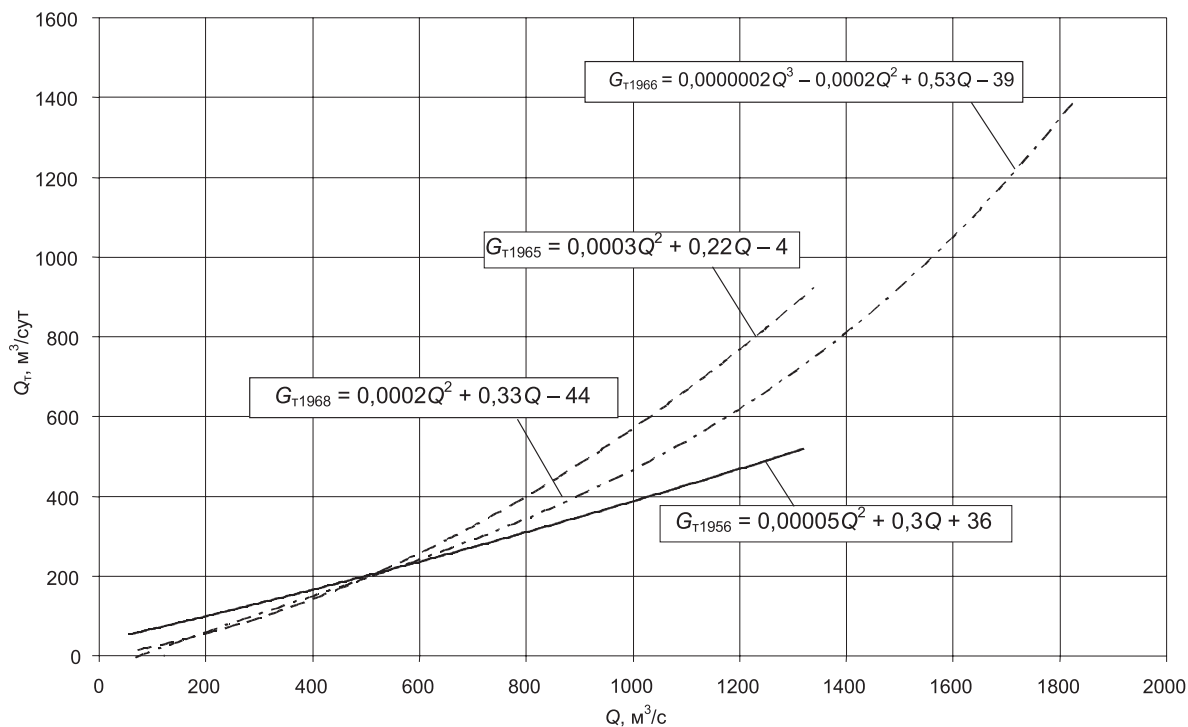


Рис. 7. Зависимость полного расхода донных наносов от расхода воды р. Кубань у г. Краснодара

Эти зависимости имеют вид:

для 1956 г. —

$$Q_T = 0,00005Q^2 + 0,30Q + 36; \quad (6)$$

для 1965 г. —

$$Q_T = 0,0003Q^2 + 0,22Q - 4; \quad (7)$$

для 1968 г. —

$$Q_T = 0,0002Q^2 + 0,33Q - 44. \quad (8)$$

Рассчитанные на основе описанного выше метода значения годового стока донных наносов (в $\text{м}^3/\text{год}$) за разные годы для гидрометрического створа р. Кубань у г. Краснодара представлены в табл. 3.

Таблица 3

**Характеристики стока воды и донных наносов в поперечных сечениях
гидрометрических постов нижней Кубани**

№ п/п	Гидрометрический створ	Годы измерений	Характеристики стока воды			Объем стока донных наносов G_T м³/ГОД	Объем стока донных наносов G_T млн т/ГОД	Объем стока взвешенных наносов R_T млн т/ГОД	%
			Средне- годовой расход воды, м³/с	Среднемаксимальный и максимальный расходы воды, м³/с	Годовой объем стока воды, км³/ГОД				
1	г. Краснодар	1912– 1973	405	1283 (2040/1932 г.)	12,8	54 707	0,098		
2		1956	469	13 700	14,8	68 875	0,123	9,74	1,3
3		1957	333	1060	10,5	48 029	0,086	6,02	1,4
4		1958	455	1220	14,3	65 928	0,118	8,83	1,3
5		1965	396	1350	12,5	57 440	0,103	9,46	1,1
6		1966	392	1840	12,4	58 642	0,105	8,2	1,3
7		1967	420	1060	13,2	63 793	0,114	11,67	1,0
8		1968	477	1130	15,1	63 521	0,114	9,15	1,2
9		1969	217	1080	6,8	16 479	0,030	3,78	0,8
10		1970	348	1090	11	27 018	0,049	5,68	0,8
11		1971	314	751	9,9	31 102	0,056	4,42	1,3
12	х. Тиховский	1930– 2005	374	1026 (1480/1966 г.)	12,0	62 643	0,113		
13		1956	487	1430	15,4	79 643	0,143	8,8	1,6
14		1965	358	1240	11,3	61 379	0,110	6,62	1,7
15		1966	352	1480	11,1	58 290	0,105	6,31	1,7
16		1968	447	1110	14,3	76 513	0,138	6,31	2,2
17		1970	335	1050	10,5	49 792	0,090	5,05	1,8
18	х. Зайцево колено	1957– 2005	180	417 (609/1959 г.)					
19		1965	188	596	5,9	7808	0,014	2,81	0,5
20		1966	178	457	5,6	6186	0,011	2,52	0,4
21		1968	210	428	6,6	6133	0,011	2,3	0,5
22		1970	172	4,45	5,4	6856	0,012	1,61	0,7
23		1992	220	411	6,96	13 057	0,023	0,38	6,0
24		2002	274	883	8,6	33 282	0,060		
25	г. Славянск-на-Кубани	1945– 2005	178	488 (715/2004 г.)					
26		1956	208	607	6,6	18 278	0,032	3,88	0,8
27		1959	145	629	4,6	10 895	0,020	2,37	0,8
28		1963	221	541	6,9	14 550	0,026	4,42	0,6
29		1966	160	676	5,1	15 137	0,027	3,12	0,9
30		1968	205	564	6,5	18 808	0,034	2,4	1,4
31		1969	81	444	2,55	5140	0,009	1,2	0,8
32		1992	261	525	8,2	17 521	0,031	3,06	1,0
33		1997	327	548	10,3	20 300	0,036		

Измеренные расходы воды и расчет расхода донных наносов р. Кубань у х. Тиховского (1966)

Дата измерения	Уровень воды (см) над 0 поста	Расход воды (м³/с)	Средняя скорость течения V (м/с)	Средняя глубина H (м)	Ширина реки B (м)	$Fr = \frac{V}{\sqrt{gH}}$	Высота гряды $h_r = 0,13 H$ (м)	Удельный расход наносов $q_r = 0,11 V h_r Fr^3$ (м³/с м)	Полный расход донных наносов $q_r B$ (м³/с)	Дата измерения
										$q_r B$ (м³/сут)
11.04	90	163	0,51	3,5	92	0,09	0,46	0,0000017	0,000155	13
15.04	126	220	0,67	3,45	95,5	0,12	0,45	0,0000051	0,000483	42
21.04	220	437	0,91	2,8	171	0,17	0,36	0,0000191	0,003266	282
04.05	226	477	0,99	2,77	173	0,19	0,36	0,0000269	0,004654	402
24.05	174	349	0,88	2,36	168	0,18	0,31	0,0000182	0,003057	264
28.05	304	693	1,11	3,54	176	0,19	0,46	0,0000376	0,006619	572
30.05	314	723	1,12	3,65	176	0,19	0,47	0,0000384	0,006757	584
03.06	228	514	1,0	2,97	173	0,19	0,39	0,0000270	0,004679	404
13.06	398	920	1,17	4,36	180	0,18	0,57	0,0000418	0,00753	651
15.06	424	1000	1,14	4,83	181	0,17	0,63	0,0000358	0,006484	560
18.06	493	1343	1,3	4,8	215	0,19	0,62	0,0000608	0,013064	1129
21.06	476	1267	1,26	4,86	207	0,18	0,63	0,0000533	0,011031	953
23.06	380	884	1,08	4,6	178	0,16	0,60	0,0000296	0,005263	455
25.06	330	717	0,98	4,14	176	0,15	0,54	0,0000211	0,003719	321
30.06	270	586	0,92	3,66	174	0,15	0,48	0,0000175	0,003037	262
06.07	332	753	1,01	4,17	178	0,16	0,54	0,0000238	0,004228	365
09.07	364	862	1,08	4,46	179	0,16	0,58	0,0000300	0,005375	464
13.07	298	655	0,96	3,89	176	0,16	0,51	0,0000201	0,003533	305
20.07	378	911	1,12	4,54	179	0,17	0,59	0,0000344	0,006162	532
23.07	308	694	0,97	4,05	176	0,15	0,53	0,0000205	0,003609	312
06.08	350	871	1,12	4,37	178	0,17	0,57	0,0000351	0,006245	540
08.08	378	948	1,17	4,54	179	0,18	0,59	0,0000410	0,007338	634
11.08	240	469	0,81	3,34	174	0,14	0,43	0,0000110	0,00191	165
18.08	344	741	0,97	4,3	178	0,15	0,56	0,0000199	0,003542	306
22.08	266	535	0,84	3,65	175	0,14	0,47	0,0000121	0,002126	184
13.09	178	290	0,59	2,9	170	0,11	0,38	0,0000033	0,000564	49

На рис. 8 изображена зависимость годового стока донных наносов от объема годового стока воды р. Кубань у г. Краснодара. Она имеет вид

$$W_{Q_T} = 7023W_Q - 34\,994. \quad (9)$$

Аналогично описанному выше были выполнены расчеты для участков русла р. Кубань у х. Тиховского, дельтового рукава у х. Зайцево, колена и дельтового рукава Прото-

ка у г. Славянск на Кубани (см. табл. 3).

В табл. 4 приведены значения измеренных расходов воды и результаты расчета расхода донных наносов р. Кубань у х. Тиховского за 1966 г. Всего за этот год было измерено 55 расходов воды. Зависимость полного расхода донных наносов от расхода воды р. Кубань у х. Тиховского за 1966 г. приведена на рис. 9.

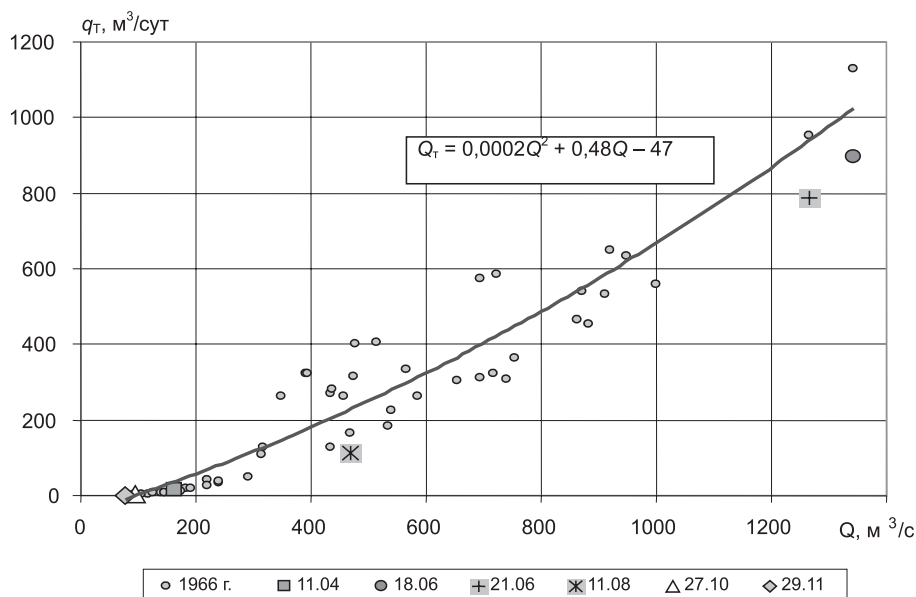


Рис. 9. Зависимость расхода донных наносов от расхода воды р. Кубань у х. Тиховского

Она имеет вид

$$Q_T = 0,0002Q^2 + 0,48Q - 47. \quad (10)$$

Эта кривая также получена в результате использования определенных по поперечному сечению данных по глубине и скорости потока. Как следует из рис. 9, процедура осреднения и здесь оправдана, так как результаты подробных расчетов за различные даты (11.04; 18.06; 21.06; 11.06; 27.10; 29.11) по расходным книжкам также соответствуют кривой, изображенной на рис. 9.

На рис. 10 представлены зависимости полного расхода донных наносов от расхода воды р. Кубань у х. Тиховского за разные годы в сравнении с кривой 1966 г.

Полученные зависимости имеют вид:

для 1956 г. —

$$Q_T = 0,0003Q^2 + 0,46Q - 104; \quad (11)$$

для 1965 г. —

$$Q_T = 0,0008Q^2 + 0,04Q - 4; \quad (12)$$

для 1968 г. —

$$Q_T = 0,0004Q^2 + 0,35Q - 52; \quad (13)$$

для 1970 г. —

$$Q_T = 0,0004Q^2 + 0,41Q - 57. \quad (14)$$

Зависимость годового стока наносов от объема годового стока воды р. Кубань у х. Тиховского имеет вид

$$W_{Q_T} = 2082W_Q^{1,37}. \quad (15)$$

Для дельтового рукава р. Кубань — Протока у г. Славянск на Кубани был проведен аналогичный анализ для ряда лет с имеющимися данными по измеренным расходам воды.

На рис. 11 представлена зависимость расхода донных наносов от расхода воды за 1966 г., когда было измерено 55 расходов воды.

Она имеет вид

$$Q_T = 0,0002Q^2 + 0,26Q - 9. \quad (16)$$

Зависимость годового стока донных наносов от стока воды имеет вид

$$W_{Q_T} = 3180W_Q^{0,83} \quad (17)$$

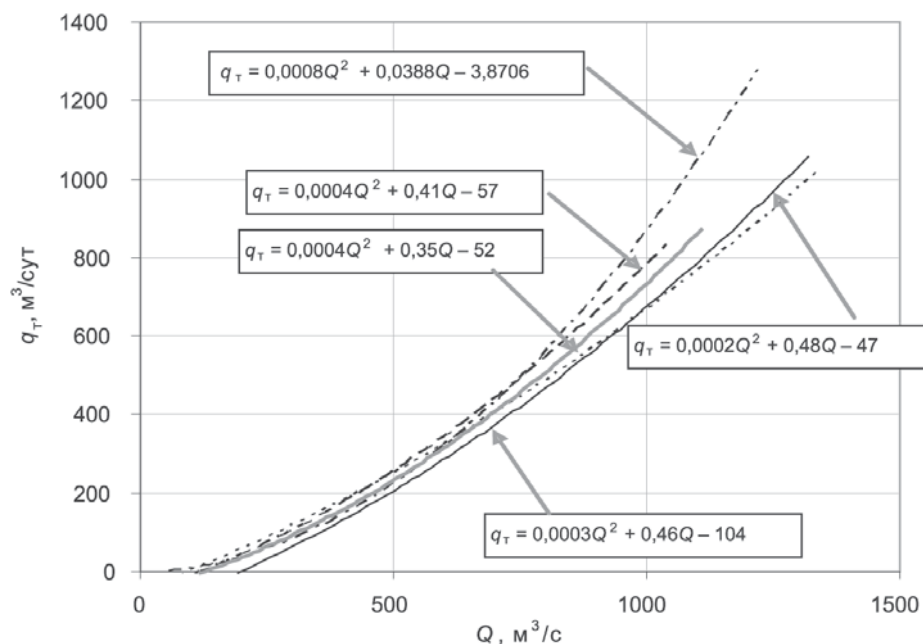


Рис. 10. Зависимость полного расхода донных наносов от расхода воды р. Кубань у х. Тиховского, 1966 г.

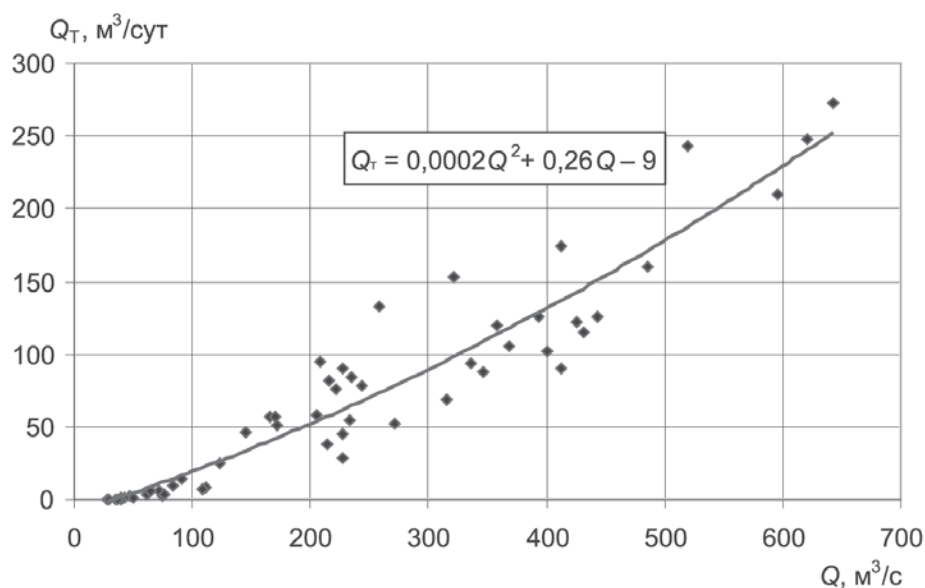


Рис. 11. Зависимость расхода донных наносов от расхода воды р. Кубань, рук. Протока, г. Славянск-на-Кубани, 1966 г.

Аналогичные зависимости для 1966 г. (35 измеренных расходов воды) и ряда других лет были построены для дельтового рукава Кубань в гидрометрическом створе Зайцево Колено.

Однако для этого створа зависимость годового стока донных наносов от объема го-

дового стока воды получить не удалось, что, по-видимому, является следствием того, что здесь преобладают характерные для дельты аккумулятивные процессы.

В табл. 3 представлены также данные о соотношении среднегодового стока донных и взвешенных наносов на нижней Куба-

ни (г. Краснодар, х. Тиховский) и в дельтовых рукавах Кубань (х. Зайцево Колено) и Протока (г. Славянск-на-Кубани), полученные на основе данных измерений и выполненных выше расчетов. Как следует из последней графы табл. 3, во всех случаях годовой сток донных наносов составляет малую долю от годового стока взвешенных наносов.

Анализируя полученные результаты, необходимо отметить следующее.

1. Рассмотренные примеры оценки характеристик стока донных наносов относятся к случаю русла, сложенного из песка, находящегося в состоянии движения в течение всего года во всем диапазоне изменения расходов и уровней воды в реке.

2. В описанном выше методе принято допущение о постоянном соответствии геометрических и динамических характеристик гряд и соответственно расхода донных наносов состоянию динамического равновесия, что равносильно допущению о мгновенной перестройке гряд с изменением гидравлических характеристик потока. Метод учета инерционности при перестройке микроформ-гряд был предложен ранее в работе

[9] с помощью параметра $U_{ин} = \tau / \tau_\phi$, где $\tau = l_\Gamma / C_\Gamma = l_\Gamma / 0,019 V \cdot Fr^3$ — период движения гряд, а τ_ϕ — продолжительность фазы

водности, для которой оценивался инерционный эффект. На отмеченном допущении основана и принятая в предложенном методе расчета процедура интерполяции при использовании кривых, изображенных на рис. 4, 7, 9, 12, 14.

Есть основание полагать, что в промежутки времени перестройки гряд установившегося профиля с изменением гидравлических характеристик (глубины и скорости потока) зависимость расхода донных наносов от этих характеристик подчиняется той же закономерности, что и в условиях движения гряд установившегося профиля. На правомерность такого допущения указывает пригодность многих формул для

расхода донных наносов, полученных без учета грядового движения наносов и для случая их грядового движения [11]. Можно считать, что при получении формул расхода донных наносов на основе учета геометрических и динамических характеристик гряд установившегося профиля подход, связывающий расход донных наносов с параметрами гряд, используется лишь как методический прием, дающий возможность точнее обнаружить связь между гидравлическими характеристиками потока и расходом донных наносов как объема руслового материала, перемещающегося при установившемся (не меняющемся) профиле гряд со строго фиксируемой высотой и скоростью их перемещения. Этот вопрос требует дальнейшей проработки и вполне может быть прояснен с помощью специально поставленных лабораторных экспериментов.

3. Предложенный метод оценки характеристик стока донных наносов в дальнейшем может быть распространен и на более сложные случаи, когда донные наносы в реке движутся не в течение всего года, а только в отдельные фазы водного режима (горно-предгорные реки).

4. Отмечая приближенный характер предложенного метода и результатов расчета, основным выводом по выполненному исследованию следует считать демонстрацию принципиальной возможности оценки характеристик стока донных наносов в реках, ограничиваясь данными лишь стандартных наблюдений на гидрологической сети Росгидромета.

5. При отсутствии данных стационарных наблюдений годовой сток руслового материала по предложенной методике может быть рассчитан на основе эпизодических измерений гранулометрического состава донных отложений и расходов воды и наносов в исследуемом створе реки в различные фазы водного режима (10–20 измерений в году). Для установления зависимости годового стока донных наносов от объема годового стока воды $W_{от} = f(W_Q)$ необходимо выполнение таких эпизодических измерений в течение трех и более лет.

Список литературы

1. Алексеевский Н. И., Гайкович А. Б. К расчету стока влекомых наносов на неизученных реках в период межени // Метеорология и гидрология. — 1978. — № 8. — С. 96–102.
2. Алексеевский Н. И., Борсук О. А., Лодина Р. В. Изменение механического состава и форм перемещения влекомых наносов в различных звеньях русловой сети // Тр. V Всесоюз. гидрологического съезда. — Л.: Гидрометеиздат, 1988. — Т. 10. — С. 161–167.
3. Алексеевский Н. И. Формирование и движение речных наносов. — М.: Изд-во МГУ, 1988. — 202 с.
4. Боголюбова И. В. Результаты полевых исследований и расчет стока влекомых наносов р. Мзымты // Тр. ГГИ. — Л.: Гидрометеиздат, 1968. — Вып. 156. — С. 39–63.
5. Гришанин К. В. Теория руслового процесса. — М.: Транспорт, 1972. — 214 с.
6. Гришанин К. В. Устойчивость русел рек и каналов. — Л.: Гидрометеиздат, 1974. — 143 с.
7. Гришанин К. В. Динамика русловых потоков. — Л.: Гидрометеиздат, 1979. — 341 с.
8. Гришанин К. В. Основы динамики русловых потоков. — М.: Транспорт, 1990. — 320 с.
9. Копалиани З. Д. Расчеты характеристик руслового рельефа и обратимых русловых деформаций на реках трассы БАМ // Тр. ГГИ. — Л.: Гидрометеиздат, 1980. — Вып. 275. — С. 91–104.
10. Копалиани З. Д. О соотношении расходов донных и взвешенных наносов в реках. Гидрофизические процессы в реках и водохранилищах. — М.: Наука, 1985. — С. 143–147.
11. Копалиани З. Д., Костюченко А. А. Расчеты расхода донных наносов в реках: сб. работ по гидрологии. — СПб.: Гидрометеиздат, 2004. — № 27. — С. 25–40.
12. Костюченко А. А., Копалиани З. Д. Особенности руслового процесса и стока донных наносов малых рек // Докл. VI Всерос. гидрологического съезда. — М.: Метеоагентство Росгидромета, 2006. — С. 44–49.
13. Методические рекомендации по измерению и расчету стока влекомых наносов. — Л.: Гидрометеиздат, 1982. — 39 с.
14. Романовский В. В., Капитонов Н. М. Методика и погрешности измерения расхода влекомых наносов по параметрам гряд // Тр. ГГИ. — Л.: Гидрометеиздат. — Вып. 283. — С. 93–108.
15. Сниценко Б. Ф., Копалиани З. Д. О скорости движения гряд в реках и лабораторных условиях // Тр. ГГИ. — Л.: Гидрометеиздат, 1978. — Вып. 252. — С. 20–37.
16. Учет деформаций речных русел и берегов водоемов в зоне подводных переходов магистральных трубопроводов (нефтегазопроводов) ВСН 163-83. — Л.: Гидрометеиздат, 1985. — 142 с.
17. Хмаладзе Г. Н. Вынос наносов реками черноморского побережья Кавказа. — Л.: Гидрометеиздат, 1978. — 168 с.
18. Чалов Р. С. Русловедение. Теория, география, практика. — М.: Изд-во МГУ, 2007. — Т. 1. — 607 с.
19. Шамов Г. И. Заиление водохранилищ. — Л.: Гидрометеиздат, 1939. — 139 с.
20. Шамов Г. И. Речные наносы. — Л.: Гидрометеиздат, 1959. — 378 с.
21. Manual on Sediment Management and Measurement // WMO Operational Hydrology Report. — Geneva, 2003. — № 47. (WMO № 948). — 158 p.
22. Measurement of river sediments // Operational Hydrology. — Geneva, 1981. — № 16 (WMO № 561).
23. Yang C. T. Sediment Transport. Theory and Practice. — The Mc Craw Hill Companies, Inc., 1996. — № 9. — 395 p.

ГИДРАВЛИЧЕСКОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ РЕЧНЫХ РУСЕЛ

FLOW RESISTANCE OF RIVER CHANNEL

Выполнен анализ современного состояния проблемы расчетов гидравлических сопротивлений. Установлено три направления их расчетов. Наиболее перспективным из них является направление, основанное на принципе саморегулирования. Однако оно требует значительных усилий для разработки. В настоящее время лучшие результаты получаются при расчетах, основанных на формулах Шези, Маннинга и других, но и они требуют совершенствования, в частности, учета значительного воздействия глубин и формы сечения речных русел.

The analysis of modern state of the problem of the Flow resistance calculations is performed. Three lines of these calculations are fixed. One of them, based on the self-regulation principle is the most perspective. However it needs substantial efforts for its elaboration. Today the best results are receiving at the accounts based on the Chezy, Manning et al. formulas, but they need to take into account of river depth and shape of the cross section.

Ключевые слова: гидравлические сопротивления, гидравлика потока, шероховатость, саморегулирование.

Key words: hydraulic resistance, stream hydraulics, roughness, self-regulation.

ГИДРАВЛИЧЕСКИЕ сопротивления являются основной проблемой гидравлики и особенно ее речной составляющей. Несмотря на более чем 200-летний период исследований по этой проблеме, она все еще далека от решения. От результатов исследований по ней зависят решения проблем расчетов важнейших гидравлических характеристик речных потоков, таких как их средние скорости, расходы воды (особенно максимальные) и др.

Гидравлическое сопротивление — это сила, с которой русло реки сопротивляется движению потока. Однако его характеристикой принято считать коэффициенты Шези C или гидравлического трения λ [6; 7]. Если первые обычно употребляются для оценки сопротивлений речных русел, то последние для оценки сопротивлений различных искусственных сооружений.

Рассмотрим основные направления методик расчетов этих сопротивлений. Наиболее часто применяется рекомендуемая На-

ставлением НИМП-72 [9] методика расчетов, основанная на зависимостях вида $C = f(h, n)$ [1]. При этом коэффициенты шероховатости n , как правило, определяются по описательным характеристикам расчетного участка и соответствующим таблицам, число которых в настоящее время более 20. Наиболее часто в России используются таблицы М. Ф. Срибного и И. Ф. Карасева, а в США В. Т. Чоу и Дж. Бредли. Все указанные таблицы основаны на большом объеме натурной информации, а таблицы Чоу даже сопровождаются альбомом цветных фотографий. К сожалению, как сами коэффициенты шероховатости, так и таблицы для их определения имеют много недостатков, основными из которых являются субъективизм, а также широкий диапазон значений коэффициентов шероховатости при одной и той же описательной характеристике. К тому же, как правило, не учитываются глубины водотоков и формы сечения речных русел. Коэффициенты шероховатости, являясь интегральной характеристикой всех видов сопротивлений, имеют

неопределенную, точнее переменную, размерность, что, в частности, подтверждается анализом формулы Павловского

$$n = \frac{h^y}{C},$$

где $y = \alpha\sqrt{n}$, то есть является переменной величиной.

По-видимому, эти недостатки методи-

ки и вызвали негативное отношение к ней К. В. Гришанина [4]. Дополнительно следует отметить, что количество формул для расчета коэффициента Шези более 200. В РГГМУ [1; 2] по данным наблюдений на 502 постах выполнена оценка точности расчетов на основе формул Шези и Маннинга и таблиц Срибного, Карасева, Чоу и Бредли (см. табл. 1).

Таблица 1

Среднеквадратичные и максимальные значения отклонений табличных коэффициентов шероховатости от расчетных значений (в % от n_p)

Группа рек	Кол-во рек	$\Delta n/n_p = (n_p - n_m)/n_p$							
		по Срибному		по Чоу		по Бредли		по Карасеву	
		$\frac{\Delta n}{n_p}$	$\frac{\Delta n_{\max}}{n_p}$	$\frac{\Delta n}{n_p}$	$\frac{\Delta n_{\max}}{n_p}$	$\frac{\Delta n}{n_p}$	$\frac{\Delta n_{\max}}{n_p}$	$\frac{\Delta n}{n_p}$	$\frac{\Delta n_{\max}}{n_p}$
Равнинные	317	34,7	173	36,2	218	35,8	321	34,8	165
Горные и полугорные	185	31,9	208	30,8	203	32,4	255	31,7	210
Осредненные	502	33,7	208	34,1	218	35,1	321	33,8	210

Здесь Δn — осредненная величина отклонений табличных значений коэффициентов шероховатости от расчетных.

Как вытекает из анализа данных табл. 1, среднеквадратические значения отклонений табличных величин от расчетных (по натурным данным) по всем таблицам находятся в довольно узком диапазоне от 30,8 до 36,2 % при максимальных значениях, достигающих 321 %. Эти данные указывают на необходимость совершенствования данной методики.

Второе направление, имеющее широкое распространение в США и других

странах, основано на зависимостях вида

$$\frac{C}{\sqrt{g}} = f(\text{Re}, R/k) \quad \text{или} \quad \frac{C}{\sqrt{g}} = f(\text{Re}, h/k).$$

В качестве примера можно привести форму-

$$\text{лы К. В. Гришанина [4]} \quad \frac{C}{\sqrt{g}} = 5,66 \lg \frac{\bar{h}}{k_{50}} - 5,3$$

$$\text{или Гриффитса} \quad \frac{C}{\sqrt{g}} = 5,60 \lg \frac{R}{k_{50}} + 2,15.$$

Общий вид формул этого направления:

$$\frac{C}{\sqrt{g}} = \alpha \lg \frac{\bar{h}}{k_{50}} + b.$$

Иногда в качестве дополнительного фактора используется расход донных наносов.

Анализ надежности этого вида формул показал, что они непригодны для равнинных рек, где перемещение донных наносов часто происходит в виде донных гряд, основной характеристикой которых, определяющей величину сопротивления, является их крутизна, которая не учитывается в формулах этого вида. Более того, формулы этого вида недостаточно эффективны и для расчетов сопротивлений горных рек [4; 5].

Третье направление основано на принципе саморегулирования в системе «речной поток–русло». Его основы были заложены в работах М. А. Великанова и поддержаны ведущими гидравликами России, в том числе и К. В. Гришаниным [4 и др.]. Действительно, речной поток протекает в аллювиальных отложениях и сам, в зависимости от поступления из бассейна того или иного количества воды и наносов, изменяет высоту выступов

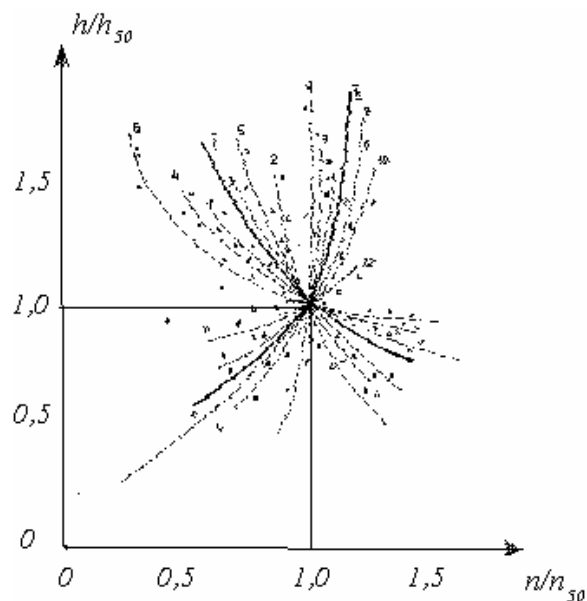


Рис. 1. График зависимости $n/n_{50} = f(h/h_{50})$ для равнинных рек.

(первый тип) I–II — осредненные для групп рек кривые; 1–12 — полученные по данным наблюдений на конкретных реках

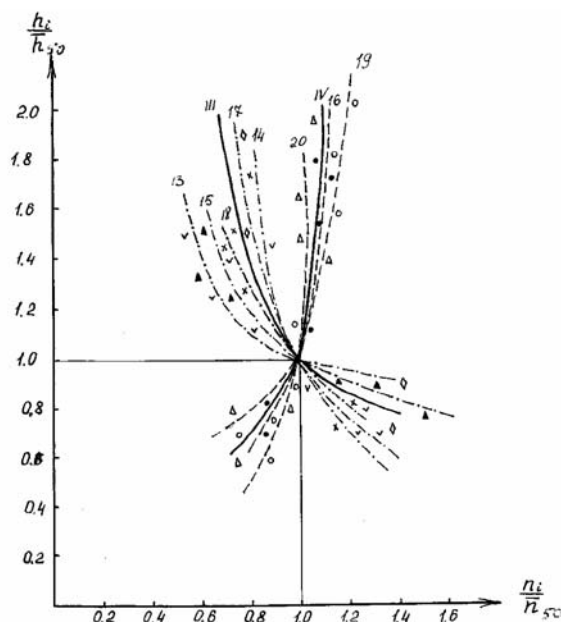


Рис. 2. График зависимости $n/n_{50} = f(h/h_{50})$ для равнинных рек;

(второй тип) III–IV — осредненные для групп рек кривые;

13–20 — полученные по данным наблюдений на конкретных реках

шероховатости, переводит форму перемещения наносов из безгрядовой в донно-грядовую и наоборот, существенно изменяя при этом величину сопротивления и приводя в соответствие транспортирующую способность потока с расходом наносов, поступающих из бассейна реки. Таким образом поток сам формирует гидравлические сопротивления в зависимости от объема поступления наносов, притока воды в реки и других факторов. Исходя из этого, авторы [10 и др.] представляют эту зависимость в виде $C = f(h, I)$.

Данное направление наименее разработано, полученные зависимости [2; 10], к сожалению, имеют региональное значение и низкую эффективность.

Проведенный анализ показывает, что наиболее перспективным, но и наименее разработанным является третье направление. Однако для его разработки необходимы не только аналитические, но и большие, дорогостоящие полевые исследования, поэтому в настоящее время наиболее целесообразным является использование первого направления. Исходя из этого, рассмотрим некоторые возможные пути его совершенствования.

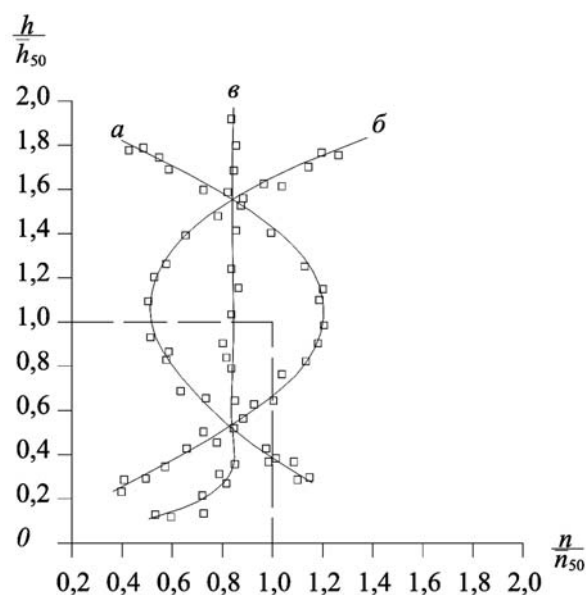


Рис. 3. График зависимости $n/n_{50} = f(h/h_{50})$ (разные типы кривых):

a — третий тип; б — четвертый тип;

в — пятый тип

Анализ натурной информации и формул для расчетов коэффициентов Шези, проведенный в РГГМУ [1; 2], показал, что при расчетах на малых и средних реках практически во всех формулах недостаточно учитывается влияние глубины и формы сечения русел. Установлено [1; 2], что в зависимости от степени зарастаемости берегов на равнинных реках и их засоренности на горных реках могут на-

блюдаться различные виды кривых зависимостей $\frac{C}{C} = f(\frac{h}{h})$ или $\frac{n}{n} = f(\frac{h}{h})$.

Эти зависимости при использовании для расчетов формулы Маннинга фактически являются зеркальным отображением друг друга. На основе анализа этих зависимостей было выделено пять их типов (рис. 1–3).

Как видно на приведенных рисунках, эти типы зависимостей резко отличаются друг от друга. В то же время такой характер зависимостей не учитывается ни в одной из известных формул для расчета коэффициентов Шези. Действительно, практически во всех известных формулах коэффициент

Шези, как правило, пропорционален глубине в степени, меньшей 0,2. Анализ же натурной информации свидетельствует, что этот показатель изменяется в значительно больших пределах, включая его отрицательные значения. Все это свидетельствует о необходимости совершенствования формул и методов расчетов гидравлических сопротивлений на малых и средних реках. Второй основной причиной такого характера зависимостей на малых и средних реках, помимо состояния берегов, являются русловые образования, расположение которых относительно расчетного створа может как создавать подпор, что приводит к значительному уменьшению скоростей, так и, наоборот, резко увеличивать скорости течения.

Значительно сложнее выявить влияние формы сечения речных русел на гидравлические сопротивления. Многочисленные публикации по этой проблеме [3; 8 и др.] позволяют сделать вывод о том, что влияние этого фактора ощущается до значений $B/h \approx 50-60$, то есть оно значимо только на малых и средних реках.

Список литературы

1. Барышников Н. Б. Гидравлические сопротивления речных русел. — СПб.: РГГМУ, 2003. — 147 с.
2. Барышников Н. Б. Динамика русловых потоков. — СПб.: РГГМУ, 2007. — 314 с.
3. Гончаров В. Н. Динамика русловых потоков. — Л.: Гидрометеиздат, 1962. — 375 с.
4. Гришанин К. В. Гидравлические сопротивления естественных русел. — Л.: Гидрометеиздат, 1992. — 183 с.
5. Железняков Г. В. Пропускная способность русел каналов и рек. — Л.: Гидрометеиздат, 1981. — 310 с.
6. Зегжда А. П. Гидравлические потери на трение в каналах и трубопроводах. — М.: Госстройиздат, 1957. — 278 с.
7. Знаменская Н. С. Гидравлическое моделирование русловых процессов. — Л.: Гидрометеиздат, 1992. — 240 с.
8. Карасев И. Ф., Коваленко В. В. Статистические методы речной гидравлики и гидрометрии. — СПб.: Гидрометеиздат, 1994. — 208 с.
9. Наставление по изысканию и проектированию железнодорожных и автодорожных мостовых переходов через водотоки [НИМП-72]. — М.: Транспорт, 1972. — 280 с.
10. Скородумов Д. Е. Гидравлические основы экстраполяции кривых расходов воды до вышших уровней // Тр. ГГИ. — 1960. — Вып. 77. — С. 3–44.

ГИДРОДИНАМИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ УСТОЙЧИВОСТИ И ПЛАНОВЫХ
ПЕРЕФОРМИРОВАНИЙ РЕЧНЫХ РУСЕЛ И ПУТИ ИХ РАЗВИТИЯHYDRODYNAMIC MODELS OF STABILITY AND PLAN DEFORMATIONS
OF THE RIVER CHANNEL AND WAYS OF ITS SOLUTION

Изложены результаты работ, выполненных автором под научным руководством К. В. Гришанина. Проблема возникновения меандрирования рассмотрена как проблема гидродинамической неустойчивости потока. Разработана математическая модель и получено уравнение, описывающее плановые деформации русла. Анализ этого уравнения позволил получить морфометрические зависимости для меандрирующих рек, хорошо подтверждаемые натурными данными.

The results of work performed by the author under the scientific supervision of prof. K. V. Grishanin have been presented. The problem of meandering has been considered as a problem of hydrodynamic instability of flow. The mathematical model has been developed and the equation describing the plan deformation of the river channel has been derived. Analysis of this equation yielded hydraulic geometry relationships for meandering rivers, is well supported by field data.

Ключевые слова: меандрирование, математическая модель, скорости, длина волн.

Key words: meandering, mathematical model, velocity, waves length.

В 1973 г. после окончания математико-механического факультета ЛГУ я поступил на работу в отдел русловых процессов ГГИ, где занимался применением математических методов исследования к русловым процессам. Начальник отдела Б. Ф. Снисенко предложил мне подумать об аспирантуре и поработать над диссертацией под руководством К. В. Гришанина. Кирилл Владимирович согласился руководить моей учебой в аспирантуре ЛИВТа, и в 1978 г. я стал его аспирантом. Я с большим удовольствием вспоминаю годы общения с Кириллом Владимировичем, и очень благодарен ему за совместную работу. Он, безусловно, был большим ученым и его вклад и в мою работу, и в работы всех его учеников огромен. Поэтому те результаты моей научной деятельности, которые кратко представлены в этой статье, по праву должны рассматриваться и как результаты работы К. В. Гришанина.

Начать я хочу с работы, в которой мы с Кириллом Владимировичем выступили как соавторы [1]. В этой работе мы исследовали возникновение меандрирования как пробле-

му гидродинамической неустойчивости. Такой подход к проблемам образования волнообразных форм естественных русел стал применяться с начала 1960-х гг. Задача решалась в двумерной постановке, при которой рассматривалось плоское вихревое течение идеальной жидкости в канале между двумя непроницаемыми стенками, которые в результате изменения скоростей потока могут деформироваться (см. рис. 1). Распределение скоростей поперек потока принималось следующим параболическому закону:

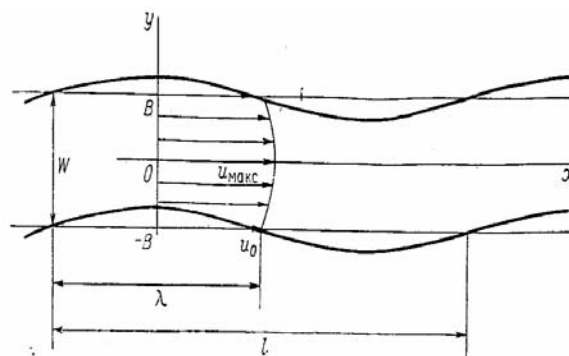


Рис. 1. Исходная схема

$$u = u_{\max} - \frac{y^2}{B^2} u_*, \quad (1)$$

где $B = W/2$, а W — ширина русла; $u_* = (u_{\max} - u_0)$ — разность между максимальной скоростью $u_{\max}$ на оси русла (при $y = 0$) и скоростью u_0 у берега (при $y = \pm B$).

На это движение накладываются малые экспоненциальные возмущения: скоростей u' и v' и береговых линий η :

$$\eta = \eta_0 \exp[ik(x - ct)], \quad (2)$$

$$u' = U(y) \exp[ik(x - ct)], \quad (3)$$

$$v' = V(y) \exp[ik(x - ct)]. \quad (4)$$

Здесь η_0 , U и V — комплексные величины; $k = 2\pi/l$ — волновое число; l — длина волн возмущений; $c = c_r + ic_i$ — комплексная скорость их распространения. Как известно, положительным значениям мнимой скорости c_i отвечает неустойчивость движения (рост возмущений), отрицательным — устойчивость (затухание возмущений).

Возмущенное движение должно удовлетворять уравнению завихренности

$$\left(\frac{\partial}{\partial t} + u \frac{\partial}{\partial x} \right) \left(\frac{\partial u'}{\partial y} - \frac{\partial v'}{\partial x} \right) + v' \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} = 0 \quad (5)$$

и уравнению неразрывности

$$\frac{\partial u'}{\partial x} + \frac{\partial v'}{\partial y} = 0. \quad (6)$$

Связь между деформациями береговых линий и возмущениями скоростей устанавливается посредством двух уравнений. Первое из них выражает непроницаемость берегов:

$$v'_0 = (u_0 + u'_0) \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{\partial \eta}{\partial t} \approx u_0 \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{\partial \eta}{\partial t} = ik\eta(u_0 - c), \quad (7)$$

а второе — связь интенсивности деформации берегов с физическими параметрами явления. Эту связь, исходя из некоторых соображений, мы определили в виде

$$\frac{\partial \vec{n}}{\partial t} = -\varepsilon \left[\frac{\tau_w}{g(\rho_w - \rho)} \right]^2 \left(\frac{\partial^2 u'}{\partial x^2} \right), \quad (8)$$

где $\vec{n}$ — внешняя нормаль к берегу, ε — безразмерный коэффициент пропорционально-

сти. Индексом 0 здесь и далее отмечаются элементы движения на береговых линиях. Произведя анализ системы уравнений и принимая некоторые физически обоснованные допущения, было получено выражение мнимой скорости в виде

$$c_i = \frac{Dk(2u_* - k^2)}{1 + D^2k^6}, \quad (9)$$

где через D обозначена величина

$$D = -\varepsilon \left[\frac{\tau_w}{g(\rho_w - \rho)} \right]^2, \quad (10)$$

τ_w — касательное напряжение на невозмущенной поверхности берега; $g(\rho_w - \rho)$ — разность между удельным весом материала, слагающего берег, и удельным весом воды.

Положив $c_i = 0$, найдем волновое число и длину волн нейтральных возмущений

$$k_n = \sqrt{2u_*}, \quad (11)$$

$$l_n/W = \pi/\sqrt{2u_*}. \quad (12)$$

Наряду с длиной нейтральных волн большой практический интерес представляет длина волн с наибольшей начальной скоростью роста. Принято считать, что волны именно такой длины становятся доминирующими. Проведя необходимый анализ, мы получили, что длина таких волн определяется выражением

$$l_*/W = \pi/\sqrt{u_*}. \quad (13)$$

Для широких русел безразмерная величина $u_*/u_0 = (u_{\max} - u_0)/u_0$ может быть принята равной примерно 1/8. Тогда значения длин волн нейтральных возмущений и длин волн с наибольшей начальной скоростью роста составят соответственно

$$l_n/W = 2\pi = 6,3, \quad (14)$$

$$l_*/W = 2,84\pi = 8,9. \quad (15)$$

Для проверки полученных результатов была проведена статистическая обработка картографических материалов по четырём меандрирующим рекам СССР — Днепр, Десна, Сож и Иртыш (всего 462 излучины). По измеренным шагам излучины λ и ширине русла W была построена гистограмма распределения величины λ/W (см. рис. 2).

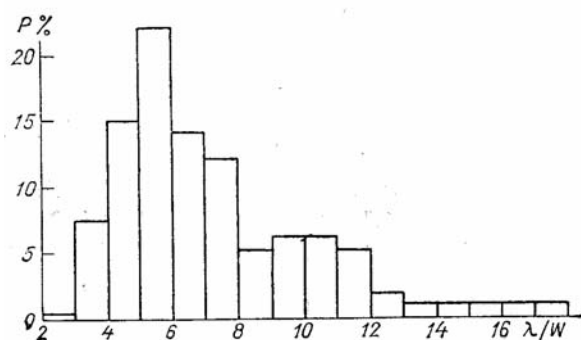


Рис. 2. Гистограмма распределения шагов излучин

Как видно из этой гистограммы, излучины, для которых $\lambda/W < 3$ (то есть $l/W < 6$), в рассмотренном ряду почти не встречаются: их доля составляет менее 1 % от общего числа обследованных излучин, что подтверждает полученное нами соотношение (14). Наибольшую частоту (22 %) имеют излучины с безразмерным шагом $\lambda/W = 5 \div 6$, то есть с безразмерной длиной волн $l/W = 10 \div 12$. Близки к этой величине данные других исследователей: у И. В. Попова средняя величина параметра l/W равна 9, по Л. Леопольду и М. Уолмену она составляет 10,9, по И. Целлеру — 10. Все эти значения близки к результату, полученному нами с К. В. Гришаниным теоретическим путем.

Эта работа вошла в мою диссертацию, но большая ее часть была посвящена математической модели плановых переформирований меандрирующих русел. Там довольно сложные и громоздкие математические выкладки, поэтому я не буду приводить их здесь, желающие могут посмотреть мою работу [2]. Лучше я постараюсь объяснить идею этой работы и показать некоторые результаты, получаемые из этой модели.

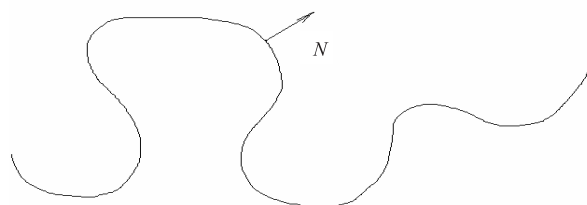


Рис. 3. Плановая форма нити

Идея, лежащая в основе модели, очень проста. Представим лежащую на плоскости нить, имеющую в начальный момент некую извилистую форму, например, как это показано на рис. 3.

Плановая форма нити меняется со временем под воздействием действующих на нее в каждой точке сил, и скорость ее смещения по нормали N пропорциональна величине силы этого воздействия F . Полагаем при этом, что нить сделана из очень эластичного материала, так что она легко растягивается при изменении формы. Вводя натуральную координату s — длину по кривой от некоторого начала, эту зависимость можно выразить в виде

$$\vec{N}(s, t) = \varepsilon(s, t) \vec{F}(s, t), \quad (16)$$

где коэффициент пропорциональности ε выражает реакцию среды на изменение формы нити: чем он больше, тем легче происходит плановая деформация нити (соответственно обратная величина характеризует сопротивляемость деформации). Понятно, что, зная функции $\varepsilon(s, t)$ и $\vec{F}(s, t)$, можно, имея начальную конфигурацию нити, рассчитать ее форму в последующие моменты времени.

Такой же подход был применен при моделировании плановых деформаций меандрирующей реки, представляя ее в виде одномерного потока. Тогда N приобретает смысл скорости размыва берега, а ε — коэффициент податливости берега размыву. Сила F рассматривалась как сумма силы тяжести F_g , кориолисовой силы F_c , связанной с вращением Земли, и сил трения потока о русло, из которых в данном анализе значение имела только поперечная сила F_n , с которой поток воздействует на берег, по сути центробежная сила потока:

$$\vec{F} = \vec{F}_g + \vec{F}_c + \vec{F}_n. \quad (17)$$

Такова идея, реализация которой путем соответствующих преобразований гидродинамических уравнений движения руслового потока позволила получить следующее уравнение, описывающее поведение величины $\theta(s, t)$ — угла наклона касательной к оси русла в выбранных декартовых координатах:

$$\theta_T + \left[V^2 \int_0^s \theta_s^2 ds + \mu V \theta + f(T) \right] \theta_s = -V^2 \theta_{ss}, \quad (18)$$

где μ — безразмерная сила Кориолиса, а функция

$$f(T) = \frac{1}{\varepsilon} \left(\frac{\theta_t + \varepsilon \theta_{ss}}{\theta_s} \right) \Big|_{s=0} + \mu \theta(0, T) \quad (19)$$

выражает граничные условия. Если, например, рассмотреть некоторый участок русла и предположить, что концы участка закреплены жестко и касательная к осевой линии совпадает в этих точках с осью x , то эта функция принимает простой вид:

$$f(T) = -\frac{1}{\Phi^2}, \quad (20)$$

где величина

$$\Phi = \frac{V}{\sqrt{gH}} \quad (21)$$

может быть названа числом Фруда излучины, поскольку имеет структуру числа Фруда (V — средняя по сечению скорость потока), однако здесь $H = \lambda \sin \psi$ есть падение уровня по оси долины (ψ — уклон долины) на длине излучины λ . Входящее в уравнение (18) безразмерное время T связано с реальным временем t формулой

$$T = \varepsilon \frac{V^2}{\lambda^2} t. \quad (22)$$

Проверка построенной модели выполнялась, во-первых, путем численного интегрирования уравнения (18) для двух модельных участков меандрирующих русел, один из которых представлял собой синусоиду, другой — последовательность полуокружностей. Расчеты производились много лет назад на ЭВМ «Минск-32», и, несмотря на ограниченные мощности компьютера, было получено качественное соответствие рассчитанных деформаций схемам развития меандров.

Также были получены аналитические аппроксимации решения уравнения плановой деформации русла (18), которые, в свою очередь, позволили установить аналитическим путем некоторые морфометрические зависимости, ранее получаемые либо эмпирически, либо на основании иных принципов, например вероятностных. Рассмотрим такие зависимости.

Одной из наиболее удачных аппроксимаций плановой формы меандра принято

считать так называемую синусоидально-порожденную кривую (СПК), предложенную В. Лангбейном и Л. Леопольдом [3]:

$$\theta = \omega \sin 2\pi \frac{s}{M}, \quad (23)$$

где M — длина меандра, ω — максимальное значение угла θ , достигаемое в точке $s/M = 1/4$ и имеющее смысл угла входа излучины. Для описания формы излучины, а не меандра, вместо (23) удобнее использовать уравнение

$$\theta = \omega \cos \pi \frac{s}{S} \quad (24)$$

где S — длина излучины. Не сумев найти точного аналитического решения, В. Лангбейн и Л. Леопольд подобрали приближенное соотношение между S/λ и ω в виде

$$S/\lambda = \frac{4,84}{4,84 - \omega^2} \quad (25)$$

Между тем мною в работе [4] было показано, что, проинтегрировав выражение (23) или (24), можно найти точную зависимость между указанными параметрами

$$S/\lambda = 1/I_0(\omega), \quad (26)$$

а также между безразмерной стрелой излучины y_m/λ и ω :

$$y_m/\lambda = \frac{H_0(\omega)}{2I_0(\omega)}, \quad (27)$$

где $I_0(\omega)$ есть бесселева функция первого рода нулевого порядка, а $H_0(\omega)$ — функция Струве.

Можно показать [5], что СПК является приближенным решением уравнения (18). Действительно, если пренебречь силой Кориолиса, которая в большинстве случаев является малой величиной, и выбрать подходящие граничные условия, то уравнение (18) можно упростить и привести к виду

$$\theta_T + V^2 \theta_s \int_0^s \theta_s^2 ds = -V^2 \theta_{ss}. \quad (28)$$

Хорошим приближением к решению этого уравнения является функция

$$\theta(s, T) = \omega(T) \cos \pi \frac{s}{S(T)}, \quad (29)$$

причем ω и S определяются следующими обыкновенными дифференциальными уравнениями:

$$\frac{d\omega}{dT} = \pi^2 \frac{\omega}{(S/\lambda)^2}, \quad (30)$$

$$\frac{d(S/\lambda)}{dT} = \pi^2 \frac{\omega^2}{2(S/\lambda)^2}. \quad (31)$$

Решая эту систему уравнений, получаем следующую связь между S/λ и α :

$$S/\lambda = \exp\left[\left(\frac{\omega}{2}\right)^2\right] \quad (32)$$

или, если вместо ω , имеющей для симметричных излучин смысл угла входа, использовать более привычную для морфометрических зависимостей величину угла разворота излучины α :

$$S/\lambda = \exp\left[\left(\frac{\alpha}{4}\right)^2\right]. \quad (33)$$

Из последних уравнений можно получить и зависимость скорости разворота излучин от степени их развитости:

$$\frac{d\alpha}{dt} = \pi^2 \frac{\varepsilon V^2}{\lambda^2} \frac{\alpha}{\exp(\alpha^2/8)} \quad (34)$$

или

$$\frac{d\alpha}{dt} = 4\pi^2 \frac{\varepsilon V^2}{\lambda^2} \frac{\sqrt{\ln(S/\lambda)}}{(S/\lambda)^2}. \quad (35)$$

Можно также построить [6], зависимость среднего и минимального радиуса кривизны излучины от степени ее развитости, то есть от α или от S/λ . Например, зависимость минимального радиуса R^* от α имеет вид

$$R^*/\lambda = \frac{2}{\pi} \frac{\exp(\alpha/4)^2}{\alpha}. \quad (36)$$

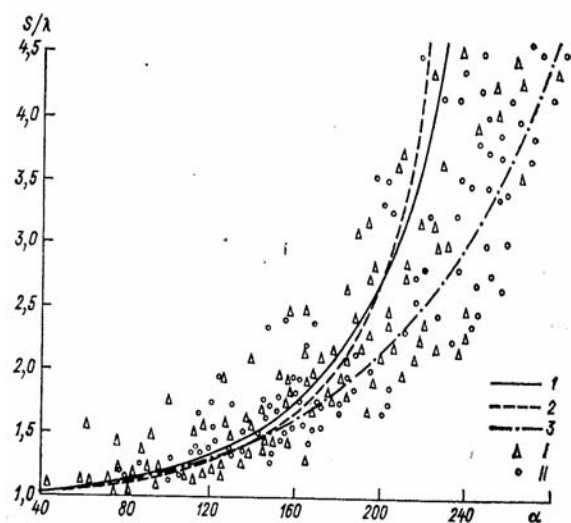


Рис. 4. Связь степени развитости излучин с углами их разворота

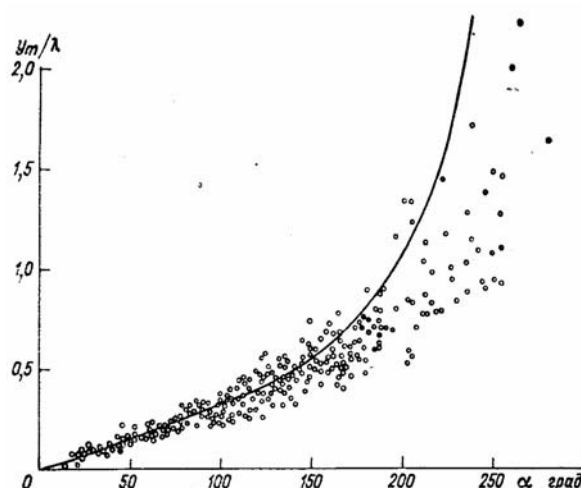


Рис. 5. Связь стрелы прогиба излучины с углом ее разворота

Для проверки выведенных теоретическим путем морфометрических зависимостей были использованы эмпирические данные, полученные главным образом И. В. Поповым и М. М. Гендельманом в отделе русловых процессов ГГИ. На рис. 4 показаны графики зависимости степени развитости излучин S/λ от углов их разворота α , выраженные формулами (25), (26) и (33). Видно, что график зависимости (33), полученной из математической модели, наилучшим образом соответствует эмпирическим данным.

На рис. 5 представлен график зависимости (27), выражающий связь стрелы прогиба излучины y_m/λ с углом ее разворота α . Соответствие этой зависимости эмпирическим данным, по крайней мере качественное, сомнений не вызывает.

На следующих двух графиках (см. рис. 6, 7) представлены зависимости (34) и (35), выражающие скорость развития излучины $\frac{d\alpha}{dt}$ от угла α и от степени развитости S/λ .

На этих же рисунках показаны графики аналогичных зависимостей для аппроксимации СПК, выраженной формулой (25), и для точной зависимости между параметрами СПК, выраженной формулой (26). Качественное соответствие этих графиков натурным данным несомненно.

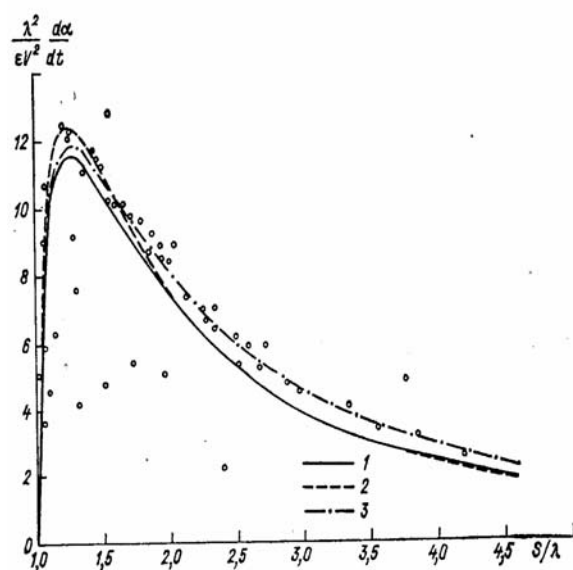


Рис. 6. Связь скорости разворота излучин со степенью их развитости

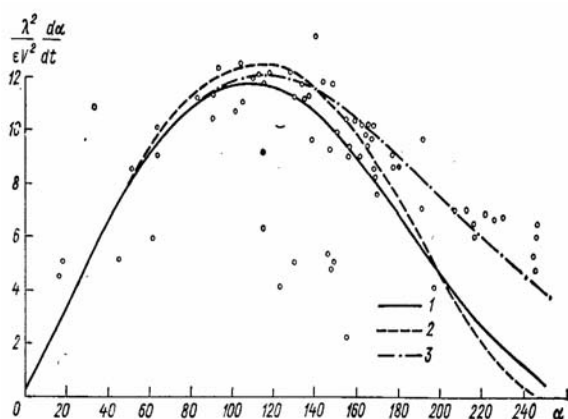


Рис. 7. Связь скорости разворота излучин с углами разворота

Таким образом, очевидное соответствие морфометрических зависимостей, вытекающих из построенной математической модели плановых деформаций меандрирующих русел, натурным данным служит доказательством того, что модель в целом правильно описывает основные закономерности процесса. Разумеется, для того чтобы эта или подобная модель могла служить инструментом расчета плановых деформаций русла, необходимо сделать еще очень много. Например,

потребуется оценить значения коэффициента податливости берега ϵ , а это работа не только огромного объема, но и колоссальной сложности, поскольку этот показатель зависит не просто от большого количества факторов, но, скорее всего, и от их сочетания. В любом случае расчеты, которые могут быть получены с помощью таких моделей, вряд ли когда-нибудь будут достаточно точными. Однако с их помощью вполне можно будет получать качественный прогноз плановых деформаций русла, как это делает гидроморфологическая теория руслового процесса.

Во всяком случае, как было показано в моих работах, разработанная модель дает возможность описывать связи между различными параметрами излучины, причем некоторые из таких связей ранее никогда не описывались какими-либо аналитическими зависимостями, например зависимость (36). Те же формулы, которые на основании анализа натурального материала выводились разными исследователями, с помощью описанной модели удалось улучшить. Даже в тех случаях, когда авторы подобных формул связывали те или иные показатели меандрирования с параметрами русла и потока, отличными от тех, которые выводились из приведенной модели, внимательный анализ позволял установить структурную связь между формулами этих авторов и зависимостями, вытекающими из модели. Например, одной из наиболее надежных формул для скорости размыва берега считается формула Н. Е. Кондратьева [7]

$$c = c_m k \frac{h - h_0}{h_* - h_0}, \quad (37)$$

где c — скорость размыва в расчетном створе; c_m — максимальная скорость бокового размыва на излучине; h , h_0 и h_* — максимальные глубины соответственно в расчетном створе, в створе перегиба и в створе максимальных деформаций; k — эмпирический коэффициент, монотонно возрастающий от 0 до 1 при изменении α от 0 до 160° , а затем монотонно убывающий. В работе [8] было показано, что полученное мною выражение для скорости бокового размыва

$$N = \epsilon \frac{V^2}{R} \quad (38)$$

по сути очень близко к формуле Н. Е. Кондратьева и выражает одни и те же закономерности. При этом во многих случаях использовать формулу (38) проще, чем формулу (37), так как требуется меньший набор исходных данных.

Кстати, интересно отметить, что у Н. Е. Кондратьева есть работа [7], в которой он аппроксимировал осевую линию излучины следующим уравнением:

$$\frac{1}{R} = -\frac{a}{S} \sin\left(\pi \frac{s}{S}\right) - \frac{b}{S} \sin\left(3\pi \frac{s}{S}\right), \quad (39)$$

где a и b — некоторые параметры, определяемые подбором. Выше было отмечено, что функция (29) является хорошим приближением к решению уравнения (28). Также приближенным решением этого уравнения является и сумма

$$\theta = \frac{\omega_0}{2} + \sum_{n=1}^m \omega_n \cos\left(\pi n \frac{s}{S}\right). \quad (40)$$

В этом контексте уравнения (24) и (39) можно рассматривать как разложения, содержащие одну и две гармоники соответственно. Лично для меня, работавшего в ГГИ вместе с Н. Е. Кондратьевым, довольно удивительно, что он, не очень приветствовавший использование математических методов в русловом процессе, тем не менее так угадал математическое выражение, позволяющее хорошо аппроксимировать плановую форму излучины.

Таково вкратце изложение результатов моей работы, которую я выполнял под руководством К. В. Гришанина. Еще раз хочу сказать, что он оказал очень большое влияние на мою деятельность как ученого. И уж совсем отдельная тема, каким прекрасным человеком он был и какое удовольствие доставляло общение с ним.

Список литературы

1. Гришанин К. В., Замышляев В. И. Возникновение меандрирования как проблема гидродинамической неустойчивости // Тр. ГГИ. — 1985. — Вып. 301. — С. 5–12.
2. Замышляев В. И. Математическая модель плановых переформирований речного русла // Тр. ГГИ. — 1983. — Вып. 288. — С. 56–72.
3. Langbein W. B., Leopold L. B. River meanders theory of minimum variance // U. S. Geol. Surv. Prof. Paper, 422-H. — 1966. — 15 p.
4. Замышляев В. И. Аналитический вывод некоторых морфометрических зависимостей // Вопросы гидрологии суши: докл. конф. молодых ученых и специалистов ГГИ. — Л., 1982. — С. 135–142.
5. Замышляев В. И. Аналитическое решение уравнения плановой деформации русла. — Деп. в ВИНТИ, 12/IV 1982 г. — № 1739. — 82 деп.
6. Замышляев В. И. Изменение радиуса кривизны и скорости бокового размыва излучины в процессе ее развития // Тр. ГГИ. — 1985. — Вып. 301. — С. 12–17.
7. Кондратьев Н. Е. Гидроморфологические основы расчетов свободного меандрирования // Тр. ГГИ. — 1968. — Вып. 155. — С. 5–38.
8. Замышляев В. И. Сравнение двух формул скорости размыва берега излучины // Тр. ГГИ. — 1987. — Вып. 307. — С. 27–31.

**ДЕЯТЕЛЬНОСТЬ К. В. ГРИШАНИНА ПО СОЗДАНИЮ ЧИСЛЕННЫХ
МОДЕЛЕЙ ДВИЖЕНИЯ РЕЧНОГО ПОТОКА ПРИМЕНительно К ЗАДАЧАМ
ПУТЕВОГО ХОЗЯЙСТВА НА РЕЧНОМ ТРАНСПОРТЕ****THE WORK OF K. V. GRISHANIN IN MAKING NUMERICAL MODELS
OF RIVER STREAMING AS APPLIED TO THE TASK OF ROUTE FACILITIES
AT THE RIVER TRANSPORT**

Показана роль К. В. Гришанина в создании численных моделей, описывающих движение речного потока и наносов при проведении интенсивных дноуглубительных работ и разработке подводных русловых карьеров нерудных строительных материалов.

The article shows a role of K. V. Grishanin in making numerical models describing river streaming and sediments while carrying out dredging and quarrying of underwater non-metallic construction materials.

Ключевые слова: численная модель, речной поток, дноуглубительные работы, русловые карьеры.

Key words: numerical model, river stream, dredging, bed quarries.

ОСНОВНЫМИ задачами организаций путевого хозяйства речного транспорта являются поддержание заданных габаритов водного пути, а также обеспечение бесперебойного и безопасного судоходства. С этой целью выполняется целый комплекс путевых работ, одним из основных видов которых является дноуглубление. При этом на перекатах, имеющих габариты судового хода меньше гарантированных на данном участке реки, с помощью землососных или многочерпаковых снарядов разрабатываются дноуглубительные прорезы, размеры которых достаточны для движения судов, толкаемых и буксируемых составов. Для расчетного обоснования путевых мероприятий были созданы соответствующие руководящие документы, в том числе и на кафедре водных путей и водных изысканий Ленинградского института водного транспорта (в настоящее время — СПГУВК) при самом активном участии профессора, доктора технических наук Кирилла Владимировича Гришанина [11; 12].

Во второй половине XX в. на водных путях Советского Союза дноуглубительные работы для увеличения и поддержания габаритов судового хода велись в больших объемах и на достаточно протяженных участках рек, из-

меряемых десятками и даже сотнями километров. Однако процесс увеличения судоходных глубин при помощи дноуглубительных работ имеет естественное ограничение в виде предельных или гидравлически допустимых глубин. Под гидравлически допустимыми понимаются глубины, получение которых не приводит к заметному понижению кривой свободной поверхности речного потока. Дальнейший рост глубин может привести к значительному снижению уровней воды и увеличению объемов дноуглубительных работ из-за необходимости добавочного углубления дна перекатов, а также повлечь ряд неблагоприятных последствий экологического и хозяйственного порядка. Значительное влияние на путевые условия оказывает также добыча в руслах судоходных рек нерудных строительных материалов (песка, гравия, песчано-гравийной смеси). Разработка подводных русловых карьеров началась в 1950-х гг. и постепенно приобрела достаточно широкий размах, что привело на ряде рек к значительному понижению уровней воды и интенсивным русловым переформированиям в местах добычи НСМ, а также на участках, расположенных выше карьеров. Экологические последствия разработки русловых карьеров заметно осложняются при освоении подвод-

ного месторождения, находящегося на сравнительно небольшой реке. В этом случае сначала создается подходной канал к месторождению, причем получаемые на судовом ходу глубины обычно превышают гидравлически допустимые для углубляемого участка реки. Тогда уже одно только производство дноуглубительных работ приводит к понижению уровней воды, а последующая разработка подводных русловых карьеров, особенно крупных, может повлечь для потока очень серьезные последствия, резко понижая его базис эрозии и вызывая интенсивный размыв русла [1].

Количественная оценка негативных последствий интенсивного дноуглубления и разработки подводных русловых карьеров требует большого объема вычислений, поэтому для их выполнения были созданы самые разнообразные численные модели движения речного потока и наносов, опирающиеся на использование вычислительной техники.

К 1970-м гг. электронно-вычислительные машины достигли достаточно высокого уровня развития, в различных научных организациях и высших учебных заведениях активно создавались компьютерные программы для гидравлических расчетов, в этой области появились первые руководящие документы [13]. Однако рекомендуемые программы были еще далеки от совершенства, поэтому многими исследователями продолжалось создание новых численных моделей движения речного потока. Такая работа проводилась и на кафедре водных путей и водных изысканий ЛИВТа. Быстрое совершенствование вычислительной техники позволило перейти от компьютеризации упрощенных расчетных методов [6] к решению системы уравнений речной гидравлики, описывающих движение воды и наносов в одномерной постановке (создание в этот период времени именно одномерных численных моделей объясняется большой протяженностью моделируемых участков судоходных рек).

Огромная роль в этой работе принадлежала К. В. Гришанину. Обладая энциклопедическими знаниями в области речной гидравлики и производства путевых работ, а также чрезвычайно высоким уровнем математической подготовки, Кирилл Владимирович сформулировал основные положения будущих

одномерных численных моделей, созданных на кафедре водных путей и водных изысканий ЛИВТа (СПГУВК). Он задал исходные и рабочие уравнения, определил состав и очередность вычислений, предложил способ схематизации поперечных сечений для учета изменений ширины русла при понижении уровней воды, постоянно контролировал и оценивал полученные результаты. В течение 1980–1990-х гг. К. В. Гришанин консультировал многих разработчиков численных моделей движения речного потока (как находящегося в естественном состоянии, так и подвергнувшегося антропогенному воздействию) по вопросам общей постановки задач, учета гидравлического сопротивления естественных русел и вычисления русловых деформаций. Эти проблемы также нашли свое отражение во многих трудах Кирилла Владимировича [2–5] и руководящих документах, разработанных при его участии [14, 15].

Первым под руководством К. В. Гришанина было выполнено моделирование снижения кривой свободной поверхности на нижней Оке, которое являлось частью выполненной в 1981–1984 гг. по заказу Министерства речного флота РСФСР работы, имевшей целью выяснение возможности создания и поддержания гарантированных глубин не менее 2,5 м на участке Южный порт г. Москвы — Щурово — устье р. Оки. Общая длина моделируемого участка реки составила 642 км. Гидравлические расчеты, выполненные при расходах воды, соответствующих проектному уровню воды 97,5 % обеспеченности, показали, что при создании судоходной глубины 2,5 м на нижней Оке снижение кривой свободной поверхности может достигать 0,94 м [7].

Эта же численная модель была использована в 1984 г. для определения величины понижения кривой свободной поверхности, возможного в результате планировавшегося проведения интенсивных дноуглубительных работ на р. Печоре (плес Усть-Уса — Усть-Кожва, общая длина моделируемого участка 124 км).

В 1984–1985 гг. (после некоторого усовершенствования численной модели) также под руководством К. В. Гришанина было выполнено моделирование влияния интенсивного дноуглубления на положение кривой свобод-

ной поверхности р. Лены в рамках разрабатывавшихся Ленгипроречтрансом обосновывающих материалов строительства на этой реке транспортного гидроузла с целью коренного улучшения судоходных условий на участке от г. Киренска до г. Усть-Кута. Моделируемый участок верхней Лены, общая длина которого составила 143 км, включал в себя два плеса, различных по условиям проведения путевых работ: Усть-Кут — Таюра (3624–3541,5 км) и Таюра — Марково (3541,5–3481,1 км). Построение кривых свободной поверхности производилось на участке от Марково до двух рассматриваемых створов проектировавшегося гидроузла (3593,9 и 3572,5 км) для пяти значений гарантированной глубины. Кроме того, был выполнен расчет отметок бытовой и проектной кривых свободной поверхности на участке от створа 3593,9 км до г. Усть-Кута при увеличенной ширине судового хода. Расчетное значение снижения проектного уровня воды в створе гидроузла получилось равным 1,99 м [8].

Приобретенный опыт численного моделирования позволил провести под руководством К. В. Гришанина усовершенствование используемых компьютерных программ: был создан новый программный комплекс, имеющий модульную структуру, введен учет фактической геометрии русла вместо предположения о параболической форме поперечных сечений, предусмотрена возможность вычисления деформаций русла. С помощью новой модели в 1989–1993 гг. были выполнены расчеты положения проектных кривых свободной поверхности при разработке подходного канала к Катравожскому месторождению ПГС на р. Сось (общая длина моделируемого участка 43 км), проведена оценка перспектив улучшения судоходных условий на верхнем Дону (плес Кривоборье — Семилуки, смоделировано 20 вариантов проектного состояния участка длиной 53 км), моделировался характер изменения кривой свободной поверхности при проведении мероприятий по повышению глубин р. Оки на участке Кузьминск — Беломут (общей протяженностью 46 км).

Для оценки последствий разработки подводных русловых карьеров нерудных строительных материалов (НСМ) был разработан более сложный программный комп-

лекс, учитывающий как добычу НСМ, так и необходимость производства дноуглубительных работ для обеспечения вывоза добытых материалов. Этот комплекс использовался в 1989–1994 гг. для моделирования понижения кривых свободной поверхности при определении экологических последствий разработки ряда подводных месторождений НСМ, среди которых можно назвать Парчегское, Чукачойское, Зеленецкое, Койтыбожское, Латкинское и Алешинское месторождения песка и ПГС на р. Вычегде (общая протяженность расчетного участка около 50 км), месторождение Казенщина на р. Сев. Двине (длина участка 144 км), Бетьковское и Закамское месторождения на р. Каме (участок длиной 15 км), Казанские Юрты и Вершининское месторождения ПГС на р. Томь [10; 11].

Наиболее совершенный и сложный вариант программного комплекса позволяет моделировать последовательное освоение подводного месторождения, когда зона инженерного вмешательства постепенно распространяется от устья вверх по течению, а длина нижнего участка реки, где производятся дноуглубительные работы и разрабатываются подводные карьеры, из года в год увеличивается. Выше разрабатываемых карьеров река остается несудоходной, испытывая, однако, все последствия безвозвратного извлечения аллювия из своего русла. Возможна также оценка влияния разработки подводных карьеров и дноуглубительных прорезей на русловой режим транзитного участка реки, судоходного на всем своем протяжении. Программным комплексом моделируется постепенная разработка подводных карьеров на полную глубину за заданный промежуток времени (в том числе и в течение нескольких навигаций), причем сроки начала и окончания работ на разных карьерах могут быть различными. Варьируя сроки разработки карьеров, можно моделировать различные схемы освоения подводных месторождений НСМ (одновременная постепенная разработка всех блоков; разработка блоков с оставлением между ними достаточно протяженных перемычек; пионерное освоение месторождения, когда разработка каждого последующего блока начинается после полного окончания работ на предыдущем и т. д.).

Список литературы

1. Гладков Г. Л., Москаль А. В. Влияние дноуглубительных работ и добычи НСМ на русловой режим реки Сось // Резервы пропускной способности портовых сооружений и рационализация методов ведения путевых работ в газонефтедобывающих районах Сибири: сб. науч. тр. — Л.: ЛИВТ, 1988. — С. 90–97.
2. Гришанин К. В. Динамика русловых потоков. — 2-е изд., перераб. и доп. — Л.: Гидрометеиздат, 1979. — 312 с.
3. Гришанин К. В. Основы динамики русловых потоков: учебник для институтов водн. трансп. — М.: Транспорт, 1990. — 320 с.
4. Гришанин К. В. Гидравлическое сопротивление естественных русел. — СПб.: Гидрометеиздат, 1992. — 183 с.
5. Гришанин К. В. Реакция речного потока на искусственные изменения его русла / К. В. Гришанин [и др.] // Русловые процессы и наносы: тр. V Всесоюз. гидрологического съезда. — Л.: Гидрометеиздат, 1988. — Т. 10. — Кн. 1. — С. 362–373.
6. Методика расчета понижения уровней воды при добыче нерудных строительных материалов / Главное управление портов МРФ РСФСР. — М.: Транспорт, 1984. — 20 с.
7. Москаль А. В. Влияние дноуглубления на уровенный режим рек (на примере нижней Оки) // Исследование русловых процессов для практики народного хозяйства: тез. докл. III Всесоюз. науч. конф. — М.: МГУ, 1983. — С. 259–260.
8. Москаль А. В. Программа расчета понижения уровней воды при интенсивном дноуглублении // Русловой процесс на реках и путевые работы для судоходства и повышения эффективности работы гидротехнических сооружений: сб. науч. тр. — Л.: ЛИВТ, 1985. — С. 132–139.
9. Москаль А. В. Численное моделирование негативных последствий разработки подводных карьеров НСМ на верхней Томи // Внутренние водные пути России. История. Современность. Перспективы: материалы регион. науч.-техн. конф. — СПб.: СПГУВК, 1998. — С. 128–131.
10. Москаль А. В., Соколов Ю. П. Опыт расчетного обоснования разработки подводных карьеров на судоходных реках // Водные пути и гидротехнические сооружения: сб. науч. тр. / под ред. Г. И. Мелконяна. — СПб.: СПбГУВК, 2002. — С. 103–107.
11. Руководство по расчету деформаций русла и прорезей на перекатах судоходных рек / МРФ РСФСР. — М.: Транспорт, 1965. — 148 с.
12. Руководство по проектированию коренного улучшения судоходных условий на затруднительных участках свободных рек / МРФ РСФСР. — Л.: Транспорт, 1974. — 209 с.
13. Руководство по применению ЭВМ при проектировании землечерпательных и выправительных работ / МРФ РСФСР. — М.: Транспорт, 1975. — 208 с.
14. Руководство по проектированию карьеров. Мероприятия по предотвращению понижения уровней воды. — Л.: Транспорт, 1987. — 51 с.
15. Руководство по улучшению судоходных условий на свободных реках / Главводпуть концерна «Росречфлот» // Тр. ЛИВТа. — 1992. — 312 с.

УДК 627.74:624.132.6

В. В. Беликов,д-р техн. наук, ст. науч. сотр.,
ОАО «НИИЭС»
(Москва);**Н. М. Борисова,**ОАО «НИИЭС»
(Москва);**Г. А. Гладков,**д-р техн. наук, профессор,
СПГУВК

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ТРАНСПОРТА НАНОСОВ ДЛЯ РАСЧЕТА ЗАНОСИМОСТИ ДНОУГЛУБИТЕЛЬНЫХ ПРОРЕЗЕЙ И РУСЛОВЫХ КАРЬЕРОВ

MATHEMATICAL MODEL OF SILT TRANSPORT FOR CALCULATION OF SEDIMENT ACCUMULATION IN DREDGING CUTS AND BED QUARRIES

Предложена математическая и численная модель деформаций дна в неравномерных и нестационарных речных потоках, пригодная для описания процессов заносимости дноуглубительных прорезей и русловых карьеров. Модель содержит минимальное число уравнений и эмпирических констант. Выполнено сопоставление с данными экспериментальных исследований.

The authors offer mathematical and numerical deformations model of the bottom deformation in irregular and transitional river streams suitable for the description of sediment accumulation in dredging cuts and bed quarries. The model contains minimum of equations and empirical constants. Comparison with data of experimental investigations is given.

Ключевые слова: математическая модель, деформации дна, русло, поток, заносимость, карьеры, модель транспорта наносов.

Key words: mathematical model, bottom deformation, bed, stream, sediment accumulation, quarries, model of sediment transport.

ПРОГНОЗ трансформации дноуглубительных прорезей и заносимости русловых карьеров в реках имеет важное значение для обеспечения безопасности и эффективности судоходства. В последнее время для прогнозных расчетов все чаще применяется численное моделирование (это направление всегда поддерживал Кирилл Владимирович Гришанин). Очевидно, необходимо, чтобы математическая модель адекватно отражала реальное явление и описывала все основные эффекты, присущие этому явлению. Для рассматриваемых задач важным условием является возможность учета в модели процесса переформирования подводного откоса, образующая которого направлена вдоль скорости течения. Известное уравнение баланса наносов (Экснера) в двумерной (плановой) постановке не пригодно для описания этого эффекта. В представленной работе предлага-

ется численная модель для расчета подобного рода течений с деформируемым дном и проводится ее верификация на результатах экспериментальных исследований размыва подводного откоса и заносимости руслового карьера.

К истории вопроса

Натурные исследования и анализ закономерностей заносимости дноуглубительных прорезей и русловых карьеров неоднократно проводились многими учеными. На основе анализа промеров дноуглубительных прорезей К. В. Гришанин (1974) показал, что основными факторами заносимости являются: надвижение на прорезь средних русловых форм (побочней, осередков, ленточных гряд); превышение расхода наносов, поступающих в прорезь сверху, над транспортирующей способностью потока в прорези (продольная зано-

симось); уполаживание (оползание) боковых откосов прорези (поперечная заносимость). Практически те же самые факторы являются основными и в процессе заносимости русловых карьеров.

Если заносимость вследствие движения русловых форм можно отнести к факторам естественного руслового процесса, то продольная и поперечная заносимости тесно связаны с самим устройством прорези и размерами карьера. Универсальный характер, то есть относящийся ко всем прорезям и карьерам, выполненным в сыпучих грунтах, имеет третий фактор заносимости — уполаживание откосов (поперечная заносимость). Причина этого явления состоит в том, что на откосе существует составляющая расхода наносов, направленная по линии наибольшего градиента дна, независимо от направления скорости течения воды. При скоростях течения больше неразмывающей для откоса частица, пришедшая в движение, начинает смещаться вниз по откосу (сальтация, перекачивание) и по прошествии некоторого времени оказывается у его подошвы. Процесс уполаживания сначала идет быстро, а затем, вследствие уменьшения угла откоса, замедляется.

Уже достаточно давно в исследованиях А. Е. Шейдеггера, В. Куллинга, И. Фредсо, Ф. Ангелунда было показано, что процесс уполаживания подводного откоса с прямолинейной образующей, направленной вдоль скорости течения, хорошо описывается одномерным уравнением диффузии, составленным для отметки дна водотока:

$$(1-p) \frac{\partial Z_b}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial y} D \frac{\partial Z_b}{\partial y}, \quad (1)$$

где p — коэффициент пористости грунта, $Z_b(t, y)$ — отметка дна, t — время, y — координата поперек склона, D — коэффициент диффузии, характеризующий величину удельного поперечного расхода наносов.

Ф. Ангелунд и И. Фредсо получили зависимость для коэффициента диффузии D и нашли решение начально-краевой задачи для уравнения (1) применительно к гипотетическому случаю деформации подводного откоса с начальным профилем в виде вертикальной ступеньки в русле неограниченной ширины.

Эти исследования получили продолжение в работах А. М. Лавыгина [1; 2], выполненных под научным руководством К. В. Гришанина. Были получены аналитические решения для прорези конечной ширины, произведена верификация модели на большом массиве натурных данных и доказана ее эффективность при решении практических задач дноуглубления.

Однако область применения одномерной в поперечном к направлению прорези модели донных деформаций весьма ограничена. Эта модель не учитывает реальную батиметрию русла и его очертания в плане, процесс продольной заносимости прорези, общие тенденции руслового процесса на рассматриваемом участке реки и т. п. Поэтому вполне естественно, что в последнее время в связи с совершенствованием измерительной аппаратуры для водно-технических изысканий и развитием вычислительной техники стали разрабатываться математические и численные модели в двумерной (в плане) и трехмерной постановках для определения скоростных полей течения и трехмерных (пространственных) деформаций дна русла.

Для моделирования русловых потоков хорошую точность и эффективность показали подходы, основанные на численном решении двумерных уравнений Сен-Венана. Вывод этих уравнений, алгоритмы численного интегрирования и примеры расчетов приведены, например, в [3–6]. Однако для деформируемых русел модель Сен-Венана оказывается незамкнутой, и требуется ее доопределение уравнением или системой уравнений для нахождения переменных во времени и пространстве отметок дна.

Зачастую для этой цели применяется так называемое двумерное уравнение баланса наносов (уравнение Экснера):

$$(1-p) \frac{\partial Z_b}{\partial t} = - \frac{\partial US_* h}{\partial x} - \frac{\partial VS_* h}{\partial y}, \quad (2)$$

где U, V — составляющие вектора средней по глубине скорости воды по осям x, y ; $h(x, y, t)$ — глубина потока; $S_* (x, y, t)$ — насыщающая мутность (средняя на вертикали объемная концентрация наносов в эквивалентном равномерном потоке).

Это уравнение предполагает использование гипотезы, согласно которой насыщающая мутность (равновесная концентрация наносов) зависит только от локальных характеристик потока и связана с ними так же, как и в равномерном потоке. Применение уравнения (2) совместно с двумерными уравнениями Сен-Венана для прогноза русловых переформирований для ряда задач дает вполне приемлемые результаты (см., например [6–9]).

Однако уравнение (2) малоприспособлено для описания плановых деформаций при наличии в русле участков дна с достаточно крутыми откосами (дноуглубительные прорезы, карьеры, крутые берега на излучинах и т. п.). Действительно, в случае прямолинейного русла с подводным склоном, образующая которого параллельна вектору скорости (причем этот вектор и глубина потока не зависят от продольной координаты x), из (2) очевидно следует, что $Z_b = \text{const}$. Таким образом, (2) не описывает такой известный эффект, как переформирование подводного склона, образующая которого параллельна вектору скорости потока. Это обусловлено тем, что при написании (2) постулируется коллинеарность векторов скорости воды и расхода твердой фазы, что в общем случае неверно.

Попытка доопределить уравнение (2) членами, позволяющими описывать рассмотренный выше эффект, предпринималась рядом авторов. В работах [10; 11] была теоретически обоснована необходимость введения в уравнение (2) диффузионных слагаемых и получено выражение для коэффициента диффузии отметки дна (который принимается шаровым тензором), пропорциональное величине продольного (в направлении вектора скорости) удельного расхода наносов:

$$(1-p) \frac{\partial Z_b}{\partial t} + \frac{\partial US_*h}{\partial x} + \frac{\partial VS_*h}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} D \frac{\partial Z_b}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} D \frac{\partial Z_b}{\partial y}, \quad (3)$$

где $D = ahS_*|\vec{U}|$, $|\vec{U}| = \sqrt{U^2 + V^2}$, a — коэффициент пропорциональности.

Верификация модели (3) на экспериментальных данных по уполаживанию подводного откоса показала хорошую точность.

В работах [12; 13] предложена и развита модель достаточно похожая на предыдущую. Основные отличия состоят в том, что диф-

фузионное слагаемое записывается только для ортогонального вектору скорости потока направления, дополнительным слагаемым учитывается влияние кривизны линий тока на изменение отметок дна, коэффициент диффузии D принимается пропорциональным не скорости течения, а величине несдвигающей скорости потока. С применением этой модели получены интересные результаты по расчету русловых переформирований.

Во всех упомянутых выше моделях деформаций подразумевается, что концентрация частиц наносов в потоке близка к равновесной. В то же время существует ряд задач, при решении которых это допущение неприменимо. Например, в нижние бьефы гидроузлов обычно попадает осветленный (без наносов) водный поток, в водохранилища, наоборот, поступает перенасыщенный наносами поток, при работе земснарядов возникает избыточная мутность, в резко нестационарных и волновых течениях концентрация наносов в потоке также отличается от равновесной. В работе [14] была предложена и экспериментально обоснована модель транспорта наносов в произвольном потоке (в одномерной постановке), в котором концентрация частиц в общем случае не совпадает с равновесной. При этом показано, что удельный расход наносов со дна в толщу потока пропорционален величине $(S - S_*)$ (см. также [11]).

В настоящей работе предпринята попытка учесть достоинства ряда вышеупомянутых моделей и предложить математическую модель транспорта наносов в неравномерных и нестационарных речных потоках (пока для гидравлически однородного грунта).

Математическая и численная модель

Для численных расчетов речных течений с деформируемым дном предлагается применять математическую модель, описываемую системой двумерных уравнений Сен-Венана (см., например, [3–5]) и следующей системой уравнений в частных производных и замыкающих соотношений:

$$\frac{\partial hS}{\partial t} + \frac{\partial USh}{\partial x} + \frac{\partial VSh}{\partial y} = -K(S - S_*); \quad (4)$$

$$(1-p) \frac{\partial Z_b}{\partial t} = K(S - S_*) + \frac{\partial}{\partial x} D \frac{\partial Z_b}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} D \frac{\partial Z_b}{\partial y}; \quad (5)$$

$$K = \begin{cases} \alpha U_* + (1 - \alpha)W, & U_* \geq W \\ W, & U_* \leq W \end{cases} \quad 0 \leq \alpha < 1; \quad (6)$$

$$D = \beta \tilde{S} h W; \quad (7)$$

$$S_* = \alpha_1 \frac{\lambda \rho}{2 \rho_s} \frac{(|\vec{U}| - U_N)^2}{gh} \left(\frac{0,13}{\operatorname{tg} \varphi} + 0,01 \frac{|\vec{U}|}{W} \right);$$

$$\lambda = 2 g n^2 h^{-1/3}, \quad (8)$$

где: t — время; h — глубина потока; U , V — составляющие скорости течения по оси X и Y соответственно; $|\vec{U}| = \sqrt{U^2 + V^2}$; S — объемная концентрация частиц наносов в потоке; S_* — равновесная объемная концентрация частиц (концентрация насыщения), принимаемая по видоизмененной формуле Бэгнольда; K — коэффициент интенсивности вертикального обмена наносами между дном и потоком; p — пористость грунта (отношение объема пор к объему всего грунта с порами); ρ_s , ρ — плотности грунта и воды соответственно; φ — угол внутреннего трения грунта; W — гидравлическая крупность грунта; U_* — динамическая скорость; $|\vec{U}|$, U_N модуль средней на вертикали скорости потока и несдвигающая скорость соответственно; λ — коэффициент гидравлического трения, вычисляемый по формуле Маннинга; n — коэффициент шероховатости.

Несдвигающая скорость принималась по формуле В. Н. Гончарова–Ц. Е. Мирцхулавы, которая с учетом стандартных значений коэффициентов имеет два формально эквивалентных вида записи:

$$U_N = \lg \frac{8,8h}{d_{90}} \sqrt{\frac{2}{3,5} [(\rho_s - \rho) g d_{50} + 1,25 C_y^H]}; \quad (9)$$

$$U_N = 0,18 \sqrt{\frac{2}{3,5\lambda} [(\rho_s - \rho) g d_{50} + 1,25 C_y^H]}, \quad (10)$$

где: C_y^H — сцепление грунта, в т/м²; d_{50} — средний диаметр частиц грунта, d_{90} — диаметр 90 % частиц грунта.

При расчете коэффициента диффузии (7) принималось три варианта формул для $\tilde{S}$:

а) по суммарной равновесной концентрации влекомых и взвешенных наносов

$$\tilde{S} = S_*; \quad (11)$$

б) по придонной равновесной концентрации

$$\tilde{S} = \alpha_1 \frac{\lambda \rho}{2 \rho_s} \frac{(|\vec{U}| - U_N)^2 \cdot 0,13}{gh \operatorname{tg} \varphi}; \quad (12)$$

в) по придонной концентрации «без квадрата»

$$\tilde{S} = \alpha_1 \frac{\lambda \rho}{2 \rho_s} \frac{(|\vec{U}| - U_N) |\vec{U}| \cdot 0,13}{gh \operatorname{tg} \varphi}. \quad (13)$$

В качестве начальных условий задаются начальная поверхность дна $Z(x, y, 0)$, соответствующие ей мгновенные поля скорости $\vec{U}(x, y, 0)$, глубины $h(x, y, 0)$ и концентрации $S(x, y, 0)$.

В качестве граничных условий на «твердых» границах задается условие непротекания, на «жидких» границах обычно задаются расходы либо уровни воды, на границах, через которые поток втекает в расчетную область, задается концентрация наносов. Иногда применяются и более сложные типы граничных условий (связь расходов с уровнями, «неотражающие» граничные условия и т. п.).

Решение системы уравнений (4)–(5) относительно концентрации наносов и отметок дна осуществляется методом конечных объемов на смешанных треугольно-четыреугольных сетках совместно с уравнениями Сен-Венана. Разработанная численная схема согласована со схемой для уравнения неразрывности жидкой фазы, что исключает возникновение так называемых «диполей» — источников и стоков массы. Схема типа направленных разностей исключает нефизичные осцилляции рельефа дна, обеспечивает свойство «транспортивности» и выполнение разностного аналога сохранения массы для твердой фазы. Для расчетов могут применяться и схемы повышенного порядка точности, обладающие аналогичными свойствами.

Система уравнений (4)–(5) является в некотором смысле «минимальной» для моделирования процессов деформаций дна в неравномерных и нестационарных речных потоках. Действительно, отказ от уравнения (4) приводит, как уже отмечалось выше, к постулированию близости концентрации в потоке к равновесной и не позволяет задавать граничные условия для концентраций. Отказ в уравнении (5) от слагаемых, описывающих диффузию отметок дна, приводит к невозможности учета процессов трансформации (уполаживания) подводных склонов. Понятно также, что для описания трех различных физических про-

цессов (взмыв-осаждение, продольный транспорт наносов, поперечная диффузия отметок дна) в настоящее время (до постижения более общих закономерностей транспорта наносов) необходимо не менее трех эмпирических коэффициентов (в нашей модели это α , β , α_1). Вместе с тем вопрос о выборе замыкающих соотношений модели (6)–(13) остается открытым и требует дальнейших исследований.

В рассматриваемых ниже тестовых задачах при численном моделировании полагалось $\alpha = 0,5$, вид замыкающих соотношений (7)–(13) и параметры α_1 и β варьировались в процессе расчетов.

Уполаживание подводного откоса

Для тестирования модели использовались лабораторные опыты по размыву откоса течением, вектор скорости которого направлен

вдоль образующей этого откоса, проведенные в лаборатории Гидравлики ЦНИИС [10; 11; 15]. Эксперименты были выполнены в русловом лотке с переменным уклоном, имеющим следующие основные размеры: длина — 18 м, ширина — 2 м, высота стенок — 0,8 м. Пропускная способность лотка до 4 м³/с, пределы изменения уклона 0–0,1. Расход воды определялся по треугольному водосливу, расположенному на сливе из лотка. Для проведения опытов в конце рабочей части лотка был устроен специальный карман для улавливания наносов и качающийся щит для регулирования уровня руслового потока. Величина продольного уклона в экспериментах составляла 0,0027.

Размываемая модель (рис. 1) была сформирована из песка, гранулометрический состав которого представлен в табл. 1. При этом $d_{cp} = 0,24$ мм.

Таблица 1

Фракционный состав песка на модели

Диаметр фракций (мм)	1–0,5	0,5–0,25	0,25–0,1	< 0,1
Содержание (%)	0,2	31,9	67,7	0,2



Рис. 1. Общий вид размываемой модели

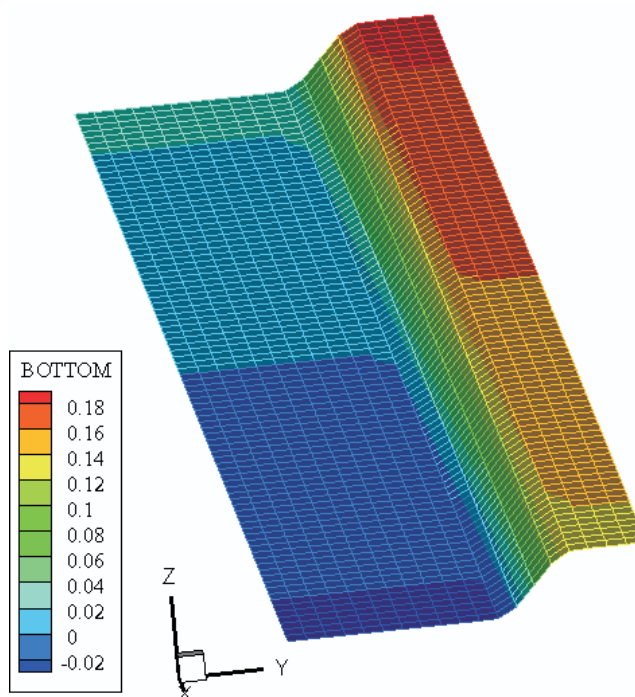


Рис. 2. Отметки дна и прямоугольная сетка для численной модели размываемого откоса

Поперечное сечение модели представляло собой половину сечения трапециевидального русла с коэффициентом заложения откоса $m = 2$. Перед пуском воды проводилась планово-высотная съемка дна. Лоток плавно заполняли водой одновременно с верхнего и нижнего бьефов, чтобы избежать подвижек дна до начала опыта. Во время опыта через определенные интервалы времени измерялись отметки поверхности дна и свободной поверхности воды в фиксированных створах. Результаты замеров затем осредняли.

Расчеты для идентичных условий проводили по модели (4), (5). Для лотка $18,0 \times 2,0$ м была построена прямоугольная сетка из 1800 ячеек размером $0,1 \times 0,2$ м. На входной границе для первого ряда ячеек дно принималось неразмываемым, что соответствовало укрепленному цементной коркой входному участку лотка в эксперименте.

На входной границе задавался расход воды $Q = 112$ л/с и осветленный поток ($S = 0$). Параметры численной модели α_1 и β подбирались в процессе расчета из условия наилучшего совпадения в среднем поперечнике лотка расчетного профиля размытого откоса с данными эксперимента. Результаты расчетов представлены на рис. 3–5.

Наилучшие результаты, как видно из представленных рисунков, дает первый вариант (по придонной концентрации (12) и несдвигающей скорости по формуле (9): $\beta = 40$, $\alpha_1 = 0,25$).

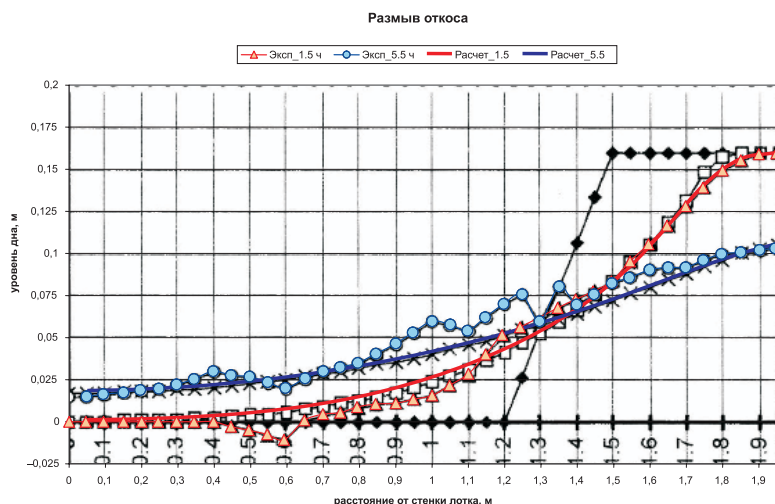


Рис. 3. Уполаживание откоса при расчете коэффициента диффузии (6) по придонной концентрации (12) и несдвигающей скорости по формуле (9): $\beta = 40$, $\alpha_1 = 0,25$

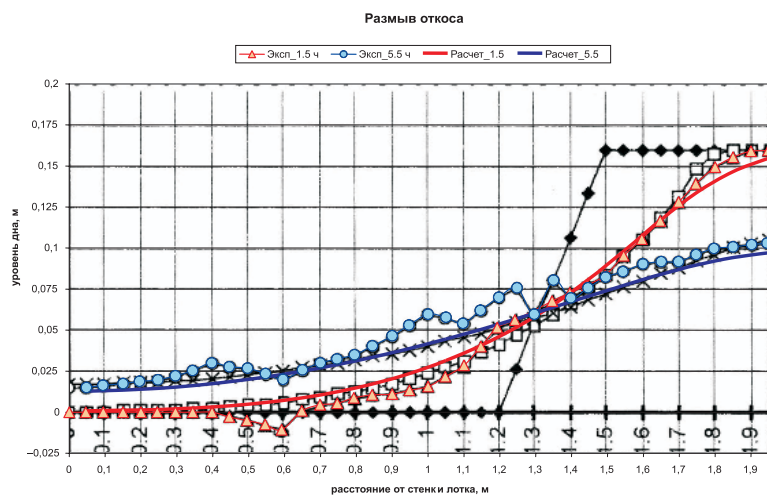


Рис. 4. Уполаживание откоса при расчете коэффициента диффузии по придонной концентрации (12) и несдвигающей скорости по формуле (10): $\beta = 15$, $\alpha_1 = 0,25$

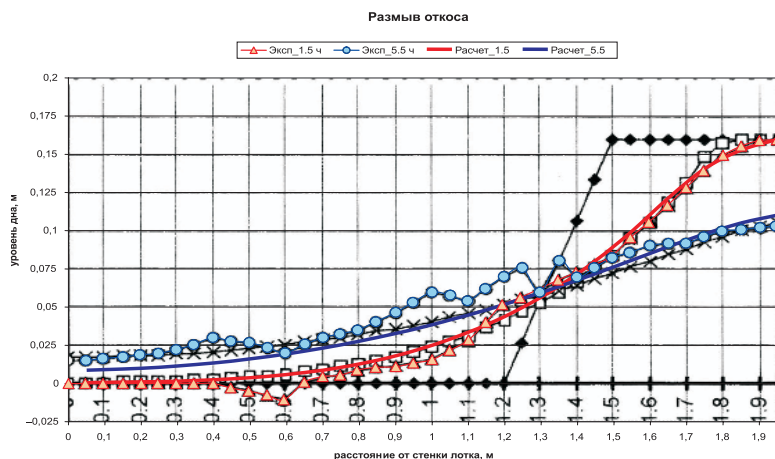


Рис. 5. Уполаживание откоса при расчете диффузии по суммарной концентрации (8), (11) и несдвигающей скорости по формуле (10): $\beta = 30$, $\alpha_1 = 0,25$

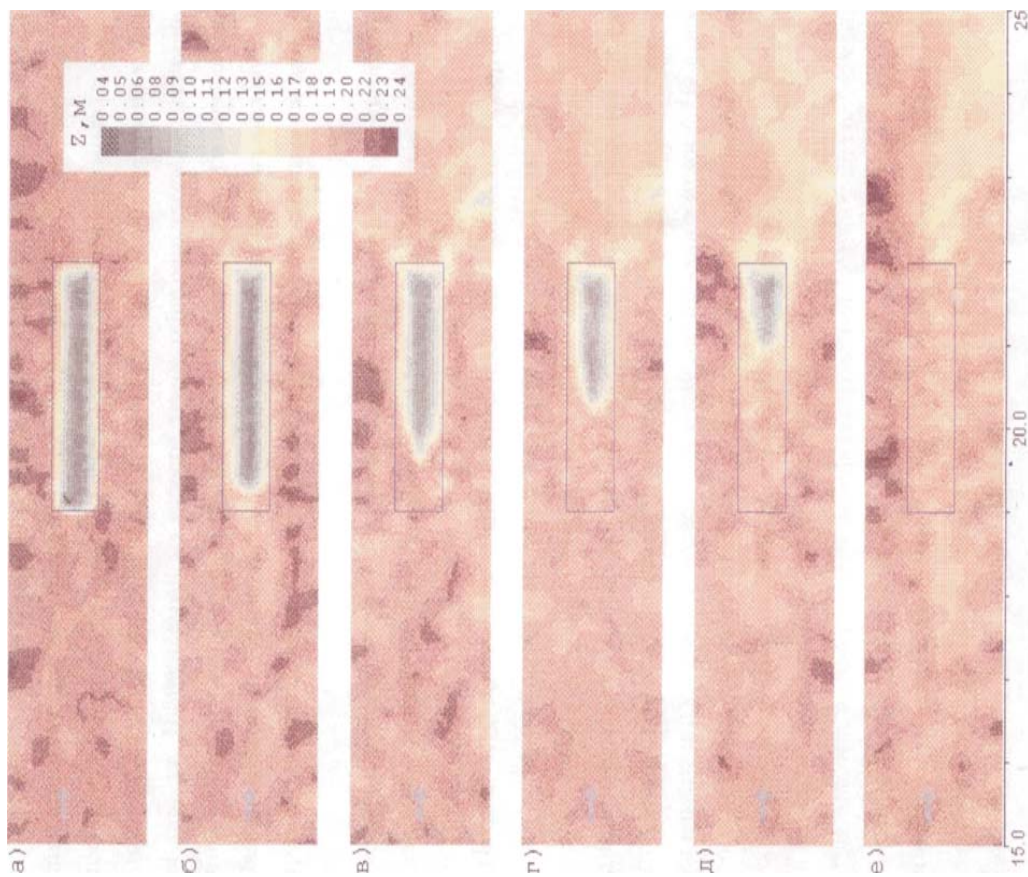


Рис. 6. Переформирования дна в лотке на участке размещения одиночного карьера в процессе его занесения, где *a* — рельеф дна на момент окончания разработки карьера; *б-е* — соответственно через 21,2, 46,9, 73,8, 96,5, 136,9 ч после его отработки

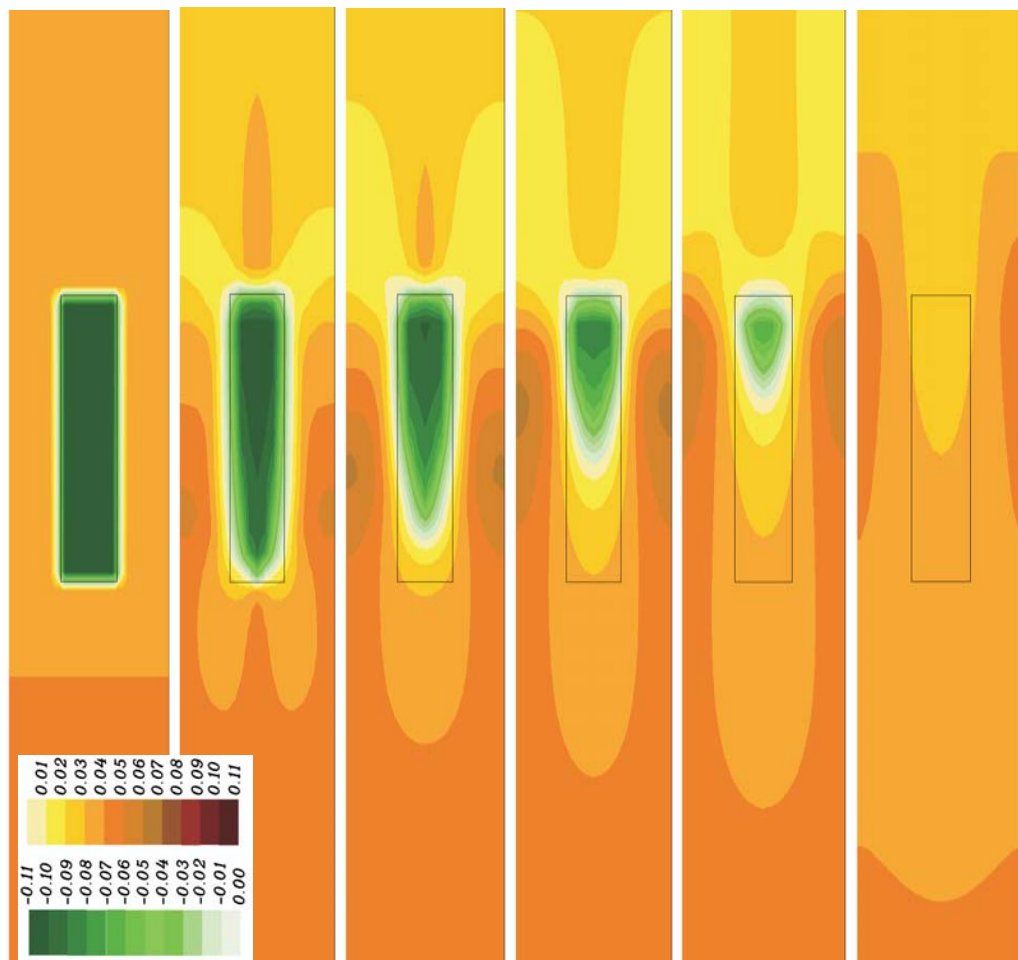


Рис. 7. Отметки дна при расчете заиливания одиночного карьера на 0, 21,2, 46,9, 73,8, 96,5, 136,9 ч

Занесение одиночного карьера

К настоящему времени наиболее детально изучены вопросы взаимодействия потока и русла в зоне влияния карьера, занимающего всю ширину русла. Вместе с тем в реальных условиях выемки аллювия занимают обычно лишь часть ширины реки, а взаимодействие потока и подвижного дна в районе карьера имеет пространственный характер. Поэтому физическая картина происходящих процессов представляется более сложной и не может быть охарактеризована в полной мере в одномерной постановке.

Для восполнения этих пробелов Г. Л. Гладковым на Главной экспериментальной базе Государственного гидрологического института была проведена серия лабораторных экспериментов в гидравлическом лотке (2,0×50,0 м) с подвижным дном [7].

Уклон дна в лотке 0,00125. На входе лотка задавался расход $Q = 40$ л/с. В процессе установления течения формируется устойчивый грядовой рельеф, который приобретает на заключительном этапе установления трехмерную структуру и чешуйчатый характер. Средняя глубина воды в лотке в процессе формирования гряд на дне увеличилась с 6,65 до 8,86 см. Средняя скорость течения соответственно уменьшилась с 30,1 до 22,5 см/с.

После установления квазиравномерного режима в гидравлическом лотке был отработан русловой карьер шириной 0,7 м, что составило 35 % от ширины лотка. Карьер располагался в осевой части лотка на участке 19,0–22,0 м по его длине. Глубина карьера в начальный момент после его отработки составила около 14 см от осредненной поверхности дна на участке его размещения. Толщина слоя песка на дне карьера составила 3,0 см. Подача наносов на входной границе составляла 1,82 л/ч ($S = 0,02$ кг/м³). Средний диаметр исходного грунта 0,32 мм.

В работе [7] так описывается процесс трансформации дна в ходе эксперимента. На участках, расположенных выше и ниже карьера, в процессе его заполнения наносами получили развитие фоновые деформации размыва (рис. 6). Выше карьера размыв начинался в приосевой части потока. Ниже

карьера процесс размыва происходил более интенсивно, причем область максимального размыва была приурочена к низовым граням карьера. Вытесняемый из карьера поток образовал здесь две серповидные вымоины, которые развивались практически до момента полного занесения карьера. Наиболее высокие отметки дна наблюдались в забровочных областях в районе верхового уступа. Вместе с верховым уступом они перемещались вниз по течению.

Для выполнения численного моделирования была построена прямоугольная сетка из 5250 ячеек. Коэффициент шероховатости был принят равным 0,027, что обеспечивает соответствие установившихся глубин и скоростей жидкости данным эксперимента при отсутствии карьера, а именно средней глубине 8,86 см, средней скорости 22,5 см/с.

Далее проводились расчеты при наличии карьера. При проведении численных экспериментов лучшее совпадение дал расчет, в котором коэффициент диффузии вычислялся по придонной концентрации (12), а несдвигающая скорость по формуле (9), при этом $\beta = 15$, $\alpha_1 = 1,0$. Сопоставление рис. 6 и 7, а также приведенное выше описание наблюдаемого в эксперименте процесса занесения с 3D анимацией результатов численного моделирования показывает практически полное качественное и количественное совпадение.

Выводы

1. Предложена математическая и численная модели деформаций дна в неравномерных и нестационарных речных потоках, пригодные для описания процессов заносимости дноуглубительных прорезей и русловых карьеров. Модели содержат минимальное число уравнений и эмпирических констант.

2. Выполненное сопоставление с данными экспериментальных исследований показало хорошую сходимость результатов, однако оптимальные значения эмпирических коэффициентов для разных экспериментов несколько отличались между собой. Поэтому требуется дальнейшая работа над получением более универсальных замыкающих соотношений модели.

3. Необходима верификация модели на надежных натурных данных, а также ее распространение на гидравлически неоднородные грунты, что, по-видимому, можно сделать, поскольку уравнение переноса концент-

раций (4) допускает независимый расчет для фракций различной крупности (при условии не очень высокой суммарной концентрации частиц в потоке).

Список литературы

1. Лавыгин А. М. Заносимость дноуглубительных прорезей на прямолинейных участках рек и пути ее снижения: автореф. дис. ... канд. наук. — Л.: ЛИВТ, 1988.
2. Лавыгин А. М. Математическая модель заносимости дноуглубительной прорези // Русловой процесс на реках и путевые работы для судоходства и повышения эффективности работы гидротехнических сооружений // Тр. ЛИВТа. — Л., 1985. — С. 54–61.
3. Лятхер В. М., Милитеев А. Н. Гидравлические исследования численными методами // Водные ресурсы. — 1981. — № 1.
4. Милитеев А. Н., Базаров Д. Р. Пульсационные решения двумерных уравнений мелкой воды при стационарных краевых условиях // Сообщения по прикладной математике. — М.: ВЦ РАН, 1997.
5. Беликов В. В., Зайцев А. А., Милитеев А. Н. Численное моделирование кинематики потока на участке неразмываемого русла // Водные ресурсы. — 2001. — Т. 28, № 6. — С. 701–710.
6. Беликов В. В., Зайцев А. А., Милитеев А. Н. Математическое моделирование сложных участков русел крупных рек // Водные ресурсы. — 2002. — Т. 29, № 6. — С. 698–705.
7. Гладков Г. Л. Обеспечение устойчивости русел судоходных рек при дноуглублении и разработке русловых карьеров: дис. ... д-ра наук. — СПб.: СПГУВК, 1996.
8. Гладков Г. Л., Беликов В. В. Численное моделирование движения воды и переформирований дна в естественных русловых потоках // Методы и алгоритмы решения задач контроля и управления на транспорте: сб. науч. тр. СПГУВКа. — 1995. — С. 143–156.
9. Беликов В. В., Зайцев А. А. Использование компьютерного моделирования для расчета кинематики потока и русловых переформирований при проектировании малых гидротехнических сооружений на крупных реках // Известия ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева. — 2006. — Т. 245. — С. 109–118.
10. Милитеев А. Н., Базаров Д. Р. Двумерные (в плане) уравнения для размываемых русел // Сообщения по прикладной математике. — М.: ВЦ РАН, 1997. — 18 с.
11. Милитеев А. Н., Базаров Д. Р. Математическая модель для расчета двумерных (в плане) деформаций русел // Водные ресурсы. — 1999. — Т. 26, № 1. — С. 22–26.
12. Hasegawa K. Hydraulic research on planimetric forms, bed topographies and flow in alluvial rivers // Ph. D. Dissertation; Hokkaido Univ. — Japan, 1984. — P. 1–184 (in Japanese).
13. Shimizu Y. A method for simultaneous computation of bed and bank deformation of a river // River Flow 2002: proc. conf. — Swets&Zeltinger, Lisse, 2002. — P. 793–801.
14. Милитеев А. Н., Крутов А. Н. Численный способ расчета деформаций русла // Численные методы в гидравлике: тр. симпоз. — М., 1980.
15. Рекомендации по гидравлическому расчету отверстий пойменных мостов / НТО ВНИИ Транспортного строительства. — № гос. регистрации СССР 01.8700715.36. — Инв. № ВНИИЦ 02.90.0042533. — М., 1989.

ГИДРАВЛИЧЕСКИЕ РАСЧЕТЫ ЭЛЕМЕНТОВ ВОДНОГО РЕЖИМА
ОБСКО-ТАЗОВСКОЙ УСТЬЕВОЙ ОБЛАСТИHYDRAULIC COMPUTATIONS OF WATER REGIME ELEMENTS
OF THE OB-TAZ MOUTH AREA

Для расчета элементов водного режима Обско-Тазовской устьевой области, представленной как единый гидравлический объект, использованы разработанные в ААНИИ методы, являющиеся логическим продолжением теоретических и прикладных исследований В. М. Маккавеева и К. В. Гришанина.

For the computation of water regime elements of the Ob-Taz mouth area, presented as united hydraulic object, were used methods elaborated in AASRI, which are the prolongation of the theoretical and applied investigations of V. M. Makkaveev and K. V. Grishanin.

Ключевые слова: устье, гидравлический режим, расход воды, уровенный пост.

Key words: mouth, hydraulic conditions, water discharge, tide gauge station.

ДЛЯ РАСЧЕТА элементов водного режима Обско-Тазовской устьевой области, представленной как единый гидравлический объект, использованы разработанные в ААНИИ методы, являющиеся логическим продолжением теоретических и прикладных исследований В. М. Маккавеева и К. В. Гришанина.

Обско-Тазовская устьевая область (рис. 1) в целом представляет собой наиболее сложный по гидрологическому режиму и морфометрическому строению устьевой комплекс, в котором присутствуют относительно узкие устьевые взморья большой пространственной протяженности — Обская и Тазовская губы, сложноразветвленные дельты Оби, Пура, Таза, Надыма и их придельтовые участки.

Для оценок водного режима (в соответствии с ГОСТ 19179-73 к элементам водного режима относятся уровни, расходы и объемы воды) в Обско-Тазовской устьевой области использовалась разработанная в ААНИИ методика, основной компонентой которой служат гидравлические методы [6 и др.], включая те из них, которые непосредственно учитывают русловой режим [9 и др.]. Эти методы базируются на законах классической гидравлики и являются логическим продолжением

теоретических и прикладных исследований В. М. Маккавеева и К. В. Гришанина [3 и др.]. Базовый метод из этой группы [6] включен в официальное Руководство [10].

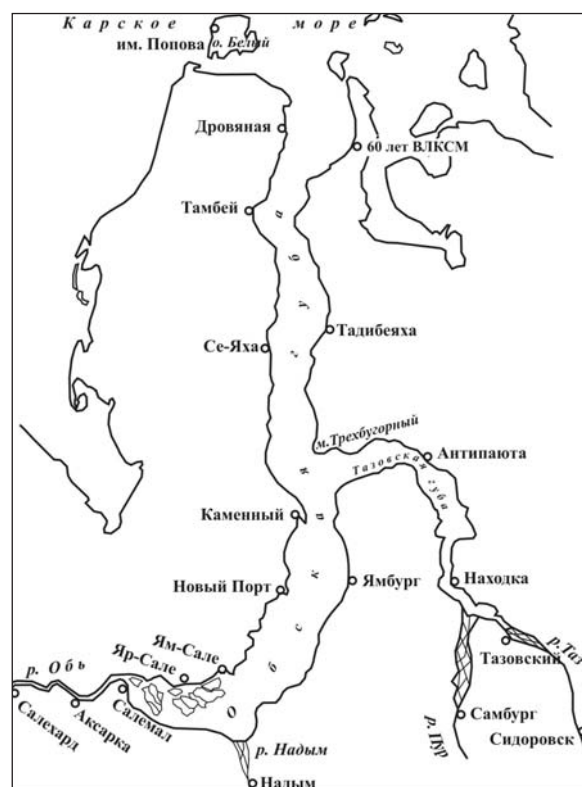


Рис. 1. Схема Обско-Тазовской устьевой области

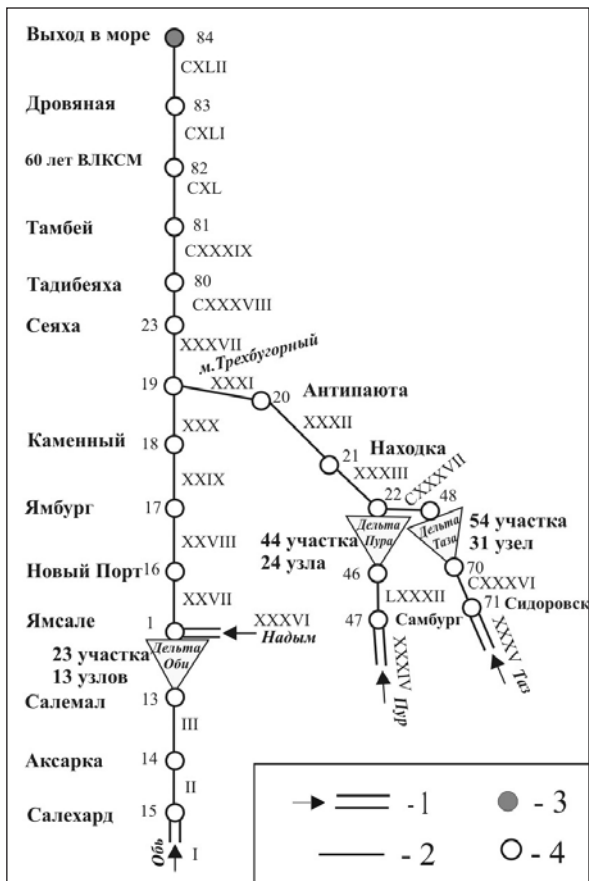


Рис. 2. Обобщенная расчетная гидравлическая схема Обско-Тазовской устьевой области:

- 1 — участки с заданными расходами воды;
2 — участки с неизвестными расходами,
3 — узлы с заданными отметками уровня;
4 — узлы с неизвестными отметками

Методика позволяет получать расчетным путем взаимоувязанные характеристики водного режима в устьевых областях рек, в том числе для пунктов (створов), где постоянно действующие посты отсутствуют.

Основная расчетная схема Обско-Тазовской устьевой области состоит из 142 участков и 84 узлов (рис. 2). Она включает устьевые участки со сложноразветвленными дельтами р. Оби, Пура и Таза, акваторию Обской и Тазовской губ. Граничные условия со стороны реки задавались по данным о расходах воды на замыкающих створах Оби, Надыма, Пура и Таза.

Граничные условия со стороны моря (отметки уровня) задавались по посту им. Попова, в отдельных случаях для этих целей

использовался пост Сеяха. В схему включены как действующие посты, так и в разное время прекратившие наблюдение. При составлении частных расчетных схем дельт сток малозначимых проток условно консолидировался в многоводных.

Для параметризации объекта исследований использовались данные стационарной сети и экспедиций по расходам и уровням воды, навигационные карты и материалы промеров, сведения о высотной основе постов, данные аэродинамического моделирования [1, 5 и др.], предшествующие научные обобщения [2; 8 и др.]. На стадии адаптационных расчетов были опробованы различные способы задания гидравлических сопротивлений [4 и др.] и расчетные схемы различной детализации.

Параметризации предшествовал анализ высотной основы уровенных постов, приведение уровней к однородному виду для каждого поста и единой плоскости отсчета для всей Обско-Тазовской устьевой области, а также увязка морфометрических данных по ее длине. В результате этого разработана расчетная гидравлическая модель, которая впервые рассматривает устьевую область как единый гидравлический объект, включая сложноразветвленные дельты Оби, Пура и Таза.

Для перечисленных делът, а также для Обской и Тазовской губ рассчитаны значения отметок стоковых уровней в единой системе высот и получены детализированные продольные профили свободной поверхности для граничных условий конкретных месяцев, а также для различных сочетаний водности реки и фонового уровня моря в период чистой воды. Это позволило по имеющимся материалам наблюдений за расходами воды на замыкающих створах устьевой области и уровнями на ее морской границе получить отметки стоковых уровней для пунктов (створов), где наблюдения не выполняются, а также определить значения объемов воды в русловой сети устьевой области Оби в целом и ее отдельных участков в частности.

Полученные результаты могут быть использованы при решении вопросов развития сети постов Обско-Тазовской устьевой области в части совершенствования их высотной основы, при оценках параметров водообмена,

а также при определении проектных расходов и уровней воды в дельтах. Сведения о величине и закономерностях выноса в губу речных вод дельтовыми рукавами найдут применение при математическом моделировании динамики вод в губе на сетке высокого пространственного разрешения (5 км и менее) для адекватного отражения реальных процессов, происходящих в губе, что обусловлено большой протяженностью фронта морского края дельт Оби, Пура и Таза.

Полученные на данном этапе результаты в целом можно считать первым приближением в оценке характеристик водного режима

Обско-Тазовской устьевой области как единого гидравлического объекта.

Выполненные исследования показали необходимость дальнейшей проработки вопросов, связанных с параметризацией и расчетами сложных устьевых комплексов при усвоении максимально возможного объема имеющейся информации, что особенно важно для слабоизученных арктических районов. Несомненна также необходимость уточнения высотной основы стационарной сети уровней постов, а следовательно, и расчетных гидравлических параметров по мере ее уточнения.

Список литературы

1. Антонов В. С., Гиляров Н. П., Иванов В. В. Экспериментальные исследования водного режима дельты р. Оби // Проблемы Аркт. и Антаркт. — 1965. — Вып. 20. — С. 23–30.
2. Антонов Н. Д. Гидрологическая характеристика низовья р. Оби // Тр. ААНИИ. — 1939. — Т. 128, вып. 4. — С. 27–80.
3. Гришанин К. В. Гидравлический расчет элементов водного режима в дельтах рек арктической зоны // Тр. ААНИИ. — 1967. — Т. 278. — С. 5–21.
4. Гришанин К. В. Гидравлическое сопротивление естественных русел. — СПб.: Гидрометеоиздат, 1992. — 184 с.
5. Иванов В. В., Пискун А. А., Гиляров Н. П. Экспериментальные исследования перераспределения стока в дельтах рек Пура и Таза при осуществлении путевых работ // Тр. ААНИИ. — 1980. — Т. 358. — С. 75–92.
6. Иванов В. В. Метод гидравлического расчета элементов водного режима в дельтах рек // Тр. ААНИИ. — 1968. — Т. 283. — С. 30–63.
7. Иванов В. В. Методика оценки запасов пресных вод в устьевых областях рек Арктики с закрытыми устьевыми взморьями // Проблемы Аркт. и Антаркт. — 1991. — Вып. 66. — С. 224–238.
8. Пискун А. А. Анализ водного и руслового режима дельты Оби // Водные ресурсы. — 2002. — Т. 29, № 4. — С. 395–404.
9. Пискун А. А. Методика расчета водного и руслового режима в сложноразветвленных дельтах рек при отсутствии данных наблюдений за русловыми деформациями: автореф. дис. ... канд. техн. наук / РТП ААНИИ. — СПб., 2002. — 25 с.
10. Руководство по расчету элементов гидрологического режима в прибрежной зоне морей и в устьях рек при инженерных изысканиях. — М.: Гидрометеоиздат, 1973. — 535 с.

УДК 556.537

Г. Г. Месерлянс,
канд. техн. наук, ст. науч. сотр.,
Государственный гидрологический институт
(Санкт-Петербург);

Н. М. Башкова,
Государственный гидрологический институт
(Санкт-Петербург)

ДЕФОРМАЦИИ РУСЛА Р. НЕВЫ

THE CHANNEL DEFORMATIONS OF THE NEVA RIVER

В последние годы приходится все чаще отвечать на запросы проектных и строительных организаций по проблемам устойчивости проектируемых или эксплуатируемых гидротехнических сооружений в русле р. Невы (водозаборы, мосты, набережные, причалы, подводные переходы газопроводов, нефтепроводов, водоводов, канализационных дюкеров — всего около 100 гидротехнических сооружений). Оказалось, что проектирование многих сооружений выполнялось, исходя из бытующих априорных представлений об устойчивости, недеформируемости русла Невы. Исследования ГГИ показали, что это совсем не так — русло реки деформируется и притом весьма значительно. В статье представлены фактические материалы о характере общих деформаций русла р. Невы и сведения об изменении ее рельефа на участках отдельных гидротехнических сооружений.

At present more and more time we have to answer questions of design and building organizations on the problem of the hydraulic facilities stability in the Neva River (water supply points, bridge, embankments, moorage, underwater pipeline crossings, flumes, sewer pipelines — all about 100 hydraulic facilities). It turned out, that designing of many constructions were based on a priori view of the Neva River stability. Investigations of SHI showed that the channel of the river becomes deformed very much. Facts of the general channel deformations character of the Neva River are presented in the paper. There is the information of bed relief changes on some reaches of the hydraulic facilities.

Ключевые слова: деформации русла, уровенный режим, русло, донные гряды, скорость, русловой процесс.

Key words: bed deformation, daturence regime, bed, bottom rifts, velocity, bed evolution.

1. ОБЩАЯ КРАТКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА Р. НЕВЫ

Река Нева соединяет Ладожское озеро с Финским заливом Балтийского моря.

Длина реки 74 км, площадь водосбора собственно Невы 5 тыс. км². В реку впадает 26 мелких водотоков.

Нева протекает по дну Приневской впадины озерно-ледникового происхождения в глинистых грунтах. Возраст реки небольшой — около 4 тыс. лет [1]. Русло реки врезанное, слабоизвилистое, имеет три крупные орографические излучины, пойма отсутствует.

Берега обрывистые, в верхнем течении реки песчаные, высотой 6–8 м, в нижнем — глинистые, высотой 1–1,5 м. Средняя ширина реки 400–600 м, максимальная — 1250 м, минималь-

ная — 210 м. Преобладающая глубина 8–12 м, наибольшая — 25 м, наименьшая — 4–4,5 м. Средний уклон реки 0,006 ‰ (6 см на 1 км).

Средняя скорость течения на стрежне составляет 0,9–1,2 м/с, наибольшая — 2,0–3,0 м/с (на Ивановских порогах), наименьшая — 0,6–0,8 м/с. При нагонах скорость уменьшается на 15 %, при сгонах увеличивается на ту же величину [2].

Дно, сложенное глинистыми породами, покрыто прерывистым плащом аллювия, мощностью до 2–3 м, — мелкими, средними и крупными песками с гравием и галькой. Крупность этих отложений колеблется от 0,06 мм на пляжах до 20 мм на вогнутых участках русла. В местах скопления аллювия встречаются гряды, высотой от 0,3–0,5 м до 0,6–0,8 м и длиной соответственно 4–10 и 7–20 м.



Рис. Схема р. Невы

Особенностью уровня режима Невы является отсутствие паводков от дождевых осадков и снеготаяния, что связано с регулирующим влиянием Ладожского озера, сглаживающего весенний подъем уровня воды. На нижней Неве, от Ивановских порогов до устья, максимальные подъемы уровня (до 3–4 м) связаны с нагонными явлениями. Средний расход воды в створе гидропоста Новосаратовка (минимальное влияние сгонно-нагонных явлений) равен $2500 \text{ м}^3/\text{с}$, наибольший наблюдаемый максимум (1924) — $3670 \text{ м}^3/\text{с}$. В маловодные годы (1940, 1941) расходы воды составили 1340 и $1470 \text{ м}^3/\text{с}$ соответственно.

Средняя годовая мутность равна $7 \text{ г}/\text{м}^3$, максимальная (осенью) — $40 \text{ г}/\text{м}^3$. Средний многолетний расход взвешенных наносов Невы — $15 \text{ кг}/\text{с}$ или $1300 \text{ т}/\text{сут}$. Расход донных наносов, подсчитанный по средней скорости движения песчаных гряд ($0,1\text{--}0,3 \text{ м}/\text{сут}$), составил $0,42 \text{ кг}/\text{с}$ или 3 % от расхода взвешенных наносов. Источники поступления наносов: взмучивание волной озерных отложений в Шлиссельбургской губе, склоновый сток, береговая эрозия, донная эрозия (врезание русла), эродирующее воздействие льда.

2. ГЕОЛОГИЯ

Русло Невы, как отмечено выше, сформировалось сравнительно недавно — около 4 тыс. лет тому назад, когда окончательно установилось нынешнее соотношение между уровнями Ладожского озера и Балтийского моря.

Нева сформировала русло в ледниковых и послеледниковых четвертичных отложениях, которые покоятся на осадочных коренных породах палеозоя, представленных кембрийскими и нижнекембрийскими отложениями (период кембрия продолжался 70 млн лет) — слои из гранита и гнейса, рыхлого кварцевого песчаника, зеленых плотных неслоистых и слоистых зеленовато-серых глин [3]. Подстилающие коренные породы часто выходят на поверхность четвертичных отложений — например, скальные Ивановские пороги на Неве. Четвертичные отложения (продолжительность четвертичного периода около 1 млн лет) представлены мощным комплексом ледниковых и послеледниковых осадков (глинистые и

песчано-валунные морены, ленточные глины и суглинки, пески и супеси с галькой и гравием).

Поверхность русла р. Невы, как правило, представлена слаборазмываемыми породами: суглинками ленточными текучепластичными, глинами ленточными, суглинками пылеватыми (мощность 1–8 м), которые прикрывают отложения верхней морены — суглинки пылеватые тугопластичной консистенции с гравием, галькой и редкими валунами (мощность 6–15 м) или супеси твердые с включением гравия, гальки и валунов (мощностью до 10–12 м).

Поверхность связных глинистых пород прикрывают редкие скопления современного аллювия — светло-желтых песков с редким гравием и галькой. Мощность этих отложений не превышает 2–3 м, чаще находится в пределах 0,5–1,5 м.

Верхняя часть береговых склонов представлена песками пылеватыми средней плотности с прослоями супеси, ее мощность 4–8 м.

Кроме песков, на глинистой поверхности русла наблюдаются отдельные скопления насыпных грунтов (строительный мусор, кирпич, шлак и др.).

Таким образом, основная особенность геологического строения долины реки Невы состоит в распространении разнородных, преимущественно связных глинистых слаборазмываемых грунтов как по ширине реки, так и по глубине их залегания. При этом их поверхность, контактирующая с потоком, слабо прикрыта прерывистыми отложениями песков малой мощности и насыпным грунтом.

3. ХАРАКТЕРИСТИКА РЕЖИМА РУСЛОВЫХ ДЕФОРМАЦИЙ

3.1. Общие деформации русла р. Невы

Для оценки общих деформаций р. Невы использованы совмещенные продольные и поперечные профили ее русла за многолетний период (1864–2007).

Общий вывод о характере деформаций состоит в том, что русло реки Невы продолжает врезаться в четвертичные отложения, представляющие, как уже отмечалось, глинистые,

суглинистые и супесчаные грунты с прослойками песка, гальки, гравия и валунов.

За период 1864–1987 гг. средняя глубина врезания русла Невы от истока до Ивановских порогов оценивается в 1,5 м.

В русле наблюдаются участки рельефа, где отлагаются продукты размыва дна.

На участке Ивановских порогов, представленных выходами скальных грунтов, врезание русла отсутствует.

Ниже Ивановских порогов, на участке Невы до Литейного моста средняя величина вреза за этот же период превышает 1,5 м и составляет около 2 м. Максимальная величина размыва дна реки приурочена к створам мостов, местам искусственного сужения русла при возведении городских набережных. Так ниже Володарского и Финляндского мостов понижение дна русла за период 1864–2003 гг. составило около 3 м.

Максимальный размыв русла Невы был обнаружен у правого берега около Свердловской набережной, непосредственно выше створа городского водозабора, в месте сужения русла Смольнинским пляжем — размыв за период 1864–2003 гг. составил 5,0 м.

По ширине реки размывы происходят неравномерно, но все они приводят к увеличению полноты поперечных сечений за счет смещения влево или вправо береговых откосов. Скорость смещения береговых откосов вправо или влево составляет 0,1–0,3 м/год.

Вполне вероятно, что размывы русла распределены по времени неравномерно.

Очевидно, у мостов максимальное значение размывов приходилось на период строительства мостов или набережных. Съемки русла за разные периоды времени показали, что процесс размыва русла Невы продолжается. Рассмотрим детально наиболее интересные с гидроморфологической точки зрения участки Невы в районе пос. Новосаратовка и Свердловской и Арсенальной набережных (Смольнинская излучина).

3.2. Развитие русловых деформаций на участке Невы в районе пос. Новосаратовка

Русловые деформации на участке Невы в районе пос. Новосаратовка (1361,8–1364,3 км,

лоцманская карта 2007 г.) развиваются по схеме ограниченного меандрирования.

Ширина русла в верхней части орографической излучины увеличивается от 330 в районе верхней точки перегиба русла (1361,8 км) до 570 м в вершине излучины (1363 км). В нижней части этой макроформы ширина русла уменьшается вниз по течению и в районе нижней точки перегиба русла составляет 270 м (1364,3 км). Значительное уменьшение ширины русла в рассматриваемом месте обусловлено строительством в 1973 г. у правого берега в районе Уткиной заводи причальной стенки. До техногенных изменений ширина реки здесь составляла около 430 м.

Линия наибольших глубин в пределах исследуемой излучины смещена ближе к правому выпуклому берегу, что не свойственно форме дна на изгибе потока. Это дает основания полагать, что морфологическая структура рассматриваемой излучины русла в основном обусловлена геологическими условиями. Формирование и развитие плесовой лощины у правого выпуклого берега, что нехарактерно для несвязных грунтов, вызвало перераспределение удельных расходов воды по ширине русла в пользу его правобережной части. В силу указанных обстоятельств у левого вогнутого берега в боковой емкости русла (Рыбацкой заводи) образуется зона со слабыми течениями и, следовательно, благоприятные условия для накопления наносов — ила, мелкого песка. Развитие аккумулятивных образований в этой части русла Невы приводит к усложнению условий эксплуатации водозаборных сооружений, расположенных здесь.

Наибольшие глубины на участке р. Невы при среднем многолетнем уровне воды (ординаре), равном 0,72 м БС, составляют 10,4–14,2 м.

Берега русла в основном крутые, средняя их высота изменяется от 6 до 9 м.

На исследуемом участке Нева принимает слева р. Славянку — один из основных своих притоков. На правом берегу Невы, в 0,2 км ниже от устья р. Славянки, расположен гидрологический пост р. Нева — пос. Новосаратовка. Гидрологические наблюдения на этом гидропосту ведутся с 18 ноября 1944 г.

Согласно историческим материалам по геологии (геологический архив ГУП «Треста ГРИИ») поверхность участка русла р. Невы в основном представлена слабаразмываемыми суглинками тугопластичной консистенции. Кровля этих пород в рассматриваемом районе в прибрежных частях русла вскрывается на отметках $(-8,0)-(-10,0)$ м БС, в зоне больших глубин — на отметках около $(-13,0)$ м БС.

Поверхность связных глинистых пород у берегов прикрывают скопления современного аллювия — мелких и средних песков серого цвета, с включением гравия и гальки. На гли-

нистой поверхности русла наблюдаются также отдельные скопления насыпных грунтов (строительный мусор, кирпич, шлак и др.).

В стрежневой части русла коренное ложе прикрыто слоем гравия и гальки.

Лабораторный анализ проб грунтов, отобранных на участке реки 4 сентября 2006 г. (ГУ «ГГИ»), показал, что современный аллювий у левого берега представлен мелкими песками ($d_{cp} = 0,17 - 0,20$ мм), в стрежневой части русла коренное ложе прикрыто слоем гравия и гальки ($d_{cp} = 9,7 - 30$ мм) толщиной около 1,5–2,0 м (см. табл. 1).

Таблица 1

**Гранулометрический состав донных наносов
на участке Невы в районе пос. Новосаратовка**

№ пробы	Диаметр частиц d , мм											
	0–0,05	0,05–0,10	0,10–0,20	0,20–0,40	0,40–0,50	0,50–0,80	0,80–1,10	1,10–1,50	1,50–2,00	2,00–5,00	5,00–10,0	10,0–20,0
1	0	3	10	26	13	33	3	8	3	1	0	0
2	0	1	4	47	14	15	1	5	6	7	0	0
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100
4	0	1	10	19	7	21	3	10	9	19	0	0
5	5	42	43	6	1	2	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100
7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100

В низовой части исследуемой излучины русла Невы, в районе створов прокладки дюкеров № 1 и 2, при расходе воды 2770 м³/с максимальная скорость течения составляет 1,10 м/с.

При наибольших годовых расходах воды малой обеспеченности максимальная скорость течения в районе указанных створов оценивается в 1,7–1,9 м/с.

Результаты анализа материалов эхолотирования рельефа дна по продольным створам на исследуемом участке р. Невы, выполненного ГГИ 20–21 июня 2006 г., показали, что транспорт донных (влекомых) наносов на участке реки осуществляется в грядовой форме. Высота донных гряд на этом участке составляет в основном 0,3–0,7 м, длина — 7–15 м.

Для определения скорости движения донных гряд может быть применена формула

Б. Ф. Снисченко и З. Д. Копалиани [4]:

$$C_r = 0,019\nu Fr^3,$$

где ν — скорость потока над местом определения гряды, м/с;

$Fr = \nu/(gH)^{1/2}$ — число Фруда;

H — глубина потока, м;

g — ускорение свободного падения, м/с².

Согласно гидравлическим расчетам скорости движения донных гряд по ширине русла в районе створов прокладки дюкеров при расходе воды 2770 м³/с (20–21 июня 2006 г.) составили 0,4–2,0 м/сут. Общий расход влекомых наносов при указанных гидравлических условиях оценивается в 1,5 кг/с, что составляет около 5 % расхода взвешенных наносов.

Необходимо отметить, что параметры донных гряд из-за малых расходов наносов не соответствуют тем глубинам и скоростям течения, которые наблюдаются на участке реки.

Морфологическое строение участка русла Невы в районе пос. Новосаратовка в целом не претерпело существенных изменений за период наблюдений 1864–2006 гг.

При сопоставлении планов этого участка русла Невы за 1864 и 1986 г. установлено, что в верхней части участка (1361,8–1362,4 км) плановые деформации русла за указанный период времени были незначительны. Также были незначительны и деформации морфологических элементов плесовой лощины, сформировавшейся на рассматриваемом подучастке, в стрежневой части русла реки. Тем не менее наинизшая отметка дна в этой плесовой лощине понизилась примерно на один метр и составила к 1986 г. (–12,0) м БС.

Наибольшие вертикальные (глубинные) деформации наблюдались в прибрежных частях русла вследствие переформирования береговых откосов, сложенных менее устойчивыми к размыву потоком, ветровыми и судовыми волнами грунтами. Вертикальный размыв дна в прибрежных зонах оценивается примерно в 2,0 м.

На поперечном створе № 1, расположенном в начале одностороннего расширения русла Невы, в результате отступления бровки левого берега наинизшая отметка дна за период 1864–1986 гг. понизилась на 1,4 м и к концу этого периода времени составила (–10,26) м БС. Наинизшие отметки дна на указанном поперечном створе в 1864 г. наблюдались в средней части русла, к 1986 г. эти отметки сместились к левому берегу. Ход деформаций свидетельствует о том, что кровля трудноразмываемых грунтов в начальном створе одностороннего расширения русла Невы вскрывается на отметках (–8,9)–(–10,3) м БС. Значительных плановых деформаций русла непосредственно в районе поперечного створа № 1 за период 1864–1986 гг. не зафиксировано.

В районе расположения поперечных створов № 2 и 3 положение бровок русла Невы за указанный период времени не изменилось. Однако вертикальные деформации русла в его правобережной части были существенны и составили у берега 4–5 м.

К 1986 г. на исследуемом участке русла, у правого выпуклого берега, сформировалась плесовая лощина с наинизшей отметкой

дна (–10,0) м БС. В 1864 г. наинизшая отметка дна в рассматриваемом месте составила около (–8,5) м БС. Таким образом, величина врезания русла в трудноразмываемые грунты в указанном месте за период 1864–1986 гг. оценивается в 1,5 м.

Необходимо отметить, что формирование и развитие плесовой лощины у выпуклого берега излучины не соответствует форме дна на изгибе потока. В нашем случае это свидетельствует о главенствующей роли геологических условий в морфогенезе исследуемой макроформы.

У левого вогнутого берега на начальном участке расширения русла, напротив, в период 1864–1986 гг. происходило накопление наносов. Повышение отметок дна здесь оценивается в 3,5–4,0 м. Формирование скоплений наносов у левого вогнутого берега на рассматриваемом участке расширения русла Невы вызвано образованием у этого берега обширной зоны с относительно слабыми скоростями течения, что и способствует активизации аккумулятивных процессов в этой зоне.

В нижней части орографической излучины, где наблюдается сужение русла, наинизшие отметки дна в плесовой лощине (у правого выпуклого берега) почти не изменились за рассматриваемый период времени и составили (–12,7)–(–13,3) м БС.

В то же время отметки подводной части береговых склонов русла непосредственно в районе поперечного створа № 4 изменились существенно.

У левого вогнутого берега отметки дна за период 1864–1986 гг. повысились примерно на 3,0–3,5 м. Это свидетельствует о том, что зона с относительно слабыми скоростями течения, которая образуется у этого берега на участке расширения русла исследуемой излучины, заканчивается ниже указанного створа.

У правого берега в исследуемом створе, как и выше по реке, отметки дна в ходе переформирования русла понизились на 3–4 м. Однако в пределах плесовой лощины, как отмечалось выше, отметки дна были стабильны.

На поперечном створе № 5 высотные деформации в период 1864–1986 гг. были не столь значительны. Врезание русла в этом створе произошло на 0,5–1,0 м.

Устойчивость русла в этот период времени наблюдалась также и в районе дамбы, отделяющей рейд Уткиной заводи. Эта дамба была сооружена в 1973 г., что привело к уменьшению ширины русла в низовой части дамбы (поперечный створ № 7) с 432 до 305 м, площади живого сечения — с 3450 до 2900 м².

Однако, несмотря на возникновение эффекта стеснения потока, а следовательно, и увеличение скоростей течения в зоне влияния указанной дамбы на гидравлическую структуру потока, значительных глубинных размывов русла в этой зоне к концу рассматриваемого периода времени не произошло. В стрежневой части русла отметки дна были устойчивы, не наблюдалось также значительных переформирований рельефа дна и в левобережной части русла, что свидетельствует о стабилизации исследуемого участка ложа реки трудноразмываемыми грунтами.

Согласно материалам топографо-геодезических съемок участка р. Невы, выполненных в 1986 и 2006 гг., существование в русле реки открытой подводной траншеи, разработанной в 1970 г. для прокладки трубопроводов № 1 и 2 (нумерация ведется вниз по течению), также не вызвало интенсификацию общих русловых деформаций на участке реки. Это в основном характерно для русел, сложенных трудноразмываемыми грунтами.

Анализ основных параметров указанной открытой подводной траншеи, определенных по материалам русловой съемки (в масштабе 1:1000), выполненной ГГИ в июне 2006 г., показал, что за период 1970–2006 гг. поперечные сечения рассматриваемой траншеи по ширине русла трансформировались незначительно.

Ширина подводной траншеи поверху составила 30–56 м, у дна — 10–20 м.

Глубина выработки (грунта) в пределах этой траншеи оценивается в 1,5–3,5 м.

Значения заложений верхового и низового откосов подводной траншеи изменялись в диапазоне 4,0–8,0.

Относительная устойчивость подводной траншеи, с нашей точки зрения, во-первых, обусловлена тем, что эта траншея раз-

работана в трудноразмываемых глинистых грунтах и, во-вторых, расходы влекомых наносов Невы недостаточно значительны для того, чтобы исследуемая траншея за рассматриваемый период времени существенно деформировалась.

Уменьшение накопления влекомых наносов в подводной траншее также связано с усложнением местной гидравлической структуры потока, обусловленным обтеканием потоком оголенных и провисающих участков трубопроводов.

Трубопровод № 1 по всей ширине русла Невы находится на дне подводной траншеи, трубопровод № 2 — в основном в створе бровки низового откоса этой траншеи. Высотное-плановое положение трубопровода № 2 в русле, по-видимому, связано со сносом вниз по течению этого трубопровода при его прокладке.

На момент выполнения в июне 2006 г. русловой съемки (ГУ «ГГИ») трубопровод № 2 почти по всей ширине реки был оголен на 0,5–0,8 диаметра. Обнаружено также 7 участков провиса трубопровода, общая длина которых составила 203 м. Высота провиса трубы на указанных участках трубопровода оценивается в 0,5–1,0 м. Это свидетельствует о том, что в русле Невы, сложенном трудноразмываемыми грунтами, возможно формирование и развитие значительных локальных размывов дна, вследствие усложнения местной гидравлической структуры потока. Активизация местных размывов русла может привести к существенному уменьшению устойчивости инженерных сооружений.

При изучении материалов наблюдений было выявлено, что на участке расширения русла больших скоплений наносов у левого вогнутого берега за период 1986–2006 гг. не образовалось. По-видимому, это обусловлено малым стоком как взвешенных, так и донных наносов р. Невы.

Тем не менее существующая тенденция развития указанного аккумулятивного образования в левобережной части русла Невы привела в настоящее время согласно материалам наблюдений к снижению эффективности работы водоприемных систем, расположенных в этой части русла.

3.3. Развитие русловых деформаций на участке Невы в районе Свердловской и Арсенальной набережных

На исследуемом участке Невы (1376,6–1380,6 км, лоцманская карта 2007 г.) имеются две орографической излучины — это Смольнинская излучина (1376,7–1379,1 км) и примыкающая к ней снизу слабовыраженная излучина (1379,1–1380,6 км).

Ширина русла в пределах Смольнинской излучины увеличивается вниз по течению от 300 м в верхней части излучины до 530 м в вершине этой макроформы. Далее русло реки сужается вниз по потоку и в нижней части рассматриваемой излучины (1379,1 км) ширина русла уменьшается до 240 м, то есть более чем в 2 раза.

В пределах нижней слабовыраженной орографической излучины (1379,1–1380,6 км) ширина русла увеличивается вниз по течению от 240 до 330 м.

В верхней части Смольнинской излучины (1376,6–1377,1 км) русло реки имеет корытообразную форму. Далее вниз по потоку (1377,1–1378,5) увеличивается асимметричность поперечного сечения русла с возрастанием глубин у правого вогнутого берега излучины.

Непосредственно в низовой части Смольнинской излучины (1378,5–1379,1 км), где русло узкое и глубокое, что свидетельствует о врезании русла в трудноразмываемые глинистые грунты, поперечное сечение этого русла имеет параболическую форму.

По материалам русловой съемки, выполненной ГУ «ГГИ» 16–24 июля 2003 г., в этой части излучины наблюдаются наибольшие глубины на всем исследуемом участке реки, которые составляют 24,2–24,6 м (при уровне воды 0,10 м БС).

В верхней части слабовыраженной излучины (1379,1–1380,6 км) поперечное сечение русла вследствие перераспределения удельных расходов воды в пользу его пра-

вобережной части имеет асимметричную форму с возрастанием глубин у правого выпуклого берега, что нехарактерно, как уже отмечалось, для потока на изгибе деформируемого русла. В нижней части этой излучины форма поперечного сечения русла корытообразная.

Согласно данным русловой съемки, выполненной ГГИ 14–16 июня 2006 г., наибольшие глубины на рассматриваемой излучине уменьшаются вниз по реке от 20,3 до 14,8 м (при уровне воды 0,26 м БС). Продольный профиль дна по линии наибольших глубин в пределах двух смежных излучин русла имеет сложную форму вследствие выхода у правого берега коренных пород. Перепад отметок дна составляет около 13 м.

У левого выпуклого берега Смольнинской излучины сформировался пляж, что обусловлено кинематической структурой потока на изгибе русла. Развитие этого пляжа оказывает значительное влияние на ход сезонных знакопеременных деформаций на нижней излучине русла, где расположены дюкерные переходы.

Донные наносы на Смольнинской излучине представлены в основном гравием, песками мелкими, средними, крупными и гравелистыми. Крупность частиц этих наносов увеличивается, в основном от левого выпуклого берега к правому вогнутому.

Наибольший диапазон крупности частиц донных наносов наблюдается в верхней части излучины. В этом месте характерный диаметр частиц донных наносов (d_{50}) увеличивается от 0,66 мм у левого берега до 20 мм в стрежневой части русла. Диаметр частиц донных наносов у левого выпуклого берега составляет 0,08 мм, в стрежневой части русла — 0,42–0,86 мм. У правого вогнутого берега в зоне скопления наносов d_{50} оценивается в 0,062 мм. В нижней части излучины характерный диаметр частиц донных наносов (d_{50}) изменяется от 0,22 у левого берега до 7,30 мм у правого берега.

Таблица 2

Гранулометрический состав донных наносов в пределах слабовыраженной
излучины русла Невы (1379,1–1380,6 км)

№ п/п	Диаметр частиц d, мм											
	0,01– 0,05	0,05– 0,10	0,10– 0,20	0,20– 0,40	0,40– 0,50	0,50– 0,80	0,80– 1,10	1,10– 1,50	1,50– 2,00	2,00– 5,00	5,00– 10,0	10,0– 20,0
1	0	1	7	3	0	0	0	0	0	88	0	0
2	0	1	44	48	1	2	0	1	1	2	0	0
3	0	0	5	92	2	1	0	0	0	0	0	0
4	0	0	1	97	1	0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	1	1	7	19	72	0	0
6	0	0	0	1	0	1	1	4	9	84	0	0

В табл. 2 представлен гранулометрический состав донных наносов в пределах слабовыраженной излучины русла (1379,1–1380,6 км), пробы которых были отобраны в пределах этой излучины 14–16 июня 2006 г.

По данным этой таблицы установлено, что донные наносы в стрежневой и правобережной частях участка русла (1379,1–1380,6 км), в зонах максимальных скоростей течения, представлены средним и мелким гравием (пробы № 5 и 6), в левобережной части русла, где скорости течения относительно слабые, — песками средними и крупными (пробы № 1–4).

Согласно архивным геологическим материалам (ГУП «Трест ГРИИ») трудноразмываемые грунты, стабилизирующие участок русла нижней излучины (1379,1–1380,6 км), вскрываются на уровне отметок (–15,0)–(–19,0) м БС.

Анализ скоростного поля потока на Смольнинской излучине русла Невы был выполнен при расходе воды 2410 м³/с (24.07.2003 г.). Максимальная скорость течения на входе в излучину (в районе устья р. Охты) равна 0,71 м/с. Вниз по потоку максимальные скорости течения уменьшаются вследствие уширения русла реки и в вершине излучины составляют 0,58–0,62 м/с.

В верхней части исследуемой макроформы наблюдается смещение зоны максимальных скоростей течения к правому вогнутому берегу, что свойственно кинематике изогнутого потока в деформируемом русле.

В нижней части этой макроформы максимальные скорости течения наблюдаются у правого вогнутого берега.

При эхолотировании рельефа дна по продольным створам в пределах Смольнинской излучины, выполненным ГУ «ГГИ» в период 16 июня — 24 июля 2003 г., были зафиксированы донные гряды практически по всему рассматриваемому участку русла Невы. Параметры гряд, как показали результаты анализа, также не соответствуют тем глубинам и скоростям течения, которые наблюдаются на участке, из-за малых расходов наносов. Высота этих «дефицитных» донных гряд в основном составляет 0,3–0,5 м, длина — 4–10 м. Наиболее крупные гряды (высотой 0,6–0,8 м, длиной 7–20 м) зафиксированы в пределах пляжа, сформировавшегося у левого выпуклого берега излучины.

Применительно к гидравлической ситуации на период 16 июня — 24 июля 2003 г., когда расход воды составил 2410 м³/с, скорости движения донных гряд по ширине русла в пределах Смольнинской излучины изменялись от 0,1 до 0,3 м/сут. При этом расход влекомых наносов, рассчитанный по параметрам донных гряд, составил 0,42 кг/с или 3 % расхода взвешенных наносов.

Максимальная скорость течения на участке реки в период измерения составила 0,71 м/с. В период прохождения на Неве наибольших годовых расходов воды малой обеспеченности максимальная скорость течения на исследуемом участке реки оценивается в 1,5–1,7 м/с.

Режим русловых деформаций на слабо-выраженной орографической излучине русла р. Невы (1379,1–1380,6 км) зависит от взаимодействия этой излучины с верхней по течению орографической Смольнинской излучиной (1376,6–1379,1 км).

На формирование морфологической структуры указанных излучин решающее влияние оказывают геологические условия. Как показал анализ архивных геологических материалов ГУП «Трест ГРИИ», русло Невы, в том числе и на рассматриваемом участке реки, сложено в основном трудноразмываемыми грунтами (тугопластичными суглинками и глинами), что и определило относительную стабильность коренного ложа реки за период 1864–2007 гг.

Геоморфологическое строение Смольнинской излучины русла Невы, кинематика изогнутого потока, определяющая смещение максимальных скоростей течения к правому вогнутому берегу излучины, и взаимодействие этого потока с дном и берегами реки обусловили формирование у вогнутого берега плесовой ложины.

У левого выпуклого берега излучины, напротив, образуется зона пониженных скоростей течения, вследствие усиления неравномерности распределения удельных расходов воды (производимого поперечным течением) в размываемом русле за счет углубления дна у вогнутого берега. В силу указанных причин у левого выпуклого берега излучины возникают благоприятные условия для накопления наносов и формирования в этом месте пляжа. Следует отметить, что в определенных гидрологических условиях (например, в межень и низкие паводки) разрастание пляжа может вызвать стеснение потока и активизацию процесса размыва у противоположного берега.

Для анализа русловых переформирований были построены совмещенные поперечные сечения русла Невы в верхней части Смольнинской излучины (1376,60–1377,1 км) по материалам топографо-геодезических съемок 1900, 1931 и 2003 гг. на характерных для этой излучины поперечных створах.

Анализ этих материалов показал, что значительного переформирования рельефа дна в указанной части Смольнинской излу-

чины за период 1900–2003 гг. не произошло, несмотря на существенное стеснение потока, вызванное строительством в эти годы набережных. Тем не менее в последние годы прослеживается тенденция к размыву дна в рассматриваемой части излучины вследствие возникновения эффекта сжатия потока. Как известно, при сжатии потока донные скорости возрастают сильнее поверхностных, что ведет к усилению размыва дна.

На участке реки в районе технического водозабора (1377,30–1377,69 км), где поперечное сечение русла имеет асимметричную форму, в период 1900–2003 гг. наблюдалось углубление плесовой ложины, сформировавшейся у правого вогнутого берега. В створе технического водозабора (1377,48 км) наименьшая отметка дна в пределах плесовой ложины за указанный период времени понизилась на 1,9 м и составила (–14,87) м БС, в поперечном створе № 6 — на 2,0–2,5 м (до уровня отметки (–19,0) м БС).

Согласно материалам наблюдений трансформация поперечного сечения русла Невы в створе технического водозабора (1377,48 км) произошла в основном в период 1900–1931 гг. За этот период времени смещение склона левого выпуклого берега (в результате развития у этого берега аккумулятивных процессов) составило около 40 м (1,5 м/год). Размыв склона правого вогнутого берега за 1900–1931 гг. оценивается в 15 м (около 0,5 м/год).

В период 1931–2003 гг. параметры поперечного сечения русла в рассматриваемом створе в основном сохранились. В процессе дальнейшего развития плесовой ложины возможен размыв дна у правого вогнутого берега до отметки (–16,0) м БС.

В районе поперечного створа № 6 (1377,69 км), где вертикальный размыв ограничен трудноразмываемыми покровными грунтами (возможно, гравелисто-галечными отложениями, суглинками и глинами тугопластичными), форма и размеры русла в период 1931–2003 гг. также в целом сохранились. Характер развития русловых деформаций в районе этого поперечного створа позволяет утверждать, что грунты, слагающие русло реки в рассматриваемом месте, устойчивы,

поэтому существенной перестройки русла здесь не ожидается.

В нижней части излучины (1378,2–1379,1 км) морфологические изменения за период 1931–2003 гг. были в целом незначительны. В роли ограничивающих факторов горизонтальным и вертикальным деформациям выступают здесь трудноразмываемые грунты. Согласно геоморфологическому облику рассматриваемого участка реки русло на этом участке врезано в коренные породы. Продольный профиль дна по линии наибольших глубин на участке имеет довольно сложное очертание, обусловленное наличием выступов трудноразмываемых геологических структур.

За период 1931–2003 гг. форма этого профиля не претерпела в целом больших изменений. Существенное различие значений наименьших отметок дна в некоторых плесовых ложинах по топографо-геодезическим съемкам разных лет, с нашей точки зрения, связано с различием масштабов производства этих съемок.

Наименьшая отметка дна в пределах излучины измерена в плесовой ложине, сформировавшейся в нижней части этой макроформы, у правого вогнутого берега (1378,45–1379,1 км). По материалам промеров русла, выполненных ГГИ в 1930–1931 гг., эта характерная отметка дна равна (–23,65) м БС, по плану русловой съемки, выполненной ГГИ в 2003 г., — (–24,50) м БС. Плановое очертание этой плесовой ложины за последние 70 лет почти не изменилось.

Ширина русла Невы в нижней части излучины уменьшается вниз по потоку. При этом асимметричная форма поперечного сечения русла трансформируется в форму, близкую к параболической.

Изучение материалов наблюдений показало, что в ходе сужения русла усиливаются необратимые деформации размыва. Русло Невы вниз по потоку становится относительно узким и глубоким, что свойственно морфометрическим характеристикам русла, сформированного в глинистых трудноразмываемых породах.

При совмещении поперечных сечений русла в нижней части излучины (1378,0–1379,1 км) за 1931 и 2003 гг. было установлено,

что за указанные годы отметки дна по линии наибольших глубин в этой части макроформы (излучины) понизились на 1,5–3,0 м. Это, с нашей точки зрения, способствовало привлечению к правому вогнутому берегу излучины в период 1931–2003 гг. дополнительного расхода воды, а следовательно, и образованию у левого выпуклого берега в районе Главной водопроводной станции зоны относительно слабых скоростей течения. Указанная перестройка скоростного поля потока на участке обусловила намыв левобережного пляжа за 1931–2003 гг. в районе водопроводной станции на 2–3 м.

Нижняя смежная орографическая излучина русла р. Невы (1379,1–1380,60 км), так же как и Смольнинская излучина, почти не изменила форму планового очертания за период 1864–2006 гг., что можно объяснить стабилизацией русла коренными породами. За этот период времени, несмотря на крепление берегов в разные годы набережными, не деформировались существенно и основные структурные элементы, определяющие морфологическое строение русла рассматриваемой макроформы.

В верхней части слабовыраженной излучины (1379,1–1379,45 км) плесовая ложина сформирована у правого выпуклого берега, что связано с дополнительным привлечением расхода воды к правому вогнутому берегу смежной Смольнинской излучины в районе Арсенальной набережной, где находятся, как уже отмечалось, плесовые ложины с большими глубинами.

В этой части излучины поперечное сечение русла имеет асимметричную форму с максимальными глубинами у правого выпуклого берега, в нижней части излучины (1379,60–1380,60 км) форма поперечного сечения русла близка к симметричной.

Некоторое несовпадение положений подводного склона правого берега на поперечных створах № 11–15, построенных по материалам топографо-геодезических съемок 1931 и 2006 гг., связано с реконструкцией Арсенальной набережной (1976–1981) и набережной Робеспьера.

Анализ картографических материалов по исследуемому участку р. Невы показал, что слабовыраженная излучина русла в пос-

ледные 75 лет находится в устойчивом состоянии. В связи со стабилизацией русла излучины инженерными сооружениями, а также по геологическим условиям ожидать в перспективе активизацию горизонтальных и вертикальных деформаций на этой излучине русла, связанных с развитием реки, с гидроморфологической точки зрения нет оснований.

Однако, как показали результаты гидроморфологических обследований русла р. Не-

вы, на участках усложнения гидравлической структуры потока, связанного с влиянием инженерного сооружения на русловой поток, возможно формирование и развитие больших местного размыва дна, сложенного трудноразмываемыми грунтами. Эти локальные размывы дна могут привести к усложнению условий эксплуатации инженерных сооружений, в частности подводных переходов трубопроводов и водозаборных сооружений.

Список литературы

1. *Нежиховский Р. А.* Река Нева и Невская губа. — Л.: Гидрометеиздат, 1981. — 110 с.
2. Гидрология устьевой области Невы / под ред. С. С. Байдина. — М.: Гидрометеиздат, 1965. — 383 с.
3. *Яковлев С. А.* Наносы и рельеф г. Ленинграда и его окрестностей // Известия научно-мелиорационного института. — 1926. — № 8–9.
4. ВСН 163-83 «Учет деформаций речных русел и берегов водоемов в зоне подводных переходов магистральных трубопроводов (нефтегазопроводов)». — Л.: Гидрометеиздат, 1985. — 143 с.

УДК 627.7(28)

А. В. Ребковец,
канд. техн. наук,
ЗАО «Ленгипроречтранс»
(Санкт-Петербург)

УЛУЧШЕНИЕ СУДОХОДНЫХ УСЛОВИЙ И ОБЕСПЕЧЕНИЕ БЕЗОПАСНЫХ УСЛОВИЙ ПЛАВАНИЯ НА САРАЛЕВСКОМ ВОДНОМ УЗЛЕ НА РЕКЕ ВОЛГЕ

IMPROVEMENT OF NAVIGATION CONDITIONS AND SECURING SAFE NAVIGATION ON SARALEV WATER JOINT ON VOLGA RIVER

В статье представлены результаты исследований руслового режима и судоходных условий на одном из затруднительных для судоходства участке реки нижней Волги. Разработаны рекомендации по коренному улучшению судоходных условий на участке реки. Выполнена оценка влияния проектируемых мероприятий на гидрологический и русловой режимы реки.

The article gives the results of bed conditions and navigation conditions investigation on one of the difficult for navigation reaches of the lower Volga. Recommendations for radical improvement of navigation conditions at the river reach are given. The estimation of influence of projectible works on the river hydraulic and bed conditions is executed.

Ключевые слова: русловой режим, судоходство, мезоформы, переформирования, русловой процесс, моделирование.

Key words: bed conditions, navigation, mesomeride, reformation, channel process, modeling.

В ОСНОВУ настоящей статьи положены материалы и наработки ЗАО «Ленгипроречтранс» в составе НИР «Научное обоснование целесообразности проведения капитальных дноуглубительных работ по улучшению судоходных условий на Саралевском водном узле р. Волги», выполненной в 2008 г. по заданию ФГУ «Волжское ГБУ».

Саралевский водный узел р. Волги, расположенный примерно в 100 км ниже по течению от Волгоградского гидроузла, уже более трех десятков лет является самым затруднительным (лимитирующим) для судоходства участком нижней Волги.

Саралевский водный узел р. Волги находится на участке 2630–2660 км судового хода и представляет собой обширное пойменно-руслевое разветвление реки, основными составляющими которого в современных условиях являются два рукава, которые условно можно назвать: левый рукав — Коршевитый и правый рукав — Саралевский.

Между основными рукавами располагается отмирающий участок рукава Старая Волга со старичными затонами — спрямленный участок прежней крупной излучины Саралевской.

Верхний по течению участок левого рукава представлен Коршевитой воложкой с ярко выраженной правосторонней вторичной излучиной. Ниже по течению следует относительно прямой участок, а затем имеются две излучины, сопряженные между собой. Преобладающую часть общей длины судоходного рукава Коршевитый занимают перекатные участки, что характеризует сложную морфологию левого рукава и соответственно сложные условия судоходства.

Относительно прямой правый рукав подразделяется вниз по течению на участки: рукав Старая Волга — сохранившееся верхнее крыло прежней крутой излучины Саралевской, спрямленной Коршевитой воложкой, проран Дубовка — рукав спрямления прежней крутой излучины воложки Саралевской и собственно Саралевская воложка. Руслó правого рукава в целом стеснено мезаформами скопления речных наносов в меньшей мере, нежели руслó левого рукава, то есть является относительно распластным.

Перекатных участков порядка пяти, общей длиной менее 2 км.

Характерными мезоформами скопления речных наносов в обоих рукавах являются обширные пляжи и побочни, а на широком участке подхода к разветвлению русла на рукава — крупные осередки. Имеются морфологические признаки внутрируслевых спрямлений вторичных излучин меженного русла.

В целом современный облик рассматриваемого водного узла отображает многолетний ход пойменно-руслевых переформирований по схеме (типу руслового процесса) незавершенного меандрирования. В Саралевском водном узле в обозримом прошлом произошло вначале правое спрямление Саралевской излучины с образованием Саралевской воложки и прорана Дубовка, а затем — левое ее спрямление по генеральному направлению Коршевитой воложки.

Следует отметить, что развитие руслового процесса на рассматриваемом участке происходит в специфических условиях наличия поперечной «каменной гряды» — базиса эрозии, препятствующей полной разработке спрямляющей Саралевской воложки и соответственно отмиранию спрямленной Саралевской излучины, как это было бы в обычных условиях. По анализу имеющихся материалов, Саралевский водный узел сформировался и развивается в определенном гидравлично-морфологическом виде под влиянием в том числе и местного базиса эрозии, каковым является «каменная гряда», пересекающая р. Волгу в районе 2656,3 км судового хода.

Кроме того, на русловые переформирования на участке узла оказывает влияние производство дноуглубительных работ в судоходном левом рукаве.

Наиболее интенсивному занесению русловыми наносами подвержен левый рукав, пропускная способность которого меньше, чем правого рукава примерно в два раза (по оценкам специалистов ВГАВТ).

В естественных условиях (без производства здесь дноуглубительных работ) левый рукав должен был бы превратиться в довольно протяженный затон, сообщаемый с основным руслом реки через низовой вход в районе «каменной гряды».

В современных условиях основными составляющими Саралевского водного узла являются два рукава: судоходный левый рукав (Коршевитый) и правый рукав (Саралевский).

Интенсивные русловые переформирования на участке водного узла обуславливают для поддержания судоходных условий проведение дноуглубительных работ в значительных объемах, которые в 2007 г. составили порядка 1,93 млн м³. Однако естественный ход русловых процессов на участке превалирует над искусственным его сдерживанием путем дноуглубления. Несмотря на значительные объемы дноуглубительных работ, движение судов на участке только одностороннее, гарантированные габариты судовых ходов снижены: глубина — с 4,0 до 3,6–3,8 м в современных условиях, минимальный радиус закругления — 700 м и менее против необходимого для безопасности судоходства — 1100 м. В сложившихся условиях наблюдается повышенная степень риска возникновения аварийных ситуаций.

С 1970-х гг. научными организациями страны выполнялись работы по решению вопроса коренного улучшения судоходных условий в Саралевском водном узле. К настоящему времени произошедшие морфологические преобразования в узле (в соответствии с прогнозами, приведенными в ранее выполненных

работах) обострили вопрос обеспечения безопасности судоходства на участке.

При этом следует отметить, что участок Волгоград–Астрахань наряду с основной частью водных путей европейской части РФ включен в состав важнейших внутренних водных путей международного значения в соответствии с Европейским соглашением от 19.01.1996 г., подписанным Россией в 2000 г.

Одной из задач, поставленных в подпрограмме «Внутренний водный транспорт» Федеральной целевой программы «Развитие транспортной системы Российской Федерации (2010–2015 годы)», является устранение участков, лимитирующих пропускную способность Единой глубоководной системы (ЕГС) европейской части России.

В современных условиях в связи с тенденцией ежегодного роста перевозок водным транспортом на водных путях нижней Волги, большое значение имеет обеспечение безопасных условий судоходства на рассматриваемом участке.

Учитывая современное гидролого-морфологическое состояние и фоновый прогноз развития русловых переформирований, возможны следующие варианты улучшения судоходных условий на участке Саралевского водного узла.

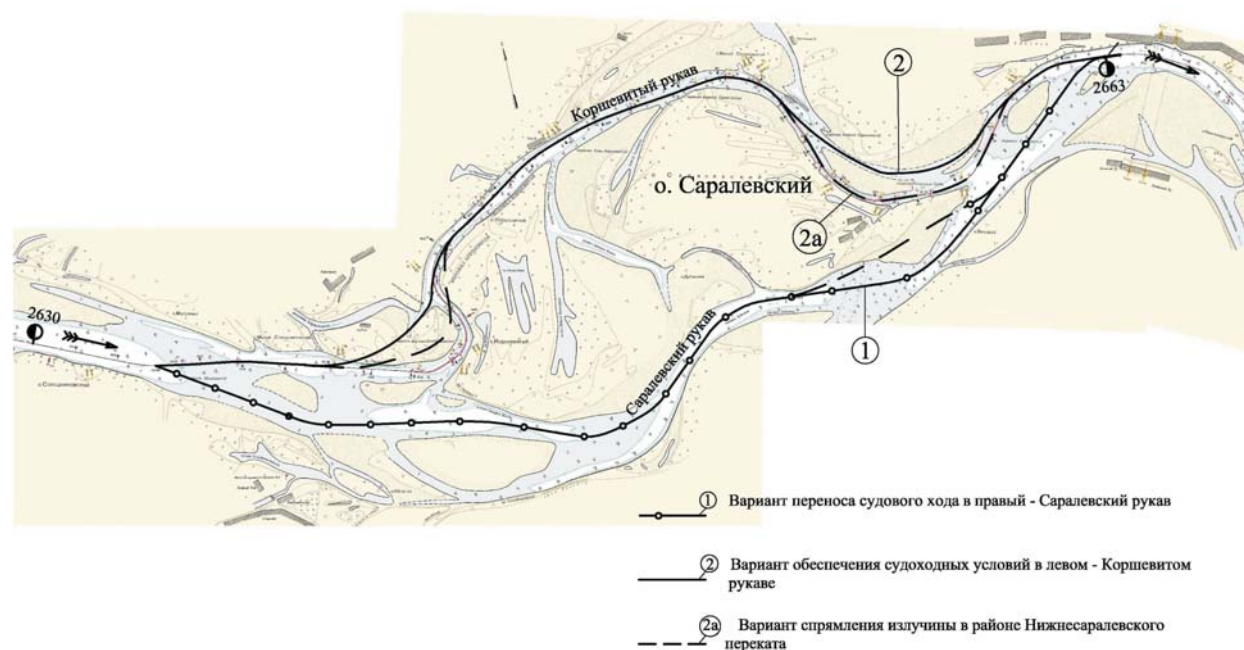


Рис. 1. Схематический план Саралевского водного узла р. Волга

Вариант 1 — создание судового хода с необходимыми габаритами в правом Саралевском рукаве — перенос судового хода.

Вариант 2 — обеспечение безопасных судоходных условий (судовой ход с необходимыми габаритами) по существующей трассе в левом Коршевитом рукаве со спрямлением правой Коршевитой излучины.

Вариант 2а — трасса по варианту 2 с переносом судового хода в спрямляющую Нижнесаралевскую излучину (в районе Нижнесаралевского переката).

Рассмотренные варианты судовых ходов приведены на рис. 1.

Для оценки влияния рассматриваемых вариантов мероприятий по улучшению судоходных условий на гидролого-морфологические условия в Саралевском водном узле в работе выполнены гидравлические расчеты методом математического моделирования с применением программной системы CARDINAL.

В результате математического моделирования получены следующие расчетные характеристики речного потока при заданных состояниях участка:

- планы водной поверхности в изолиниях отметок уровня воды (м БС);
- планы величин изменения уровней воды (см) под влиянием дноуглубительных работ;
- планы течения в изолиниях скоростей (м/с);
- распределение расходов воды по рукавам.

Выполненные расчеты подтвердили аналитические выводы о том, что в современных гидролого-морфологических условиях Саралевского водного узла основным по водности является правый Саралевский рукав. Расчетный расход воды в нем при ПСУ составляет 78 % от общего расхода воды в узле, то есть в 3,5 раза превышает расход в левом Коршевитом рукаве. Преобладание также заметно и по скоростям течения, а следовательно, по транспортирующей способности потока в отношении речных наносов в половодье.

Расход воды в левой протоке, спрямляющей нижнюю правостороннюю излучину Коршевитого рукава, составляет 46 %, а в этой

излучине — соответственно 54 % от общего расхода в Коршевитом рукаве, при этом скорости течения в спрямляющей протоке заметно больше скоростей в спрямляемой излучине.

При переносе судового хода в Саралевский рукав (вариант 1) произойдет лишь незначительное перераспределение водности рукавов узла в сторону увеличения расхода воды в правом рукаве без заметного изменения скоростей течения и соответственно транспорта речных наносов по рукавам узла в половодье.

Расчетное снижение уровней воды в узле при варианте 1 мероприятий составляет порядка 4 см, то есть незначительное.

При обеспечении безопасных условий судоходства в левом Коршевитом рукаве по варианту 2 (со спрямлением верхней правосторонней излучины) доля расхода в данном рукаве возрастет до 32 %, по варианту 2а (со спрямлением нижней излучины) — до 33 % от общего расхода в узле. Вместе с тем произойдет существенное, на величину порядка 16 см (вариант 2) и 20 см (вариант 2а), снижение уровней воды и соответственно уклонов водной поверхности в узле.

Данное обстоятельство ослабляет эффект увеличения водности, скоростей течения и, следовательно, транспортирующей способности потока Коршевитого рукава в целом и спрямляющих прорезей в частности, а также является фактором заметного снижения скоростей течения и транспортирующей способности потока в Саралевском рукаве, водность которого уменьшится с 78 % (в современных условиях) до 68 и 67 % соответственно вариантам 2 и 2а.

Таким образом, по характеру и степени возможного воздействия на динамику Саралевского водного узла следует отдать предпочтение переносу судового хода в правый Саралевский рукав (вариант 1).

При этом важно отметить, что в перспективе после переноса судового хода и прекращения дноуглубительных работ в левом рукаве возобновится естественная тенденция занесения этого рукава. Тем самым откроется возможность постепенного образования на рассматриваемом участке реки однорукавного русла и обеспечения нормальных условий

судоходства в этом русле — ныне Саралевском рукаве.

Таким образом, обеспечение безопасных условий судоходства на участке Саралевского водного узла р. Волги (2630–2663 км по судовому ходу) возможно только в результате осуществления мероприятий по коренному улучшению судоходного пути на участке, то есть проведения капитальных дноуглубительных работ по созданию судового хода в необходимых габаритах.

Увеличение объемов эксплуатационного дноуглубления по существующему судовому ходу не приводит к желаемым результатам в связи с особенностями руслового процесса на рассматриваемом участке.

Естественный русловый процесс, сдерживаемый ежегодными дноуглубительными работами, направлен на отмирание левого (судоходного в современных условиях) рукава.

При прекращении дноуглубительных работ в левом рукаве развитие руслового процесса направлено на образование однорукавного русла по правому рукаву.

Сравнительная оценка вариантов мероприятий по улучшению судоходных условий в Саралевском водном узле р. Волги показала, что по совокупности технико-экономических (без учета ущерба рыбному хозяйству) и гид-

равлико-морфологических показателей вариант переноса судового хода в правый рукав (вариант 1) предпочтительней.

Учитывая высокую степень значимости участка Саралевского водного узла для рыбохозяйственного использования, на следующей стадии проектирования для составления современной рыбохозяйственной характеристики с определением ущерба рыбному хозяйству по вариантам улучшения судоходных условий специализированной организацией КаспНИРХ должны быть проведены соответствующие исследования.

Реализация мероприятий по улучшению судоходных условий на Саралевском водном узле р. Волга позволит:

- исключить рассматриваемый узел из состава участков, лимитирующих судоходство на нижней Волге и соответственно Единой глубоководной системы России;

- обеспечить безопасность судоходства на участке и соответственно снизить степень риска возникновения аварийных ситуаций, последствия которых, в частности разлив нефтепродуктов, могут нанести непоправимый урон окружающей природной среде, в том числе и рыбному хозяйству;

- увеличить судопропускную способность участка.

УДК 556.5.023

А. С. Чеботарев,
Государственный гидрологический институт
(Санкт-Петербург)

ЛАБОРАТОРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ФОРМИРОВАНИЯ ГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКОГО СОСТАВА ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ В РЕЧНЫХ ИЗЛУЧИНАХ

THE LABORATORY RESEARCHES OF BED LOAD GRAIN SIZE DISTRIBUTION FORMATION REGULARITIES IN MEANDER SCROLLS

Представлены методика и результаты лабораторного исследования механизма и закономерностей формирования гранулометрического состава донных отложений на различных морфологических фрагментах русла в речных излучинах. Установлены количественные закономерности и зависимости изменения характерных диаметров проб донных отложений на различных морфологических фрагментах русла от критерия подвижности донных отложений.

Methods and results of laboratory investigation of mechanism and regularity of bed material grain size distribution forming in the different morphological parts of meandering channels are presented. Quantitative laws and dependences of the bed material samples granulometric composition on the mobility criterion in different parts of the model are established.

Ключевые слова: речные излучины, гранулометрический состав, донные отложения, транспорт наносов.

Key words: scrolls, granulometric composition, bottom sediments, sediment transport.

Введение

Существующие методы расчета характеристик транспорта донных наносов, руслового процесса и русловых деформаций в преобладающем большинстве случаев в качестве аргумента, среди прочих определяющих характеристик, содержат диаметр донных отложений. При этом состав донных отложений в практических расчетах принимается однородным и постоянным для исследуемого участка русла реки.

Однако известно, что состав донных отложений и донных наносов в ходе взаимодействия речного потока с сыпучеаллювиальной средой не остается постоянным как в фиксированной точке дна реки, так и на участке русла, то есть является не независимой величиной, а функцией ряда определяющих факторов [1].

В зависимости от фаз водности (паводок, межень) и изменения сопутствующих гидравлических характеристик потока при различных наполнениях русла водой и скоростях потока происходит сортировка гранулометрического состава донных отложений на участке русла и на его морфологических фрагментах. Частным случаем этого процесса является образование самоотмостки дна крупными наносами. Отмеченное является свидетельством того, что саморегулирование системы, именуемой русловым процессом, происходит не только на структурных уровнях макро-, мезо- и микроформ речного русла [2]. Оно распространяется также и на уровень отдельных частиц донных отложений, что было показано ранее в работах ГГИ [3; 4].

Исходя из отмеченного следует, что дальнейший прогресс в совершенствовании методов расчетов и прогнозов характеристик руслового процесса (начальная скорость движения частиц и интенсивность их транспорта,

виды и формы транспорта руслообразующих наносов, образование, трансформация и исчезновение русловых форм, их геометрические и динамические характеристики, расход донных наносов, сток влекомых наносов и руслового материала) требует углубления существующих представлений о процессе транспорта донных наносов и более детального его рассмотрения.

Одной из важнейших задач на пути совершенствования методов расчета характеристик транспорта донных наносов в речных руслах представляется учет процессов сортировки гранулометрического состава донных отложений и донных наносов в ходе транспорта наносов рекой [5]. Исследование механизма формирования гранулометрического состава донных наносов в речных руслах и пространственно-временных характеристик этого процесса представляется возможным путем организации комплекса специальных наблюдений и измерений в натурных и лабораторных условиях. При этом лабораторный метод имеет такие преимущества, как возможность управлять процессом, производить в ходе эксперимента детальные наблюдения и измерения, а также неоднократно воспроизводить в лабораторных условиях такие детали и аспекты механизма сортировки донных отложений, которые невозможно наблюдать в натурных условиях.

Описание экспериментальной установки.

Состав и методика выполнения опытов

Цель лабораторных исследований состояла в изучении механизма и закономерностей формирования гранулометрического состава донных отложений на различных морфологических фрагментах русла в речных излучинах. Среди факторов, определяющих процесс сортировки донных отложе-

ний в различных частях меандрирующего русла, кроме исходного гранулометрического состава донных отложений, слагающих дно, и материала, подаваемого на модель, по-видимому, должны быть названы такие характеристики, как кривизна и относительная ширина русла B/H , расход воды, уклон свободной водной поверхности, морфологическое строение формирующегося русла и соответствующие ему распределение глубин и скоростей потока в пределах излучины, а также степень (критерий) подвижности наносов в различных частях излучины до и после формирования рельефа дна в результате опытов.

Для выполнения исследований была использована схематическая модель участка двух смежных излучин нижней Кубани, построенная в русловой лаборатории Главной экспериментальной базы ГГИ в геометрическом масштабе 1:150 (см. рис. 1).

Морфологические характеристики опытных излучин представлены в табл. 1 в соответствии с морфометрическими измерителями, принятыми в



Рис. 1. Общий вид экспериментальной установки

гидролого-морфологической теории руслового процесса [5], изображенными на рис. 2.

Таблица 1

Морфометрические характеристики опытных излучин

Морфометрический показатель	Верхняя излучина	Нижняя излучина
Длина излучины, S , м	8,56	8,7
Шаг излучины, λ , м	6,19	7,77
Степень развитости излучины, S/λ	1,38	1,12
Угол входа излучины, α_1 , градусов	69	55
Угол выхода излучины, α_2 , градусов	56	34
Угол разворота излучины, $\alpha_1 + \alpha_2$, градусов	125	89
Угол сопряжения излучин, β , градусов	1	
Ширина излучины, B , м	1,55	1,25
Относительный шаг излучины, B/λ	0,25	0,16
Стрела прогиба излучины, y_m , м	2,49	1,68
Относительная ширина, B/H	38,75	31,25

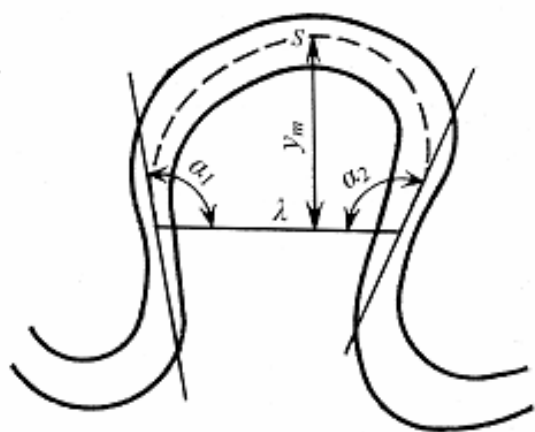


Рис. 2. Основные измерители излучин, где:

- λ — шаг излучины, или расстояние между двумя смежными точками перегиба;
 S — длина излучины, измерена по средней линии меженного русла; y_m — стрела прогиба излучины или наибольшее расстояние по нормали от средней линии русла до линии шага излучины;
 b — средняя ширина меженного русла в пределах каждой излучины, измеренная в наиболее устойчивых створах русла — в точках перегиба;
 α_1 — угол входа, или угол между линией шага и касательной к средней линии меженного русла, проведенной в верхней по течению точке перегиба излучины; α_2 — угол выхода, или угол между линией шага и касательной к средней линии меженного русла, проведенной в нижней по течению точке перегиба излучины;
 α_0 — угол разворота излучины, равный сумме углов входа и выхода

Как следует из табл. 1, верхняя из двух смежных излучин является более крутой, а нижняя — более пологой. При близких значениях длины этих излучин, соответственно 8,56 и 8,7 м, степень развитости верхней излучины (S/λ) составляет 1,38, а нижней — 1,12. Соответственно угол разворота верхней излучины составляет 125° , а нижней — 89° .

В качестве экспериментального материала в опытах использовался заменитель песка — каменный уголь с плотностью частиц $1,3 \text{ г/см}^3$. D_{50} — 50-процентный диаметр интегральной кривой гранулометрического состава исходной пробы составлял 0,258 мм, а размеры крайних фракций соответственно 0,05 и 0,70 мм.

Прежде чем этот материал был загружен в схематическую модель, представляющую собой криволинейный бетонный лоток, были выполнены предварительные опыты в гидравлическом прямолинейном стеклянном лотке длиной 8,0 м и шириной 0,21 м с целью определения начальных (неразмывающих) скоростей потока опытного материала и режима их транспорта в донно-грядовой форме в диапазоне глубин 1,0–10,0 см и критерия подвижности наносов $V/V_0 = 1,1\text{--}1,8$. По данным этих экспериментов, неразмывающая скорость потока опытного материала в диапазоне глубин 1,5–8,0 см составила 10,9–11,7 см/с.

С учетом результатов экспериментов, выполненных в стеклянном лотке, опытный материал был загружен в экспериментальную установку ровным слоем толщиной 10,0 см с уклоном 0,0005. На модель был пущен расход воды 9,0 л/с, обеспечивающий глубину на модели 4,0 см, которая в масштабе 1:150 соответствует глубине 6,0 м в натуре (русло-наполняющий расход воды в бровках русла). При этом расходе воды на модели наблюдался активный транспорт донных наносов в форме гряд. По прошествии 16 ч (4 эксперимента по 4 ч) было достигнуто состояние динамического равновесия в условиях равенства расходов донных наносов в начале и в конце модели, когда сформировались стабильный рельеф дна и профиль водной поверхности. В начале экспериментов при корытообразном русле глубиной 4,0 см и в конце опытов при полностью сформированном рельефе дна были выполнены съемки поля поверхностных скоростей потока. После выключения воды была выполнена топографическая съемка рельефа русла и отобрана 21 проба на различных фрагментах русла.

Анализ результатов исследования

Исходным материалом для анализа механизма и закономерностей формирования гранулометрического состава донных отложений в опытных излучинах служат полученные в результате опытов планы полей поверхностных скоростей потока до и после формирования рельефа дна динамического равнове-

сия, рельеф дна динамического равновесия и гранулометрические составы исходной пробы наносов, подаваемой на модель, и проб донных отложений, отобранных на различных фрагментах рельефа русла, соответствующего состоянию динамического равновесия.

Анализ результатов наблюдений на модели показал, что траектории поверхностных скоростей потока в начальной стадии формирования руслового рельефа, еще при корытообразном поперечном сечении русла по всей длине излучин с глубиной 4,0 см, параллельны берегам. Значения поверхностных скоростей потока меняются как по ширине, так и по длине потока, составляя 7,6–20,4 см/с. При этом асимметрия распределения поверхностных скоростей по ширине русла на верхней крутой излучине более значительна, чем на нижней пологой. В условиях сформировавшегося руслового рельефа структура поля поверхностных скоростей потока существенно меняется по сравнению со структурой течения в начальной стадии эксперимента. Прежде всего обращает на себя внимание заметное искривление струй на участках наибольшей кривизны излучин, вследствие формирования рельефа русла и разницы в значениях глубины потока на участках пляжей и плесов. Заметно

увеличиваются скорости потока на участках плесов. Происходит перераспределение поля поверхностных скоростей потока в соответствии со сформировавшимся рельефом дна. Максимальные скорости течения (стрезень потока) по мере движения вниз по течению смещаются к правому берегу верхней излучины и далее располагаются вдоль левого берега нижней, пологой излучины. Абсолютные значения поверхностных скоростей потока по длине излучины составляют 6,9–20,8 см/с, оставаясь близкими к их значениям, измеренным в начальной стадии эксперимента.

На рис. 3 представлен рельеф дна русла в изобатах, сформировавшийся в результате опыта. Этот рельеф отражает привычную картину, характерную для речных излучин. В пределах верхней крутой излучины сформировался левобережный пляж с минимальной глубиной 1,0 см и двумя левобережными плесами глубиной 9,0 и 6,0 см, а также пережат глубиной 4,0 см на границе верхней и нижней излучин. В пределах нижней излучины также сформировался правобережный пляж с минимальной глубиной 2,0 см и одним левобережным плесом глубиной 10,0 см. Как и следовало ожидать, в верхней крутой излучине плес получился раздвоенным, а в нижней, более

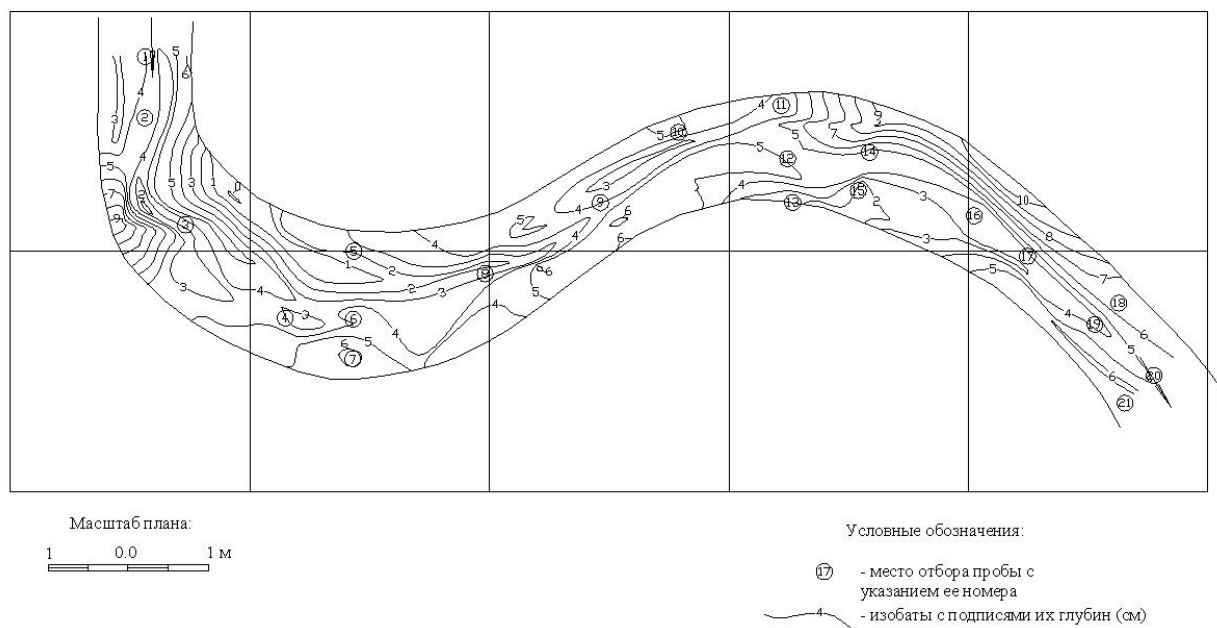


Рис. 3. Рельеф русла в изобатах, сформированный расходом воды 9 л/с и точки отбора проб донных отложений

пологой излучине, плес имеет большую длину и не раздвоен.

На различных характерных морфологических фрагментах русла, сформированного в результате опыта, в точках, указанных на рис. 3, после спуска воды с модели были отобраны пробы донных отложений. Пробы отбирались с поверхности дна, гребней гряд в слое толщиной 2–3 диаметра частиц. По техническим причинам, к сожалению, в чрезвычайно важных для данного исследования местах — наиболее глубоких частях плесов верхней и нижней излучин, глубиной соответственно 9,0 и 10,0 см, пробы донных отложений оказались не взятыми.

Определение гранулометрического состава проб исходной, подаваемой на модель, и взятых в различных точках модели производилось с помощью точных аналитических весов. Результаты обработки проб донных отложений, взятых на различных фрагментах рельефа дна русла, сформировавшегося в результате опыта, были сгруппированы соответственно для точек с глубинами менее 4,0 и более 4,0 см. Граница разделения проб на две группы принята из тех соображений, что в начальной стадии опытов глубина потока была равной 4,0 см. Таким образом, принятое разделение гранулометричес-

ких составов проб донных отложений на две группы характеризует точки рельефа дна, в которых в результате формирования русла динамического равновесия происходит либо намыв (у выпуклых берегов излучин) с глубиной менее 4,0 см, либо размыв исходного рельефа дна (у вогнутых берегов излучин) с глубинами более 4,0 см.

Основным активным фактором, определяющим транспорт наносов в реках и формирующим рельеф дна, является речной поток и его скоростная структура, которая в извилистых руслах в большей степени зависит от очертания границ русла. На рис. 4 представлены эпюры распределения поверхностных скоростей потока в поперечных сечениях верхней и нижней излучин в начальной и конечной стадиях эксперимента, в которых были взяты пробы донных отложений после формирования рельефа русла. На этом рисунке показаны также точки отбора проб в других частях русла и векторы поверхностных скоростей потока в этих точках в начальной и конечной стадиях эксперимента.

Рисунок 4 наглядно демонстрирует трансформацию исходного поля поверхностных скоростей потока в интересующих нас точках отбора проб донных отложений в ре-

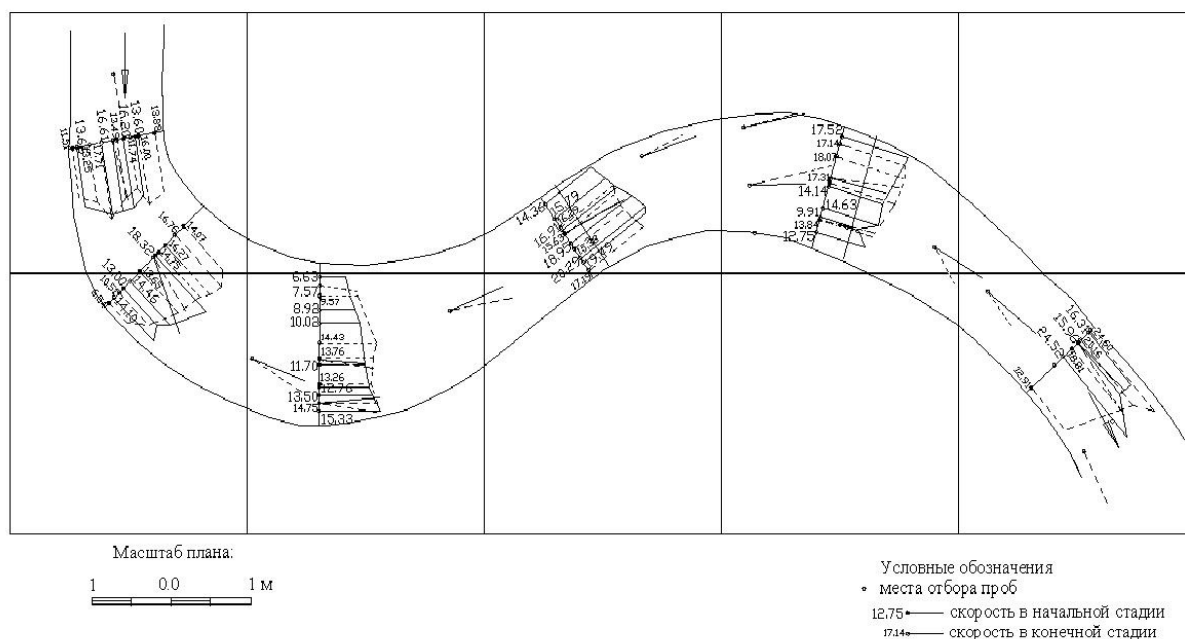


Рис. 4. Эпюры и векторы скоростей потока в начальной и конечной стадиях эксперимента в поперечных сечениях взятия проб донных отложений

зультате формирования рельефа русла. Интенсивность транспорта донных наносов и связанная с ней сортировка их гранулометрического состава определяются не абсолютными значениями скоростей потока, а их относительными значениями, отнесенными к значениям неразмывающих скоростей опытного материала — к скоростям потока при данной глубине потока, при которых начинается движение частиц. Таким образом, значения V/V_0 являются критерием, характеризующим степень подвижности донных наносов. Чем больше значение критерия подвижности V/V_0 , тем больше интенсивность транспорта донных наносов и вероятность большей сортировки их гранулометрических составов в процессе движения донных частиц.

В табл. 2 представлены сравнительные характеристики значений критерия подвижности донных отложений в различных частях

русла в начальной и конечной стадиях эксперимента. Значения неразмывающих скоростей потока, как отмечалось, были определены по опытам в 8-метровом гидравлическом лотке. В начальной стадии эксперимента на схематической модели исследуемых излучин при постоянном прямоугольном поперечном сечении исходного русла глубиной 4,0 см неразмывающая скорость потока V_0 для экспериментального материала (измельченного угля) для всех точек, в которых в конце опыта отбирались пробы, была постоянной и составила 11,7 см/с (см. табл. 2). Соответственно в начальной стадии опыта, исходя из значений поля поверхностных скоростей потока (пересчитанных на средние по вертикали), были рассчитаны значения критерия подвижности наносов в точках, в которых далее по завершении формирования рельефа дна были отобраны пробы донных отложений.

Таблица 2

Сравнительные характеристики критерия подвижности донных отложений в начальной и конечной стадиях эксперимента

Номер пробы	Начальная стадия			Конечная стадия				
	Скорость потока средняя (V), см/с	Неразмывающая скорость (V_0), см/с	Критерий подвижности (V/V_0)	Место отбора пробы	Глубина отбора пробы, см	Скорость потока средняя (V), см/с	Неразмывающая скорость (V_0), см/с	Критерий подвижности (V/V_0)
<i>Верхняя излучина</i>								
1	12,42	11,7	1,06	перекат	4,0	11,52	11,7	0,98
2	14,76	11,7	1,26	перекат	4,4	12,15	11,6	1,05
3	16,74	11,7	1,43	середина русла	3,3	13,05	11,7	1,12
4	12,33	11,7	1,05	перекат	3,1	13,14	11,7	1,12
5	6,57	11,7	0,56	пляж	2,1	10,17	11,2	0,91
6	10,8	11,7	0,92	середина русла	4,3	12,33	11,6	1,06
7	13,23	11,7	1,13	плес	6,3	13,23	11,1	1,19
8	12,15	11,7	1,04	перекат	2,8	14,4	11,6	1,24
9	15,75	11,7	1,35	перекат	4,0	14,04	11,7	1,20
<i>Нижняя излучина</i>								
9	15,75	11,7	1,35	перекат	4,0	14,04	11,7	1,20
10	12,6	11,7	1,08	плес	5,0	10,53	11,4	0,92
11	14,04	11,7	1,20	перекат	3,5	12,15	11,7	1,04

Таблица 2
(Окончание)

12	13,77	11,7	1,18	середина русла	4,7	18,72	11,5	1,63
13	7,2	11,7	0,62	пляж	2,2	7,2	11,3	0,64
14	13,05	11,7	1,12	плес	4,3	15,57	11,6	1,34
15	9	11,7	0,77	пляж	1,9	11,79	11,2	1,05
16	12,6	11,7	1,08	перекат	3,3	11,25	11,7	0,96
17	13,77	11,7	1,18	перекат	3,7	8,73	11,7	0,75
18	13,86	11,7	1,18	плес	6,2	18,18	11,1	1,64
19	13,5	11,7	1,15	середина русла	3,9	11,34	11,7	0,97
20	13,23	11,7	1,13	середина русла	5,1	12,6	11,4	1,11
21	10,8	11,7	0,92	плес	5,5	12,6	11,3	1,12

Как следует из табл. 2, в начальной стадии эксперимента в 5 из 21 точек взятия проб донных отложений значения критерия подвижности донных наносов были меньше единицы. Из табл. 2 видно, что большинство из этих точек в результате опыта оказались на сформировавшихся в дальнейшем пляжах. В конечной стадии эксперимента значения критерия подвижности донных наносов меньше единицы, кроме указанных точек 5 и 13, на пляже наблюдались еще в нескольких точках, но их значения настолько близки к единице, что это различие можно отнести к точности определения V/V_0 .

В табл. 3 суммирована вся информация, полученная в ходе эксперимента: указаны места взятия проб донных отложений и их приуроченность к конкретным морфологическим фрагментам руслового рельефа, глубина отбора каждой пробы, значения критерия подвижности наносов в этих точках и значения характерных диаметров интегральных кривых гранулометрических составов в точках

отбора проб. Здесь же представлены значения коэффициента неоднородности проб в форме D_{95}/D_5 и граничные значения диаметров донных отложений, разделяющих мелкофракционную и крупнофракционную составляющие гранулометрического состава донных отложений (последняя графа табл. 3). Численные значения морфологических и гидравлических характеристик формирования гранулометрического состава донных отложений в опытных излучинах в табл. 3 представлены отдельно для верхней и нижней излучины.

На рис. 5 для наглядности в местах взятия проб донных отложений указаны значения диаметров 50, 5 и 95 %-ной обеспеченности, определенные по интегральным кривым гранулометрических составов донных отложений этих проб. Как следует из этого рисунка и табл. 3, диаметр 50 %-ной обеспеченности гранулометрических составов проб на исследуемых излучинах меняется от 0,195 мм в точке 21 (плес нижней излучины) до 0,297 мм в точке 16 (перекат нижней излучины).

Таблица 3

Морфологические и гидравлические условия формирования гранулометрического состава донных отложений в опытных излучинах

Номер пробы	Место отбора пробы	Глубина отбора пробы, см	Скорость потока поверхностная, см/с	Скорость потока средняя (V), см/с	Средний диаметр частиц (D_{50}), мм	Неразмывающая скорость (V_0), см/с	Критерий подвижности наносов (V/V_0)	D_{95} , мм	D_{50} , мм	D_{95}/D_{50}	Граница мелкофракционный/ крупнофракционный (%)		
Верхняя излучина													
1	перекат	4,0	12,8	11,5	0,205	11,7	0,985	0,48	0,05	0,28	0,743	9,64	89,5
2	перекат	4,4	13,5	12,2	0,248	11,6	1,047	0,60	0,08	0,34	0,736	7,95	75,0
3	середина русла	3,3	14,5	13,1	0,254	11,7	1,115	0,61	0,07	0,34	0,741	8,24	83,0
4	перекат	3,1	14,6	13,1	0,237	11,7	1,123	0,52	0,08	0,31	0,767	6,93	85,0
5	пляж	2,1	11,3	10,2	0,216	11,2	0,908	0,43	0,07	0,27	0,788	6,14	93,0
6	середина русла	4,3	13,7	12,3	0,221	11,6	1,063	0,50	0,06	0,29	0,757	7,98	87,0
7	плес	6,3	14,7	13,2	0,269	11,1	1,192	0,65	0,12	0,37	0,735	5,65	70,0
8	перекат	2,8	16,0	14,4	0,240	11,6	1,241	0,57	0,09	0,32	0,752	6,35	81,0
9	перекат	4,0	15,6	14,0	0,231	11,7	1,200	0,49	0,10	0,30	0,773	5,00	87,5
Нижняя излучина													
9	перекат	4,0	15,6	14,0	0,231	11,7	1,200	0,49	0,10	0,30	0,773	5,00	87,5
10	плес	5,0	11,7	10,5	0,209	11,4	0,924	0,46	0,07	0,28	0,760	6,50	90,5
11	перекат	3,5	13,5	12,2	0,205	11,7	1,038	0,47	0,07	0,28	0,740	7,15	90,0
12	середина русла	4,7	20,8	18,7	0,239	11,5	1,628	0,53	0,10	0,31	0,764	5,20	83,0
13	пляж	2,2	8,0	7,2	0,244	11,3	0,637	0,50	0,10	0,31	0,782	5,09	85,0
14	плес	4,3	17,3	15,6	0,251	11,6	1,342	0,57	0,11	0,33	0,754	5,18	79,5
15	пляж	1,9	13,1	11,8	0,239	11,2	1,053	0,54	0,08	0,32	0,759	6,70	82,0
16	перекат	3,3	12,5	11,3	0,297	11,7	0,962	0,65	0,13	0,42	0,711	4,85	56,5
17	перекат	3,7	9,7	8,7	0,205	11,7	0,746	0,43	0,06	0,27	0,765	7,22	93,0
18	плес	6,2	20,2	18,2	0,271	11,1	1,638	0,61	0,12	0,37	0,736	5,00	71,5
19	середина русла	3,9	12,6	11,3	0,232	11,7	0,969	0,52	0,10	0,31	0,753	5,27	83,5
20	середина русла	5,1	14,0	12,6	0,218	11,4	1,105	0,45	0,08	0,28	0,779	5,70	91,5
21	плес	5,5	14,0	12,6	0,195	11,3	1,115	0,52	0,04	0,28	0,704	12,88	86,5

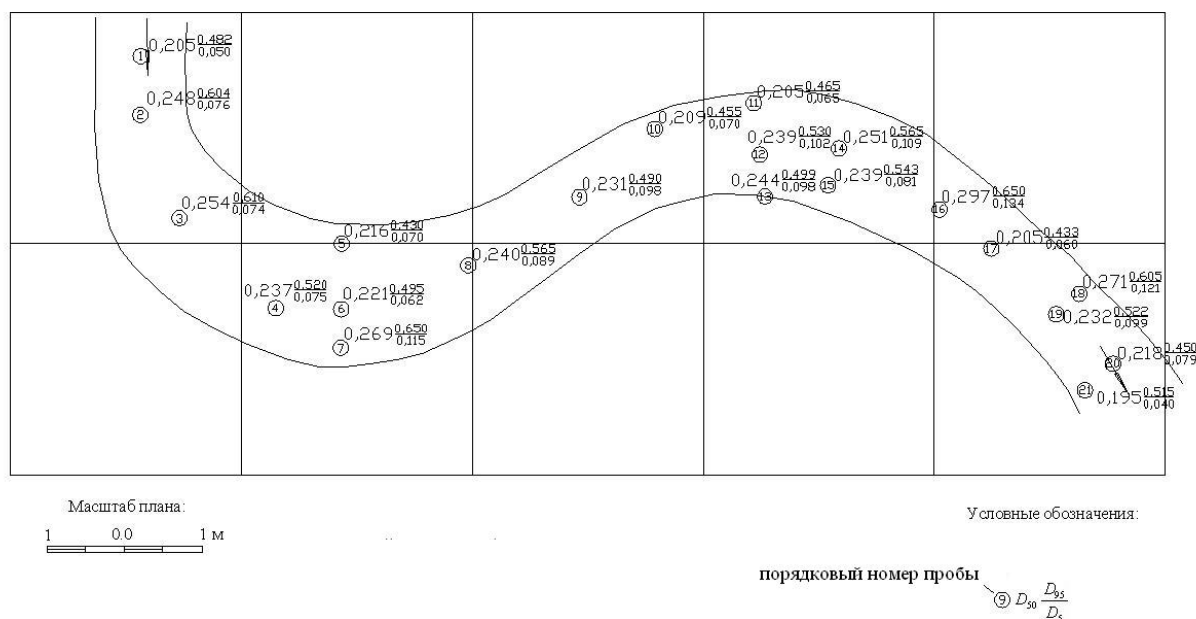


Рис. 5. Места проб с указанием значений их диаметров 50, 5 и 95 %-ной обеспеченности

Наименьшее значение диаметра донных отложений, d_{50} , на модели меняется в пределах от 0,04 (точка 21) до 0,134 мм (точка 16, перекат). Обе эти точки находятся в пределах нижней излуины.

Максимальный диаметр проб донных отложений D_{95} на модели также меняется в широких пределах, от значений 0,43 (точка 5 на пляже верхней излуины) до 0,656 мм (точка 16, перекат, нижняя излуина).

Коэффициент неоднородности донных отложений — D_{95}/D_5 одновременно с диапазоном изменения крупности крайних частиц в пробе характеризует степень отсортированности состава проб. По данным эксперимента, эта величина также меняется в широких пределах — от ее значения 4,85 в точке 16 на перекате нижней излуины до значения 12,88 в точке 21 (плес нижней излуины). Обращает внимание, что высокая отсортированность состава донных отложений ($D_{95}/D_5 = 4,85-7,00$) наблюдается как при низких значениях критерия подвижности наносов, меньше единицы, когда идет преимущественно накопление (намыв) мелких частиц (пробы 5, 13, 16, 19), так и при наиболее высоких значениях V/V_0 , когда сортировка составов донных отложений происходит за счет более активного уноса мелких частиц из состава грунта (пробы 7, 14, 18).

Из последней графы табл. 3 следует, что значения граничного диаметра между мелкофракционной и крупнофракционной составляющей смеси донных отложений зависят от приуроченности проб к тому или иному морфологическому фрагменту руслового рельефа. Так, самое низкое значение граничного процентного состава донных отложений (наибольшее присутствие в пробе крупных фракций) наблюдается на участках плесов: 70 % в плесе верхней излуины (проба 7) и 71,5 % в плесе нижней излуины (проба 18). Наибольшее значение граничного диаметра между мелкофракционной и крупнофракционной составляющими гранулометрического состава донных отложений (наименьшее присутствие крупных фракций в пробе) — на участке верхней излуины (93 %), в точке 5 (пляж) и на участке нижней излуины в точке 17 (перекат).

На рис. 6 представлена зависимость значений характерных диаметров проб донных отложений от критерия подвижности V/V_0 по данным эксперимента. Из этого рисунка следует, что в диапазоне изменения критерия подвижности $0,6 < V/V_0 < 1,7$ диаметр самых мелких частиц в пробах донных отложений (D_5) меняется на модели в среднем от 0,07 до 0,11 мм. Соответственно D_{50} и D_{95} меняются в среднем от 0,22 до 0,25 мм и от 0,47 до 0,58 мм.

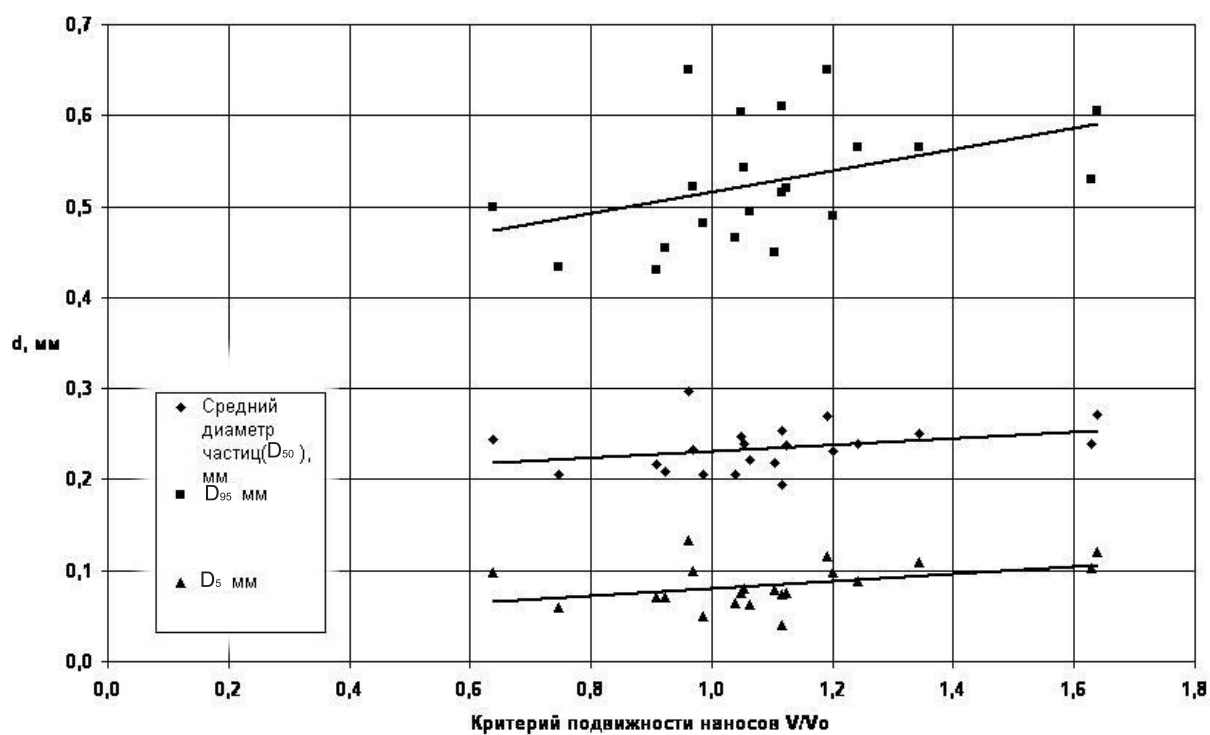


Рис. 6. Зависимость характерных диаметров проб донных отложений от критерия подвижности V/V_0

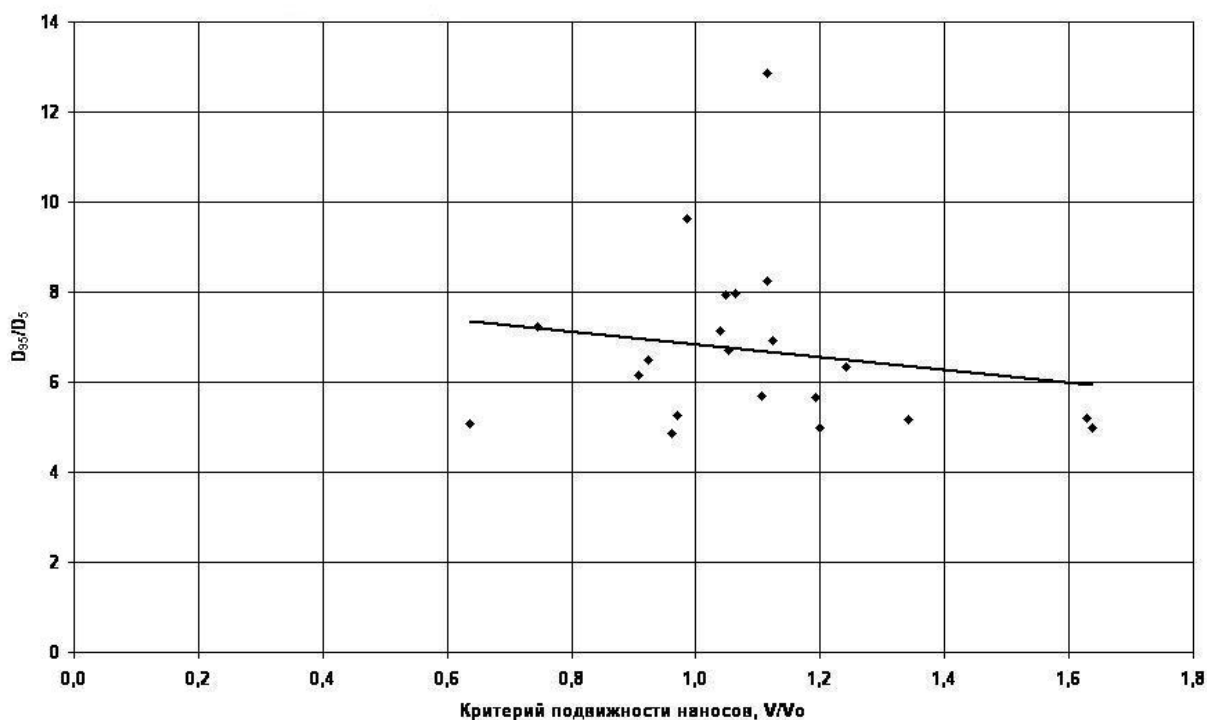


Рис. 7. Зависимость коэффициента неоднородности состава проб донных D_{95}/D_5 отложения от критерия подвижности V/V_0

На рис. 7 представлена зависимость коэффициента неоднородности состава проб донных отложений D_{95}/D_5 от критерия подвижности V/V_0 , в диапазоне его изменений $0,6 < V/V_0 < 1,7$. Из этого графика следует, что в отмеченном диапазоне изменения критерия подвижности донных наносов коэффициент неоднородности проб донных отложений на модели с увеличением критерия подвижности уменьшается в среднем от 6,7 до 6,0.

При гидравлическом моделировании руслового процесса и транспорта донных наносов на неискаженных, размываемых моделях речных русел с соблюдением геометрического подобия донных частиц возникает задача назначения на модели исходного гранулометрического состава наносов для их подачи на модель. При этом исследователь по данным натурных работ может располагать лишь сведениями о фракционном составе проб донных отложений в отдельных точках дна русла, приуроченных к различным характерным морфологическим фрагментам руслового рельефа. Наиболее близкий к исходной пробе фракционный состав донных отложений в условиях наших опытов из всех 21 проб оказался у проб 2 и 3, взятых в начале модели. Отсюда следует рекомендация назначать для подачи на размываемую модель состав донных отложений проб, взятых в натуре на верхнем пограничном участке исследуемого участка русла. Такой же вывод был получен в ГГИ ранее по данным исследований на ряде размываемых моделей речных русел [3; 4].

Заключение

В данной статье представлены методика и результаты лабораторного исследования механизма и закономерностей формирования гранулометрического состава донных отложений на различных морфологических фрагментах русла в речных излучинах. По сравнению с ранее выполненными в ГГИ аналогичными лабораторными работами [3; 4], в которых фиксировались характеристики гранулометрического состава донных отложений в различных частях моделей в зависимости от

сформированной в опытах морфологии русла, скоростной структуры потока и критерия подвижности наносов, в настоящих исследованиях дополнительно исследовались условия, предшествующие формированию рельефа русла. Отмеченное позволяет провести более глубокий анализ и исследовать не только закономерности распределения гранулометрического состава донных отложений, но также сам механизм и причины формирования различного гранулометрического состава грунта и его сортировки в зависимости от характера трансформации исходного рельефа и поля скоростей потока в ходе эксперимента (формирования рельефа русла).

На основе усовершенствованной методики в настоящей работе удалось количественно более подробно описать процесс формирования гранулометрического состава донных отложений в двух смежных экспериментальных излучинах. Установлены закономерности формирования гранулометрического состава на различных морфологических фрагментах экспериментального меандрирующего русла, а также количественные зависимости изменения характерных диаметров проб донных отложений от критерия их подвижности.

Результаты опытов позволяют также предложить рекомендации по установлению исходного гранулометрического состава наносов для их подачи на размываемую модель на основе данных измерений гранулометрического состава донных отложений в натуральных условиях на исследуемой реке.

Изложенная выше методика и результаты лабораторных исследований механизма и закономерностей формирования гранулометрического состава донных отложений в руслах рек открывают перспективное направление для углубленного изучения процесса транспорта донных наносов в реках и дальнейшего совершенствования методов расчетов и прогнозов расхода и стока донных наносов, характеристик руслового процесса и русловых деформаций на основе учета пространственно-временной изменчивости гранулометрического состава руслового материала в процессе его транспорта в реках.

Список литературы

1. Kopaliani Z. D. Problem of Bed Load Discharge assessment in rivers // Proc. 10th Inter symp. on River Sedimentation. — Moscow, 2007. — Vol. 3. — P. 175–181.
2. Кондратьев Н. Е., Попов И. В., Сущенко Б. Ф. Основы гидроморфологической теории руслового процесса. — Л.: Гидрометеиздат, 1982. — 272 с.
3. Копалиани З. Д. Лабораторные исследования закономерностей переформирования состава наносов на размываемых моделях речных русел // Тр. ГГИ. — Л.: Гидрометеиздат, 1982. — Вып. 278. — С. 70–88.
4. Копалиани З. Д., Твалавадзе О. А., Носелидзе Д. В. Гидравлическое моделирование руслового процесса р. Утутлик на участке мостовых переходов // Тр. ГГИ. — Л.: Гидрометеиздат, 1990. — Вып. 337. — С. 138–162.
5. Гришанин К. В. Устойчивость русел рек и каналов. — Л.: Гидрометеиздат, 1974. — 143 с.

УДК 556.53.08

Н. И. Католикова,
Государственный гидрологический институт
(Санкт-Петербург)

МОРФОМЕТРИЧЕСКИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ РАЗВИТИЯ ИЗЛУЧИН
НА НИЖНЕЙ КУБАНИ

MORPHOMETRIC REGULARITIES OF THE FREE MEANDERING CURVES
DEVELOPMENT DOWNSTREAM OF THE KUBAN RIVER

Целью настоящей работы является выявление и оценка зависимости морфометрических показателей русла при свободном меандрировании от изменений руслоформирующих условий на участках большой протяженности.

The purposes of this study is the identification and the estimation of morphometric measures of free meandering curves and their variations because of channel-forming factors changes on the extensive reach of river.

Ключевые слова: излучины, меандрирование, гидроморфологическая теория, русловые деформации, морфометрические характеристики.

Key words: bends, meandering, hydro morphological theory, bed deformations, channel data.



О ПРЕДСТАВЛЕНИЯМ гидроморфологической теории руслового процесса считается, что свободное меандрирование развивается в широких речных долинах, склоны которых не ограничивают свободное развитие плановых деформаций русла, а ход глубинных деформаций в многолетнем плане тесно увязан с развитием плановых деформаций. В общей схеме отмечается также, что в начальной стадии развития, при углах разворота менее 90° , излучины свободного меандрирования сползают вниз по тече-

нию, увеличивая угол разворота. По мере увеличения угла разворота сползание излучин замедляется, а форма их меняется (излучины вытягиваются). При углах разворота, близких к 140° , в результате преимущественного развития одного из плесов происходит разделение плесовой ложбины и нарушение плановой симметрии излучин. Развитие их завершается сближением подмываемых берегов смежных излучин, расположенных выше и ниже по течению, и прорывом образовавшегося между ними перешейка. В зоне прорыва возрастают

скорости деформаций, нарушается ход развития смежных излучин и начинает формироваться новая излучина. Таким образом, при свободном меандрировании степень развития излучин является показателем, отражающим механизм переформирования русла.

Данное исследование произведено для участка Кубани от плотины Краснодарского гидроузла до устьев дельтовых рукавов Кубань и Протока, на всем протяжении которого река испытывает интенсивное разноплановое антропогенное воздействие. Предполагалось выяснить, отражаются ли изменения руслоформирующих условий, коренным образом меняющих естественный режим транспорта наносов и русловых деформаций на однородном достаточно протяженном участке, на морфометрических показателях свободного меандрирования, и наоборот — возможно ли по динамике морфометрических показателей русла выявить изменения руслоформирующих факторов.

Активное освоение территории нижней Кубани началось с конца XVIII в. С этого времени для защиты населенных пунктов и сельскохозяйственных угодий от наводнений без какого-либо проектного обоснования вдоль русла р. Кубани строились дамбы обвалования. В качестве материала для строительства дамб использовался речной аллювий из самой реки. Суммарная длина всех дамб от Краснодарского гидроузла до устьев дельтовых рукавов Кубань и Протока уже с 1930-х гг. и по настоящее время составляет 648 км.

Кардинальные изменения режима русловых деформаций на большом протяжении реки отмечаются после возведения в 1974 г. Краснодарского гидроузла сезонного регулирования (246 км от устья). При этом характерно, что влияние дамб обвалования на русловой процесс на исследуемом участке проявлялось в значительно большей степени до ввода в строй Краснодарского ГУ. Поскольку в естественных условиях при максимальных расходах воды поток в междамбовом пространстве протекал при более высоких уровнях и с большими скоростями, чем в условиях существования Краснодарского водохранилища, существенно снизившего максимальные расходы воды.

В условиях обвалования русел и заметном изменении режима стока воды пойма реки практически не затопливается. И хотя морфологический облик русла сохраняется и по-прежнему представляет собой извилистое русло с излучинами, динамика этих излучин приобрела ряд особенностей. В первую очередь отсутствие затопления поймы отражается на механизме и скорости подмыва вогнутых берегов и формирования пляжей на выпуклых берегах излучин, также на высоте этих пляжей. Основные процессы теперь происходят в русле и сводятся к транзиту донных наносов в виде сползающих по дну гряд, нарастанию и сработке перекатов.

Кроме обвалования русла и сезонного регулирования стока, на исследуемом участке осуществляются и другие мероприятия, влияющие на ход руслового процесса, а именно: добыча из русла речного аллювия для строительных целей, землечерпание для обеспечения судоходных условий, спрямления излучин, руслорегулирующие, русловыправительные и берегоукрепительные мероприятия.

Интенсивность карьерных разработок в русле нижней Кубани в отдельные годы в 4,5 раза превосходила величину естественного годового стока донных наносов у Краснодара. А интенсивность землечерпания Кубанским речным пароходством в 4 раза больше, чем интенсивность карьерных разработок. Так, за период 1972–1982 гг. на перекатах нижней Кубани был извлечен объем грунта, соответствующий объему пляжей всех излучин на участке между Краснодарским и Тиховским гидроузлами.

Перечисленные антропогенные факторы при сохранении в целом морфологического облика русла нижней Кубани коренным образом меняют естественный режим транспорта наносов и русловых деформаций. Анализ высотных деформаций русла за период 1978–2007 гг. выявил существенное изменение отметок дна между Краснодарским и Тиховским гидроузлами.

Попытка исследования закономерностей свободного меандрирования на нижней Кубани предпринята по трем участкам, сток воды между которыми делится примерно пополам и колеблется в разные пери-

оды в пределах 44–56 %. Это участок реки 246–120 км от устья между Краснодарским и Тиховским гидроузлами (далее этот участок именуется р. Кубань) и два дельтовых рукава на всем их протяжении: рукав Кубань (длина 116 км) и рукав Протока (длина 133 км). Для анализа использованы топографические и лоцманские карты за разные годы, а также космические снимки, датируемые в основном 2006 г.

Всего на этих участках за разные годы выделено до 240 излучин разной степени развитости (см. табл. 1). Из общих рядов были ис-

ключены данные по излучинам, измененным под влиянием случайных факторов, как правило, антропогенного характера.

В качестве линейных и угловых характеристик излучин, а также показателей их степени развитости использована система измерителей, разработанных в рамках гидролого-морфологической теории руслового процесса [1]: λ — шаг, S — длина, y_m — стрела прогиба, α_1 — угол входа, α_2 — угол выхода, α_0 — угол разворота излучины, b — средняя ширина меженного русла, S/λ — показатель степени развитости излучин.

Таблица 1

Число исследованных излучин за разные годы
(в числителе — общая длина ряда, в знаменателе — длина базового ряда)

Участок	1911	1986	2006
р. Кубань	53/46	50/43	50/39
рукав Кубань	—	87/73	80/77
рукав Протока	—	98/80	109/105

Анализ графика связи углов разворота излучин со степенью их развитости $S/\lambda = f(\alpha_0)$ выявил хорошую сходимость полученных результатов с натурными данными по другим рекам [2; 3], а также с зависимостью $S/\lambda = \exp[(\alpha_0/4)^2]$, полученной В. И. Замышляевым под руководством К. В. Гришанина из математической модели плановых деформаций меандрирующего русла [4].

На рис. 1 приведен график такой связи для участка р. Кубани (измерения по карте масштаба 1:100 000 за 1986 г.). Анализ данных выявил отклонение от основного поля точек, соответствующих излучинам с активным антропогенным вмешательством (верхняя кривая), а также находящимся под влиянием относительно недавно произошедших спрямлений смежных излучин (нижняя кривая).

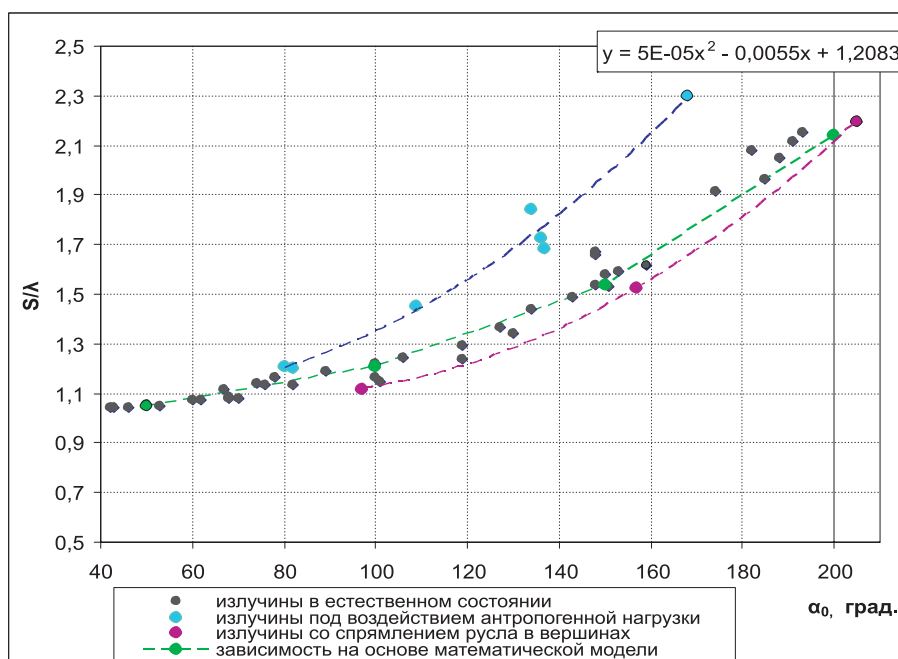


Рис. 1. Связь углов разворота излучин со степенью их развитости для участка р. Кубани между Краснодарским и Тиховским ГУ

Сравнение данных по всем трем исследуемым участкам показало, что для них связи углов разворота излучин со степенью их развитости $S/\lambda = f(\alpha_0)$ достаточно близки и могут быть аппроксимированы общим уравнением $y = 0,00004x^2 - 0,002x + 1,0563$ (см. рис. 2).

Анализ изменений линейных размеров излучин (λ , S , y_m) по длине участков за 1986 и 2006 гг. выявил наличие четко выраженной тенденции уменьшения сверху вниз по течению величин длины и стрелы прогиба (S , y_m). Для величины шага излучины (λ) тренд не прослеживается.

Распределение показателей степени развитости излучин (S/λ , α_0) сверху вниз по течению различается для разных участков. Для реки Кубань и рукава Кубань отмечается тенденция уменьшения этих величин по направлению к устью, а для рукава Протока отмечается слабо выраженная тенденция увеличения значений от истока к устью, а для величины α_0 за 2006 г. — отсутствие тренда.

Средние и расчетные значения морфометрических показателей русла на нижней Кубани, рассчитанные по базовым рядам этих величин, представлены в табл. 2.

Из табл. 2 видно, что средние значения линейных размеров излучин (λ , S , y_m) р. Кубани более чем в два раза превышают соответствующие величины по рукавам Кубань и Протока. Учитывая распределение водности по указанным участкам, соответственно 100, 495 и 51 % за рассматриваемый период можно говорить о прямой зависимости этих показателей от масштаба водотока.

Средние показатели степени развитости излучин (S/λ , α_0) для р. Кубани также несколько больше, чем для дельтовых протоков (табл. 2). При этом величины их группируются таким образом, что 60–70 % всех излучин имеют для реки Кубань угол разворота $60^\circ < \alpha_0 < 160^\circ$ и относительную длину $1,1 < S/\lambda < 1,7$, а для рукавов Кубань и Протока $60^\circ < \alpha_0 < 130^\circ$ и $1,1 < S/\lambda < 1,4$.

Существенные изменения в режиме стока воды на нижней Кубани после сооружения плотины Краснодарского ГУ выражаются в том, что наблюдаемые в последние годы максимальные расходы воды р. Кубани ниже г. Краснодара уменьшились в среднем на 25 %. Об этом говорит хронологический ход максимальных расходов воды (см. рис. 3).

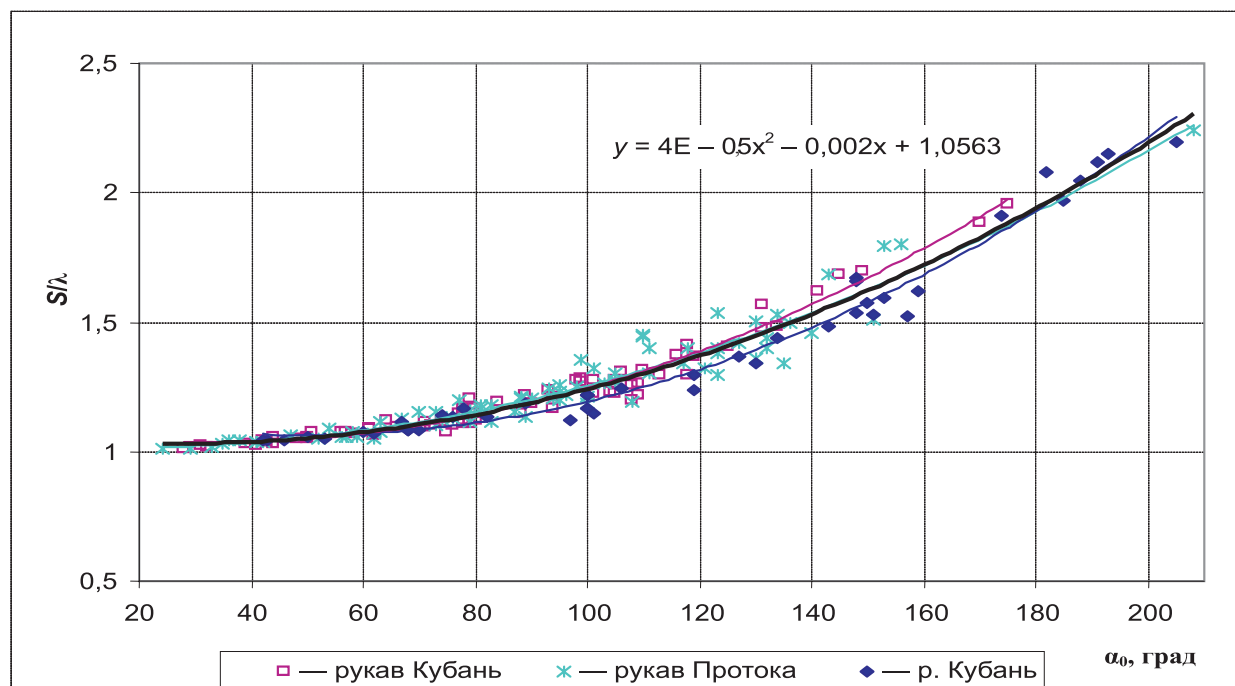


Рис. 2. Связь углов разворота излучин со степенью их развитости для нижней Кубани

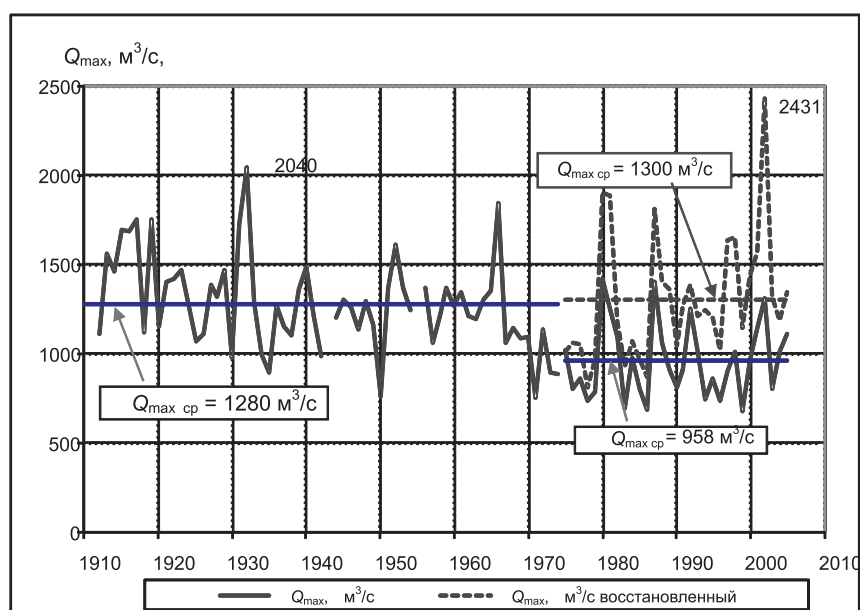
Таблица 2

Обеспеченные величины характеристик излучин нижней Кубани

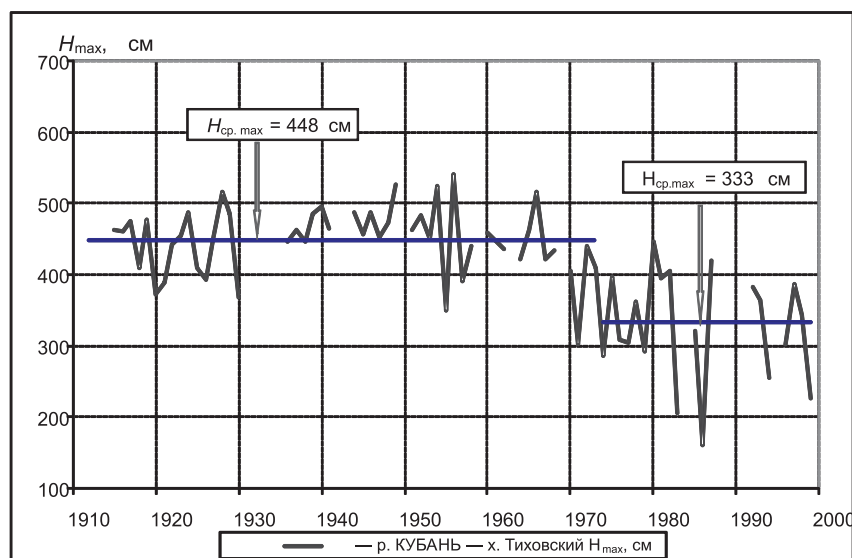
Год	Число излучин	Характеристика	Средняя величина	Расчетные величины, обеспеченностью (%)							
				1	5	10	20	50	75	90	95
река Кубань между Краснодарским и Тиховским ГУ											
1986	43	λ , км	1,57	2,81	2,34	2,13	1,90	1,52	1,27	1,08	0,982
		S , км	2,00	4,92	3,82	3,33	2,83	2,05	1,58	1,25	1,09
		S/λ	1,40	2,88	2,12	1,84	1,59	1,28	1,15	1,08	1,06
		y_m , км	0,579	1,68	1,25	1,05	0,835	0,512	0,320	0,202	0,146
		b , км	0,210	0,313	0,282	0,265	0,246	0,209	0,181	0,157	0,143
		α_0 , °	115	219	194	179	159	116	78,6	48,5	34,0
2006	39	λ , км	1,46	2,77	2,26	2,04	1,80	1,40	1,15	0,958	0,858
		S , км	2,20	4,64	3,56	3,08	2,60	1,85	1,41	1,10	0,948
		S/λ	1,36	2,80	2,15	1,86	1,59	1,24	1,09	1,03	1,01
		y_m , км	0,528	1,66	1,20	0,995	0,780	0,455	0,272	0,160	0,111
		b , км	0,193	0,282	0,255	0,240	0,224	0,192	0,168	0,147	0,135
		α_0 , °	106	203	180	166	148	107	71,6	43,4	30,0
рукав Кубань от Тиховского ГУ до устья											
1986	73	λ , км	0,694	1,46	1,13	1,00	0,860	0,651	0,529	0,443	0,399
		S , км	0,837	1,69	1,35	1,20	1,05	0,795	0,639	0,524	0,465
		S/λ	1,22	1,98	1,60	1,45	1,32	1,16	1,09	1,05	1,04
		y_m , км	0,191	0,484	0,373	0,320	0,264	0,175	0,120	0,082	0,064
		b , км	0,081	0,111	0,102	0,097	0,091	0,080	0,072	0,065	0,061
		α_0 , °	86,5	180	147	131	112	82,4	62,7	48,1	41,0
2006	76	λ , км	0,668	1,44	1,11	0,970	0,832	0,624	0,503	0,419	0,376
		S , км	0,844	1,82	1,43	1,25	1,07	0,792	0,621	0,499	0,437
		S/λ	1,27	2,23	1,75	1,57	1,40	1,20	1,11	1,06	1,04
		y_m , км	0,202	0,533	0,406	0,346	0,283	0,183	0,123	0,082	0,063
		b , км	0,072	0,099	0,090	0,086	0,081	0,071	0,064	0,058	0,054
		α_0 , °	96,8	209	168	149	127	91,8	68,5	51,5	43,4
рукав Протока от Тиховского ГУ до устья											
1986	80	λ , км	0,670	1,73	1,25	1,06	0,867	0,604	0,459	0,362	0,316
		S , км	0,839	2,30	1,63	1,36	1,10	0,745	0,554	0,429	0,370
		S/λ	1,25	1,97	1,67	1,53	1,39	1,20	1,10	1,05	1,03
		y_m , км	0,204	0,667	0,479	0,394	0,305	0,173	0,100	0,056	0,038
		b , км	0,067	0,119	0,097	0,088	0,079	0,064	0,055	0,049	0,046
		α_0 , °	91,9	182	153	139	122	89,5	66,3	47,9	38,2

Таблица 2
(Окончание)

2006	105	λ , км	0,630	1,79	1,25	1,03	0,829	0,555	0,408	0,313	0,269
		S , км	0,812	2,33	1,62	1,34	1,07	0,713	0,523	0,400	0,342
		S/λ	1,31	2,13	1,79	1,63	1,47	1,25	1,13	1,06	1,04
		y_m , км	0,205	0,638	0,465	0,385	0,302	0,177	0,106	0,063	0,044
		b , км	0,075	0,099	0,091	0,087	0,082	0,074	0,068	0,063	0,060
		α_0 , °	101	197	166	151	133	98,6	74,0	54,4	44,0



а



б

Рис. 3. Максимальные расходы воды р. Кубань у г. Краснодара (а)
и у х. Тиховского (б)

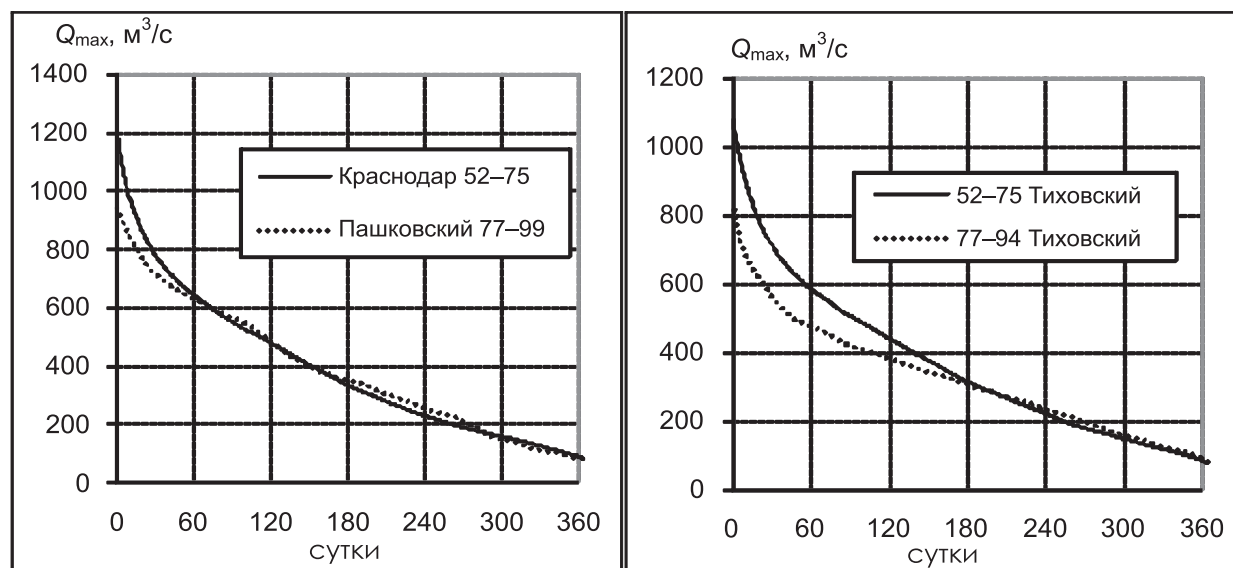


Рис. 4. Кривые продолжительности стояния суточных расходов воды в условиях естественного и зарегулированного стока воды на р. Кубань

При наблюдаемом изменении режима стока соответственно изменился и режим уровней воды. Так, в условиях регулирования стока средний многолетний уровень воды у х. Тиховского стал ниже на 115 см. Но наиболее заметно изменился режим максимальных уровней.

Кроме того, внутригодовое распределение стока стало более равномерным, о чем свидетельствуют кривые продолжительности стояния суточных расходов воды, которые для условий регулирования стока в области максимальных расходов воды располагаются ниже кривых для естественных условий (рис. 4).

Анализ морфометрических характеристик излучин и динамики трендов их распределения по длине участка при естественном режиме стока воды и в регулируемых условиях оказался возможен лишь на участке р. Кубань между Краснодарским и Федоровским гидроузлами (длина 89 км), где для этого имелись картографические материалы за соответствующие периоды (1911, 1986 и 2006 гг.). Анализ

выявил наличие в естественных условиях (1911) четко выраженной тенденции уменьшения величин линейных измерителей излучин (λ , S , y_m) сверху вниз по течению реки. Указанная тенденция в 1986–2006 гг. изменилась для шага и длины излучины (λ , S) и сохранилась для величины стрелы прогиба (y_m).

Распределение показателей степени развитости излучин (S/λ , α_0) сверху вниз по течению также характеризуется сменой трендов указанных величин от увеличения (1911) до уменьшения (1986–2006).

Для всех рассмотренных величин отмечается нестрогая цикличность в изменении по длине участка. При этом средние значения линейных размеров и угла разворота излучин (λ , S , y_m , α_0) возросли в 1986–2006 гг. по сравнению с 1911 г., показатель степени развитости излучин S/λ не изменился, а изменчивость всех без исключения морфометрических показателей излучин уменьшилась, что отражено в динамике коэффициентов вариации их величин (см. табл. 3).

Таблица 3

**Морфометрические показатели излучин р. Кубани между
Краснодарским и Федоровским ГУ за разные годы**

λ , км		S , км		y_m , км		α_0 , °		S/λ	
средн.	диапазон	средн.	диапазон	средн.	диапазон	средн.	диапазон	средн.	диапазон
	C_V		C_V		C_V		C_V		C_V
1911 г.									
1,46	0,39–3,11	2,23	0,39–4,80	0,63	0,03–1,70	116	13–220	1,51	1,02–2,94
	0,398		0,534		0,806		0,449		1,426
1986 г.									
1,56	0,96–2,20	2,37	1,02–4,39	0,67	0,14–1,82	122	43–205	1,49	1,04–2,30
	0,269		0,415		0,604		0,424		1,395
2006 г.									
1,50	0,65–2,63	2,33	0,67–4,68	0,67	0,07–2,00	121	31–208	1,51	1,02–2,36
	0,300		0,393		0,661		0,432		1,362

Полученные результаты позволяют сделать следующие выводы:

— для процесса меандрирования на нижней Кубани в условиях значительной антропогенной нагрузки сохраняются не только внешние проявления типа руслового процесса — свободного меандрирования, но и закономерности развития излучин, характерные для естественных условий;

— полученные для этих условий эмпирические зависимости согласуются с аналогичными данными по другим рекам и с зависимостями, полученными на основе математических моделей;

— изменения руслоформирующих условий на однородном достаточно протяженном участке, развивающемся по типу свободного меандрирования, отражаются на величине морфометрических показателей излучин. В частности, в 1986–2006 гг. отмечается увеличение линейных размеров излучин и уменьшение изменчивости всех морфометрических показателей меандрирующего русла по сравнению с 1911 г.;

— соответственно изменение морфо-

метрических показателей излучин служит указанием на изменение руслоформирующих условий на однородном достаточно протяженном участке.

Представленная работа не дает ответа, как конкретно влияет на развитие руслового процесса на нижней Кубани тот или иной антропогенный фактор, но она демонстрирует зависимость между величинами морфометрических показателей русла и руслоформирующими факторами для морфологически однородных участков большой протяженности. Кроме того, она наглядно демонстрирует здоровую инерционность развития природного объекта — реки, в условиях огромных и разноплановых нагрузок на нее. Поэтому полученные результаты ставят в один ряд задачу приспособления реки для нужд человека и задачу установления границ допустимого вмешательства в естественный русловый режим реки.

Здесь уместно еще раз вспомнить К. В. Гришанина: «Реки — одно из чудес нашей планеты. Мы обязаны передать их своим потомкам неповрежденными».

Список литературы

1. Кондратьев Н. Е., Попов И. В., Снитченко Б. Ф. Основы гидроморфологической теории руслового процесса. — Л.: Гидрометеиздат, 1982. — 272 с.

2. Гендельман М. М. О формах речных излучин // Сборник работ по гидрологии. — Л.: Гидрометеиздат, 1981. — С. 197–207.
3. Гендельман М. М. Исследование свободного меандрирования речных русел (на примере нижнего Иртыша) // Геоморфология. — 1988. — № 3. — С. 38–45.
4. Замышляев В. И. Аналитический вывод некоторых морфометрических зависимостей // Вопросы гидрологии суши: докл. конф. молодых ученых и специалистов ГГИ. — Л., 1982. С. 135–142.

УДК 556.536

Н. Б. Барышников,

д-р географ. наук, профессор,
Российский государственный гидрометеорологический университет
(Санкт-Петербург);

А. О. Пагин,

Российский государственный гидрометеорологический университет
(Санкт-Петербург)

ДОННЫЕ НАНОСЫ И ИХ ВЛИЯНИЕ НА УСЛОВИЯ СУДОХОДСТВА

BED LOAD SEDIMENT AND ITS INFLUENCE ON NAVIGATION CONDITIONS

Проведен анализ экспериментальных данных и методов расчетов расходов донных наносов при взаимодействии руслового и пойменного потоков. Установлена необходимость введения поправочных коэффициентов в формулы для расчета расходов донных наносов.

The analysis of experimental data and methods of bed load discharge calculations at the interaction of the channel and floodplain streams is realized. The necessity of correction factor in formulas of bed load discharge calculations is determined.

Ключевые слова: судоходство, расход наносов, транспортирующая способность, типы руслового процесса, скорость течения.

Key words: navigation, sediment discharge, transport ability, types of bed evolution, current velocity

ИЗВЕСТНО [2], что основная масса наносов поступает в речные русла в периоды подъема уровней при пропуске паводков и половодий. Учитывая, что большинство рек России равнинные, высокие паводки на них, как правило, проходят по затопленным поймам. При этом на расходы донных наносов существенное воздействие оказывает так называемый эффект взаимодействия руслового и пойменного потоков. Последний при подъеме уровней и растекании паводочных вод по пойме вызывает увеличение уклонов водной поверхности и средних скоростей руслового потока и как следствие — его транспортирующей способности. При спаде уровней массы воды пойменного потока, поступая в русло, тормозят русловой

поток, уменьшая его скорости и уклоны водной поверхности, а следовательно, и транспортирующую способность руслового потока. Учитывая, что в русла рек в этот период поступает незначительное количество наносов, последняя оказывается больше поступления наносов. Недостающее их количество поток получает за счет размыва гребней перекатов, уменьшая их отметки. В этом, в частности, и проявляется процесс саморегулирования в системе «речной поток–русло».

Сведения о расходах донных наносов крайне необходимы для планирования путевых работ и расчетов размеров судоходных прорезей. К сожалению, как это показал анализ опубликованных работ [1; 4 и др.], точность методов расчетов расходов и сто-

ка донных наносов очень низкая и не соответствует предъявляемым требованиям. Это обусловлено в первую очередь практически полным отсутствием натурных данных о расходах донных наносов, обусловленных несовершенством методов их измерений. Другим существенным недостатком практически всех формул является не учет в них эффекта взаимодействия руслового и пойменного потоков. Для выявления этого эффекта на кафедре гидрометрии Российского государственного гидрометеорологического университета был выполнен ряд экспериментов.

Перед тем как перейти к экспериментам, рассмотрим предварительные выводы. Так, Н. Б. Барышниковым и В. Г. Саликовым [5] разработаны типизации процессов взаимодействия руслового и пойменного потоков, в основу которых положено взаимное расположение динамических осей взаимодействующих потоков. В частности, Н. Б. Барышниковым выделено пять типов (см. рис. 1) для участка, расположенного ниже расчетного створа, но для условий стационарной задачи [2]. Для нестационарных условий установлено [2], что при подъеме уровней, когда наблюдается растекание масс руслового потока по пойме, процесс близок ко второму типу взаимодействия потоков.

При этом поперечные уклоны водной поверхности направлены от руслового потока к пойменному. Отличная картина наблюдается на спаде паводков и половодий, когда массы пойменного потока поступают в русло, тормозя русловую поток. Поперечные уклоны водной поверхности соответственно направлены в сторону руслового потока. Таким образом, процесс близок к третьему типу взаимодействия потоков.

При различных типах руслового процесса наблюдаются периодические повышения или понижения отметок дна русел, особенно резко выраженные на перекатах, или перемещения русел по дну долины, приводящие к размыву или намыву различных участков поймы и пойменных массивов. В то же время остается не выясненным вопрос об изменении транспортирующей способности потока по его длине.

В меженные периоды транспортирующая способность руслового потока мала, но наносы в этот период практически не поступают в русло, поэтому поток, размывая гребни перекатов или берега пойм, увеличивает расход донных наносов, приводя его в соответствие со своей транспортирующей способностью.

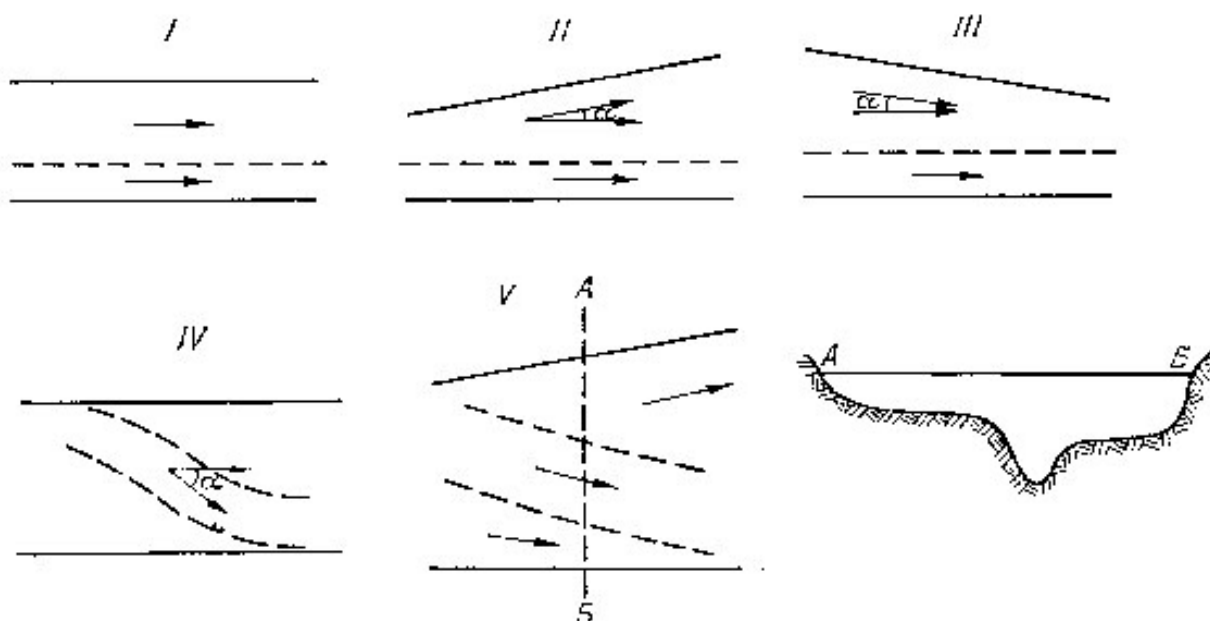


Рис. 1. Схема взаимодействия русловых и пойменных потоков:

I — параллельность осей потоков; II — расходящиеся оси; III — сходящиеся оси;

IV — пересечение осей; V — то же, что и IV, но при разновысотных поймах

К сожалению, отсутствие натурной информации, в частности в системе Росгидромета, приводит к необходимости проведения лабораторных экспериментальных исследований. Учитывая ограниченность натурных данных по этой проблеме, а также высокую стоимость и неопределенность во времени процессов пропусков паводков и половодий по затопленным поймам, за основу был принят метод физического моделирования.

Первые экспериментальные исследования по данной проблеме были проведены в лаборатории ЛГМИ (ныне — РГГМУ) в начале 1960-х гг. под руководством Н. Б. Барышникова. Эксперименты выполнялись в малом гидравлическом лотке с переменным уклоном, длиной 2,8 м и шириной 0,4 м. В этом лотке была смонтирована модель русла с поймой шириной 0,2 м. Глубина русла была 0,05 м. Геометрические оси русла и поймы, а также динамические оси потоков в них были параллельны.

Эксперименты на этой модели проводились по методике, разработанной в РГГМУ, которая заключалась в измерении расходов наносов и других гидравлических параметров руслового потока сначала в условиях его изоляции тонкостенной стеклянной (0,004 м) перегородкой от пойменного потока. Затем эта перегородка удалялась, и измерения повторялись при взаимодействии руслового и пойменного потоков. Основным недостатком данной работы явились малые размеры экспериментальной установки. В частности, ее относительная ширина $B/h < 10$, а это оказывало значительное влияние на трансформацию поля скоростей руслового потока и, что особенно важно, приводило к существенному увеличению донных скоростей при тех же значениях средних скоростей (по сравнению с плоским потоком).

Анализ результатов экспериментов позволил установить, что зависимости расходов донных наносов в русле от глубины ($G_p = f(h_p)$) и от расхода воды ($G_p = f(Q_p)$) под влиянием эффекта взаимодействия потоков отклоняются влево от аналогичных, но в изолированном русловом потоке. Величины этих отклонений тем больше, чем больше шероховатость поймы.

В 2003 г. в РГГМУ были проведены такого же рода эксперименты, но в расширенном диапазоне параметров и в большем по размеру лотке с переменным уклоном.

Размеры установки: длина 6,0 м и ширина 0,6 м. Поверхность поймы шириной 0,35 м и русла шириной 0,25 м выполнены из стекла толщиной 4 мм. В этом лотке были смонтированы русло глубиной 0,05 м и пойма.

Принципиально новым явилось проведение экспериментов при слиянии руслового и пойменного потоков под углом $\alpha = 20^\circ$.

Данные, соответствующие взаимодействующим параллельным потокам, располагаются левее аналогичных для изолированного русла. При этом кривая $G_p = f(v_p)$, так же как кривые $G_p = f(h_p)$ и $G_p = f(Q_p)$, располагается значительно левее кривой для условий изолированного русла. При третьем типе (пойменный поток вторгается в русловую под углом $\alpha = 20^\circ$) его транспортирующая способность уменьшается еще более значительно, и соответственно кривые $G_p = f(h_p)$ и $G_p = f(Q_p)$ располагается значительно левее аналогичных кривых, соответствующих взаимодействующим потокам, но при параллельности их динамических осей.

Эксперименты прошлых лет проводились на установках малых размеров, где существенным было влияние недостаточной длины установок (2,8 и 6,0 м), и не рассматривались случаи расхождения динамических осей потоков. Нами были продолжены работы по изучению эффекта взаимодействия руслового и пойменных потоков и его влияния на транспорт наносов.

Для реализации поставленной задачи была использована русловая площадка в лаборатории водных исследований РГГМУ с постоянным уклоном (размерами 11,0×2,50 м). На этой площадке из бетона была смонтирована модель русла шириной 0,30 м с поймой переменной шириной от 0 до 2,10 м. Глубина русла 0,05 м (до отметки бровки прируслового вала).

По результатам экспериментов были подсчитаны расходы воды, скорости течения и расходы наносов для всех трех створов. По всем этим данным были построены в относительных координатах кривые зависимостей

$G_p/G_{p.б} = f(Q_p/Q_{p.б})$, $G_p/G_{p.б} = f(h_p/h_{p.б})$ и $G_p/G_{p.б} = f(V_p/V_{p.б})$. Здесь G , h , V и Q — соответственно расходы донных наносов, глубины, средние скорости и расходы воды руслового потока; индексы $p.б$ и p соответственно обозначают, что данные параметры получены в русловом потоке при уровнях затопленной бровки прируслового вала ($p.б$) или при более высоких уровнях (p).

Как видно на рис. 2, как при параллельности динамических осей потоков, так и при их схождении под углом 20° и расхождении под углами 5° , 10° , 15° и 20° , наблюдается резко отличное расположение кривых $G_p/G_{p.б} = f(h_p/h_{p.б})$. Действительно, при расходящихся осях потоков кривая $G_p/G_{p.б} = f(h_p/h_{p.б})$ располагается значительно правее аналогичной кривой для изолированного русла.

$$G_p/G_{p.б} = f(h_p/h_{p.б})$$

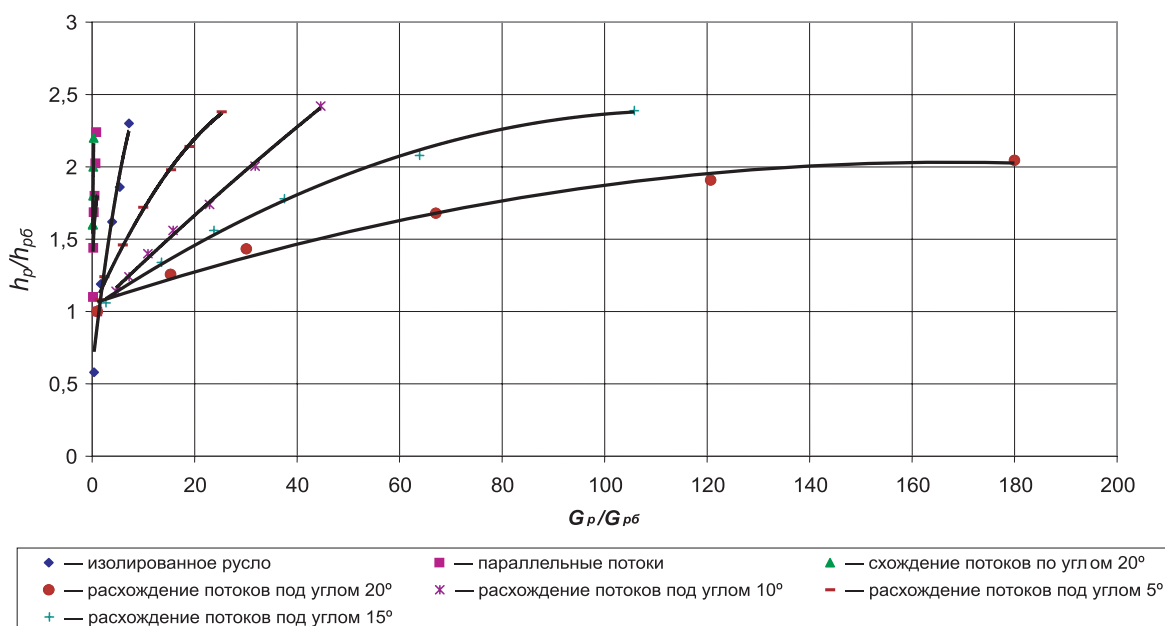


Рис. 2. Зависимость $G_p/G_{p.б} = f(h_p/h_{p.б})$

$$G_p/G_{p.б} = f(Q_p/Q_{p.б})$$

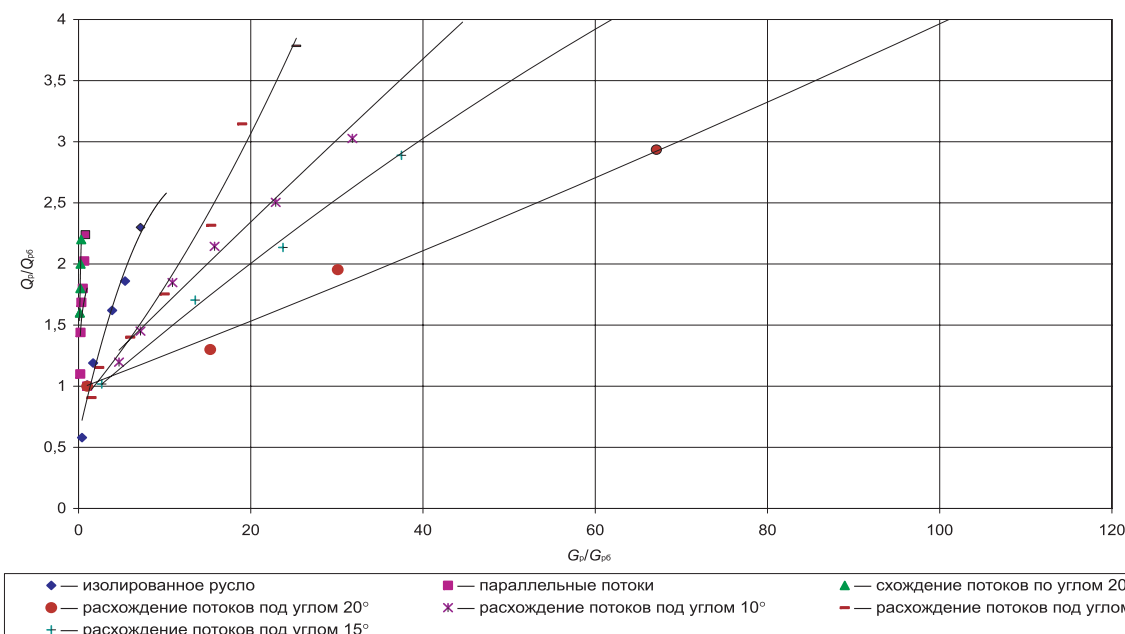


Рис. 3. Зависимости $G_p/G_{p.б} = f(Q_p/Q_{p.б})$

Кривая зависимости $G_p/G_{p.б} = f(h_p/h_{p.б})$ для условий руслового потока, находящегося под воздействием пойменного при схождении их динамических осей под углом 20° , располагается левее аналогичной кривой для изолированного русла. Аналогичное расположение кривых получено и для зависимости вида $G_p/G_{p.б} = f(V_p/V_{p.б})$ и $G_p/G_{p.б} = f(Q_p/Q_{p.б})$. Это объясняется подпором, создаваемым пойменным потоком, и как следствие — уменьшением уклонов водной поверхности, обусловленных воздействием пойменного потока.

Отклонение исходной информации от расчетных кривых не превышает 5 %. Однако, как и в экспериментах прошлых лет, кривые, полученные при условии взаимодействия потоков, существенно отклоняются от расчетной кривой изолированного русла.

Анализ экспериментальных данных, полученных на установках больших размеров, подтверждает выводы о влиянии эффекта взаимодействия потоков на их транспортирующую способность, полученные еще в 1960-х гг. на установках малых размеров. Влияние этого эффекта значительно увеличивается при схождении и расхождении их динамических осей и зависит как от глубины затопления русла и поймы, так и от уклонов водной поверхности.

Вид кривых зависимостей $G_p/G_{p.б} = f(V_p/V_{p.б})$ близок к виду кривых $G_p/G_{p.б} = f(Q_p/Q_{p.б})$ и $G_p/G_{p.б} = f(h_p/h_{p.б})$. Отличие заключается в том, что градиенты скоростей параллельных потоков при взаимодействии существенно меньше, чем при взаимодействии потоков при расхождении их динамических осей. Отметим, что при проведении экспери-

ментов производились измерения не только величин, но и направления скоростей потоков на бровке прируслового вала.

При взаимодействии потоков, при расхождении их осей скорости руслового потока при выходе воды на пойму были более 1 м/с. На рис. 4 показано поле скоростей, где можно наблюдать изменение скоростей в 5 м от оголовка установки. При увеличении скоростей наносы начинали смываться со дна русла, и при их постоянной подаче в русле стали формироваться гряды. В створе, расположенном в 5 м от входа, скорости потока существенно уменьшились из-за того, что значительная часть руслового потока поступила на пойму. Это сопровождалось уменьшением уклонов водной поверхности по длине установки, что привело к интенсивному отложению наносов в русле, (то есть к формированию переката) и перемещению значительной их части на пойму. Последние отлагались на пойме или перемещались по ней в донно-грядовой фазе.

Это подтверждает положение о влиянии эффекта взаимодействия потоков на их транспортирующую способность, полученное еще в 1960-х гг. Влияние этого эффекта особенно велико при расхождении динамических осей потоков.

При растекании воды по пойме наблюдается увеличение расходов наносов в русловом потоке, величина расходов наносов зависит от глубины затопления русла и уклонов водной поверхности.

Если рассматривать конкретную реку, то после расширения поймы, как правило, наблюдается ее сужение. Следовательно, процесс

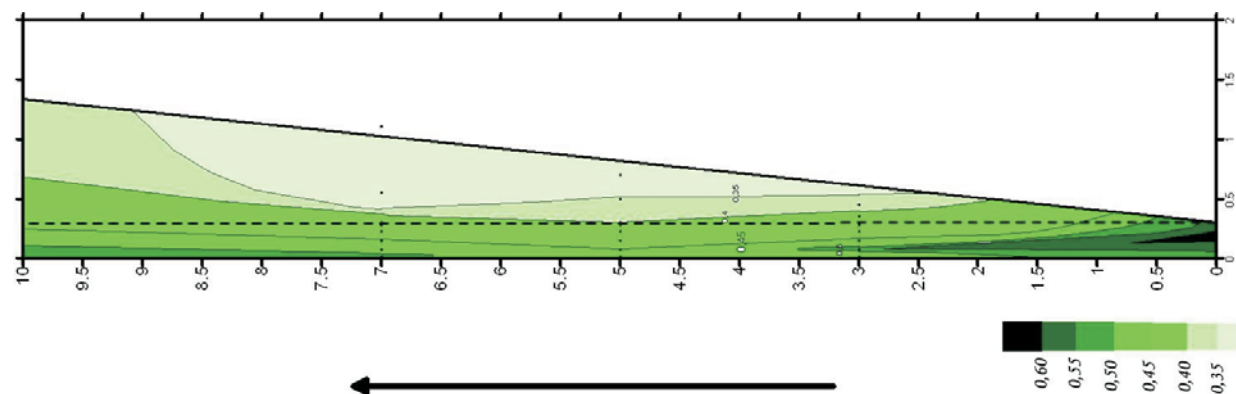


Рис. 4. Поле скоростей при расхождении динамических осей потока под углом 20°

близок к третьему типу взаимодействия потоков, при котором следует ожидать уменьшения транспортирующей способности потока. Лабораторные эксперименты существенно отличаются от натурных условий. В природных условиях вода выходит на пойму при паводках и половодьях, когда наблюдается либо постоянное увеличение расходов воды (при подъеме уровней), либо их уменьшение (при спаде). В лабораторных же условиях на установку поступает постоянный расход воды, поэтому можно наблюдать только отдельные фрагменты формирования русла, а полный цикл при подъеме и спаде уровня отсутствует.

Как указывалось, скорости по длине руслового потока существенно уменьшались. Это привело к отложению наносов в русле и формированию в нем переката на расстоянии 5 м от входа на установку. Более того, часть наносов из русла стала поступать на пойму. Как видно на рис. 5, наносы по пойме в основном перемещались в виде донных гряд.



Рис. 5. Движение донных наносов по пойме в донно-грядовой форме

В естественных условиях, как показали исследования З. М. Великановой и Н. А. Ярных на р. Оби у г. Барнаула [3], при изгибе русла р. Оби у г. Барнаула под углом, близким к 90° , и продолжительном половодье русло реки было полностью заполнено донными наносами, и они через прорвы стали поступать на пойму, перемещаясь по ней в виде донных гряд. При этом зафиксировано довольно четкое уменьшение крупности отложившихся на пойме наносов по мере удаления от бровки прируслового вала.

Следует отметить, что попытка оценки эффективности расчетных формул на основе данных экспериментов не привела к успеху. Погрешности расчетов при взаимодействии потоков практически по всем исследованным формулам (около 20) существенно превышали допустимые пределы (100 % и более).

За последнее время проведены эксперименты при третьем типе взаимодействия руслового и пойменного потока (рис. 1), где углы $\alpha = 20^\circ$ и 10° . Следует отметить, что эффект взаимодействия руслового и пойменного потоков является составляющей процесса саморегулирования в системе «бассейн–речной поток–русло». При спаде уровней, когда в русла рек направляются пойменные воды, тормозящие русловой поток, процесс близок к третьему типу взаимодействия потоков, при котором уклоны водной поверхности и скорости руслового потока уменьшаются, также уменьшается и пропускная способность русла.

Проведенный анализ результатов экспериментов позволяет сделать следующие выводы:

— при 3-м типе взаимодействия руслового и пойменного потоков наблюдается резкое снижение скоростей руслового потока. Учитывая, что большинство методов расчетов расходов донных наносов, приме-

няемых в России, основаны на зависимостях

вида $G = \alpha \left(\frac{V}{V_k} \right)^{m-1} (V - V_k)$, даже небольшое

уменьшение скорости руслового потока вызывает значительное уменьшение его транспортирующей способности;

— анализ результатов экспериментальных исследований показал, что при 3-м типе взаимодействия потоков наблюдается уменьшение транспортирующей способности руслового потока в десятки раз по сравнению с изолированным руслом;

— такое положение соответствует принципу саморегулирующейся системы «речной поток–русло». Действительно, процесс аналогичный 3-му типу взаимодействия руслового и пойменного потоков в натурных условиях наблюдается при спаде паводков и половодий, то есть в периоды, когда в русла

рек поступает минимальное количество наносов. Поток таким образом перестраивает свою структуру, что приводит в соответствие поступление наносов с его транспортирующей способностью.

Таким образом, процесс саморегулирования в системе «речной поток–русло» снижает максимальные расходы и увеличивает продолжительность процесса пропуска паводков и половодий [1].

Учитывая, что основной задачей исследования являются расходы и сток донных наносов, исключительно важным является оценка воздействия на них эффекта взаимо-

действия потоков в периоды пропуска паводков и половодий по затопленным поймам.

По-видимому, для разработки расчетной методики для паводочного периода необходимо перейти к системному анализу, рассматривая систему «бассейн–речной поток–русло» как саморегулирующуюся.

В целом натурные данные подтверждают концепцию РГГМУ о существенном увеличении транспортирующей способности руслового потока под воздействием пойменного потока при втором типе их взаимодействия и значительного снижения расходов наносов при третьем типе взаимодействия потоков.

Список литературы

1. Барышников Н. Б. Динамика русловых потоков. — СПб.: Изд-во РГГМУ, 2007. — 314 с.
2. Барышников Н. Б. Морфология, гидрология и гидравлика пойм. — Л.: Гидрометеиздат, 1984. — 280 с.
3. Великанов З. М., Ярных Н. А. Натурные исследования гидравлики пойменного массива в высокое половодье // Тр. ГГИ. — Л.: Гидрометеиздат, 1970. — Вып. 183. — С. 33–53.
4. Копалиани З. Д., Костюченко А. А. Расчеты расхода донных наносов в реках // Сборник работ по гидрологии. — СПб.: Изд-во Гидрометеиздат, 2004. — № 27. С. 25–40.
5. Саликов В. Г. Некоторые исследования взаимодействия руслового и пойменного потоков // Тр. IV Всесоюз. гидрол. съезда. — Л.: Гидрометеиздат, 1976. — Т. 11. — С. 75–81.

УДК 502.7

В. И. Антроповский,
д-р техн. наук, профессор,
СПГУВК;

О. А. Шелухина,
СПГУВК

НЕКОТОРЫЕ ИТОГИ ОЦЕНКИ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ И ГИДРОМОРФОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК РЕК ЛЕВОБЕРЕЖЬЯ СРЕДНЕЙ ВОЛГИ

SOME RESULTS OF THE EVALUATION OF ECOLOGICAL STATE AND HYDRO MORPHOLOGICAL CHARACTERISTICS OF RIVERS ON THE MIDDLE VOLGA LEFT BANK

В настоящей статье по материалам проведенных исследований приводятся результаты оценки экологического состояния рек левобережья средней Волги. Выявлены факторы экологической напряженности. Выполнен анализ гидроморфологических характеристик данной совокупности речных потоков.

The article gives the results of evaluation of rivers ecological state on the middle Volga left-bank as a result of investigations. The factors of ecological tensy are discovered. The analysis of hydro-morphological characteristics of rivers flow aggregate is carried out.

Ключевые слова: реформирования русел, экологическое состояние, руслообразующие факторы, речные русла, русловой процесс.

Key words: channels reformation, ecological state, bed-formation factor, river channels, bed evolution.

1. Результаты исследований русловых процессов являются основополагающими для выяснения экологического состояния рек и направленности изменения этого состояния в случае нарушения динамического равновесия [1]. Природные факторы, определяющие экологическое состояние рек и формирование типов русловых процессов, практически одни и те же. Изменение русел и пойм одновременно означает и изменение экологического состояния рек. Прогнозирование русловых процессов одновременно содержит и элементы прогноза экологического состояния рек.

2. Естественные реки, как правило, находятся в состоянии, близком к состоянию динамического равновесия. Это справедливо в той же мере, в какой можно считать устойчивыми водный режим и сток наносов (а следовательно, и характер переотложения наносов). При динамическом равновесии деформации являются обратимыми и прогнозы могут составляться по ранее наблюдавшимся тенденциям, в условиях сложившегося многолетнего режима жидкого и твердого стока. При этом предполагается сохранение средних гидрологических и гидравлических условий и в будущем [2].

3. Русловой процесс является составной частью развития географической среды [3; 4]. Каждому ландшафту присущ особый водный режим и характер гидрографической сети. С изменением географического ландшафта (например, вследствие потепления климата) изменится и гидрографический облик территории. Существует и обратная связь, так как водный фактор сам по себе играет первостепенную ландшафтообразующую роль. Этим, в частности, объясняется и необходимость дифференцированного подхода при прогнозировании русловых переформирований — рассмотрении рек с учетом особенностей природной среды. Находит проявление положение [4], что гидравлика потока и русловые

формы (русловой процесс) в различных природных условиях связаны неоднозначно. Исследование генетической связи типов руслового процесса с природной средой становится особенно важным в связи с необходимостью их прогнозирования в случае изменения природной среды под влиянием хозяйственной деятельности человека. Характер и степень преобразований конкретных рек при одинаковом изменении климатических условий определяется их состоянием в естественных условиях и, конечно, влиянием хозяйственной деятельности.

4. Преобладающее влияние на создание экологической напряженности на реках левобережья средней Волги оказывают природные факторы. Наиболее важными из них являются [1] геолого-геоморфологическое строение речных долин и неблагоприятные (опасные) проявления гидрологического режима (в том числе особенностей стока воды, наносов, ледовых явлений и русловых переформирований). Проявления гидрологического и руслового режимов являются активными факторами. В первом случае это прохождение половодий редкой обеспеченности, сопровождающихся заторами льда, а также уменьшение водности малых притоков в период зимней и летней межени. Во втором — плановые деформации русел и движение аллювиальных гряд.

5. Наибольшее влияние на повышение экологической напряженности из антропогенных факторов оказывают механические изменения русел и пойм (особенно разработка русловых карьеров, вызывающая значительные изменения в рельефе русел и посадку уровня воды); уменьшение водности рек вследствие водозабора; усиление эрозии и заиление рек (особенно малых притоков) из-за сведения лесов, несоблюдения водоохранных зон и защитных полос, а местами и увеличение распашки склонов пойменных массивов.

Размыв и движение форм руслового рельефа представляют опасность для населенных пунктов, промышленных объектов и культурно-исторических памятников, находящихся на берегах рек. Под угрозой находятся объекты промышленных предприятий.

Необходимо также отметить загрязнение вод ядовитыми веществами. Важной проблемой на данный момент является проектирование переходов нефте- и газопроводов через реки, а также оценка состояния существующих переходов. При их эксплуатации необходимо учитывать природные и антропогенные предпосылки. В противном случае экономическая выгода может обратиться экологической катастрофой. При прокладке вновь проектируемых переходов нефте- и газопроводов рекомендуется использовать уже применяющийся в настоящее время метод наклонно-направленного бурения.

По причине снижения объемов дноуглубительных и выправительных работ на всех исследуемых реках происходит обмеление перекатов, что крайне неблагоприятно сказывается на судоходстве и санитарно-эпидемиологической обстановке, а также возрастает риск наводнений.

6. На основе составленной карты типов речных русел левобережья верхней и средней Волги [5] и анализа распространения морфологически однородных (бесприточных с определенным типом русловых процессов) участков рек можно заключить, что здесь преобладает свободное меандрирование. В пределах левобережья верхней Волги (выше г. Рыбинска) из рассмотренных 223 участков рек почти 50 % являются свободноеандрирующими. Примерно 20 % с ограниченным меандрированием и остальное составляют реки с врезанным руслом.

В пределах левобережья средней Волги (ниже г. Рыбинска) из 500 рассмотренных участков свободноеандрирующие реки составляют 64 %, 18 % — реки с ограниченным меандрированием и остальное в основном приходится на реки с врезанным руслом. Из 20 участков, выделенных на самой Волге, только на двух (ниже г. Ярославля и в зоне выклинивания подпора Чебоксарского водохранилища — выше устья Керженца) наблюда-

ется русловая многорукавность. На остальном протяжении русло врезанное, причем на двух третях участков — относительно прямое (часто с наличием ленточных гряд или побочней), а на одной трети — извилистое (врезанные излучины).

Интересно, что число участков со свободным меандрированием в пределах левобережья средней Волги примерно на 14 % больше, чем в верхней части бассейна Волги. Зато количество участков рек с врезанным прямым руслом меньше на 12 %. Свободное меандрирование характерно для рек, протекающих в пределах низменностей (Кострома, Унжа, Ветлуга, Вятка и др.). Многие из этих рек меандрируют на всем протяжении.

Ограниченное меандрирование наблюдается в узких долинах, склоны которых препятствуют значительным плановым перемещениям русла. Оно отмечается на реках: Медведица, Кема и др.

7. Средняя скорость плановых деформаций на меандрирующих реках рассматриваемой территории может составлять несколько метров в год, а максимальная — 10–15 м/год. На средней Волге до создания ГЭС, по данным Н. И. Маккавеева, скорость сползания излучин составляла 6–12 м/год. Е. В. Шанцер определял скорость смещения русла Волги на участке ниже г. Ульяновска для тех же условий равной 14–60 м/год.

Вогнутые берега в среднем течении р. Мологи размываются со скоростью от 0,5 (глинистые, суглинистые) до 5 м/год. Размывы пойменных берегов р. Унжи на участке ниже впадения р. Неи происходят со скоростью 2–3 м/год. Размывы вогнутых пойменных берегов на излучинах р. Ветлуги возрастают вниз по течению от 2 до 10 м/год. Колебания отметок дна р. Ветлуги на участке: пгт Ветлужский — устье составляют 0,7 м.

По данным Г. Г. Месерянского (1994), средняя скорость размыва вогнутых песчаных берегов свободноеандрирующих излучин р. Керженец в нижнем течении составляет 3–6 м/год. Высотные деформации в створе перехода трубопроводов (в 19 км выше устья) могут достигать 2,0–2,5 м. Вогнутые берега излучин Вятки и Чепцы в верхнем течении, сложенные песчаными наносами, по данным

В. Ф. Николаева (1993), размываются со скоростью до 50 м/год, а на участке пересечения рекой Вятских Увалов — со скоростью до 10 м/год. Размыв пойменных берегов Вятки ниже Увалов происходит со средней скоростью 5–6, а максимально — 20 м/год. Понижения дна до 4,5 м на участке ниже Симоновского водного узла и до 3 м в Заводской воложке, выделяющиеся на совмещенных профилях русла 1976 и 1992 гг., являются следствием преимущественно добычи строительных материалов и дноуглубительных работ.

8. В последние 20–25 лет прошлого века на территории России отчетливо обозначился процесс глобального потепления климата, произошли коренные изменения в масштабах использования речных вод [6]. При этом воздействие климатических факторов на водные ресурсы и водный режим проявлялось как непосредственно в результате процессов гидрологического цикла, так и косвенно за счет влияния на формирование потерь стока при его хозяйственном использовании. В результате годовой сток рек на преобладающей территории страны превысил норму и наблюдается существенное увеличение водности в периоды зимней и летне-осенней межени, что привело к значительному увеличению естественной зарегулированности стока, по масштабу сопоставимому с влиянием водохранилищ сезонного регулирования. Стратегия по адаптации водохозяйственного комплекса страны к предстоящим гидроклиматическим условиям, по мнению ученых ГГИ, должна разрабатываться на основе данных о фактически наблюдающихся современных изменениях водного режима и результатов сценарных оценок. В соответствии с имеющимися оценками международной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК, 2001) уже в первой половине XXI столетия возможны существенные изменения климатических условий в результате дальнейшего роста концентрации парниковых газов в атмосфере. В качестве возможных климатических условий будущего использовались климатические сценарии, полученные с использованием моделей общей циркуляции атмосферы — МОЦА (ECHAM 4, GFDL-R₁₅, CGCM 1, HadCM 2, HadCM 3), а также сценарий, разрабо-

танный в ГГИ на основе палеоклиматических реконструкций. Естественным продолжением сценарных исследований водности являются работы по оценке возможных изменений характера русловых процессов и значений конкретных характеристик рек. Оценки ГГИ возможных изменений водного режима рек под влиянием естественных и антропогенных факторов приняты в данной работе в качестве основы при составлении фонового прогноза русловых переформирований рассматриваемых рек.

9. В условиях потепления климата происходит изменение активных факторов руслообразования (стока воды и наносов) и как следствие — нарушение динамического равновесия. Возникает необратимый процесс, заключающийся в развитии реки (ее качественной перестройке). Происходит преобразование морфологического строения русла и поймы, возвращающее реку в состояние динамического равновесия. Количественные или качественные изменения в русловом процессе, вызванные нарушением естественного водного режима, могут распространяться на большие расстояния и охватывать целые речные системы. В этих условиях прогноз может быть лишь фоновым, то есть определяющим только осредненные характеристики морфологических процессов. Прежде всего производится оценка возможности изменения типа руслового процесса, неизбежно возникающая вследствие изменений, определяющих процесс факторов. В основу прогноза положены закономерности, связывающие русловый процесс с определяющими его факторами, — так называемые критериальные зависимости, характеризующие условия перехода одного типа русла в другой [2].

10. Обычно при составлении фоновых прогнозов русловых переформирований и в критериальных зависимостях в качестве расчетных используются средние максимальные расходы воды за многолетний период. Однако для условий потепления климата об этих расходах пока нет достаточно надежных сведений. Вместо них в данной работе использованы средние годовые расходы воды за многолетний период (то есть расходы, характеризующие норму стока). Модификация

зависимостей (эмпирических формул), используемых в данном случае при прогнозировании количественных характеристик рек, как раз и выразилась в замене указанных расходов. Основанием для такой замены является то, что преобладающим типом руслового процесса рассматриваемых рек является свободное меандрирование. При свободном же меандрировании на эпюрах руслоформирующих расходов воды обычно как раз и имеет-ся два максимума значения, которые примерно одного порядка с указанными средними из максимальных годовых и средними годовыми расходами воды за многолетие. И вполне естественным представляется, что если нельзя использовать в качестве расчетного один из них, то наиболее обоснованным является использование другого.

11. Критериальный график с использованием в качестве расчетного среднего годового расхода за многолетний период $Q_{ср.г.}$ и уклона дна долины I_0 в относительном виде (в долях единицы) представлен двумя критериальными зависимостями, характеризующими условия перехода руслового процесса из одного типа в другой: а) для линии, разграничивающей участки с незавершенным меандрированием и многорукавные русла: $I_0 = 0,210 \cdot Q_{ср.г.}^{-1,00}$; б) для линии, разграничивающей участки с незавершенным и свободным меандрированием: $I_0 = 0,060 \cdot Q_{ср.г.}^{-1,00}$. Результаты оценки показали, что полученный критериальный график может использоваться для приближенного определения типа руслового процесса в случаях существенного изменения гидрологического и руслового режимов рек (вероятность попадания точек в зону русел со свободным меандрированием равна $P = 93 \%$ при средней квадратической ошибке $\sigma = 0,03$).

12. В связи с изменением водности и гидрологического режима рек вследствие глобального потепления климата увеличивается вероятность изменения руслового режима (типа русловых процессов и соответственно схемы деформаций), морфометрических и гидравлических характеристик рек, что необходимо учитывать при перспективном планировании целого ряда отраслей хозяйства страны.

В процессе исследований рек левобережья средней Волги выяснилось, что типы речных русел (русловых процессов) оказываются относительно устойчивыми и для абсолютного большинства рассматриваемых рек сохраняются даже при увеличении их годового стока на 35 %. Из 19 участков свободно-меандрирующих рек только на трех возможно появление признаков незавершенного меандрирования (да и то одним из них является р. Вычегда у с. Малая Кужба, относящаяся к другому бассейну).

Для определения типа русловых процессов в условиях потепления климата использовался также метод Н. А. Ржаницына и Е. К. Рабковой. Совмещение модельных гидрографов с «единичными гидрографами», свойственными рекам с определенным типом русловых процессов, в целом подтверждает результаты, полученные с использованием критериального графика. Однако все же приходится признать результаты, полученные вторым методом, менее определенными и надежными. Одной из причин этого является отсутствие надежных прогнозов максимальных расходов воды.

13. В случае уменьшения максимального стока на рассматриваемых реках можно ожидать отмирания мелких пойменных протоков, уменьшения числа осередков, островов и их подвижности, концентрации стока в главном рукаве и усилении его меандрирования. Поймы меандрирующих рек будут затопливаться реже, что должно отразиться на размерах и форме излучин. Увеличение зарегулированности стока вследствие выравнивания его в году способствует превращению рек в канализованные с меньшей извилистостью в плане.

14. Изменению подвержены морфометрические и гидравлические характеристики рек. Наиболее чутко на изменение водности рек реагирует ширина русел рек [2]. Сток воды с поверхности бассейна служит главным фактором, от которого зависят поперечные размеры речного потока [7]. Если грунты и уклон долины фиксированы, то поперечные размеры потока (размеры русла) полностью определяются стоком. В тех случаях, когда норма стока и другие его статистичес-

кие характеристики в течение длительного периода не изменяются, говорят, что сток статистически устойчив. При статистически устойчивом стоке делается статистически устойчивым и речной поток: математические ожидания и дисперсии его элементов сохраняются. Очевидно это относится и к руслу реки. Испытывая местные знакопеременные деформации, русло статистически устойчивого потока сохраняет без изменения математические ожидания и дисперсии своих главных размеров.

Основным способом определения ширины в условиях потепления климата является способ, базирующийся на использовании модифицированной формулы С. Т. Алтунина. Результаты такого определения свидетельствуют об увеличении ширины в бровках русла. В связи с этим следует ожидать и увеличения шага излучины меандрирующих рек и интенсивности плановых деформаций, которые тесно связаны с шириной. Это подтверждается результатами определения указанных характеристик с использованием графиков (связей) И. В. Попова [8].

15. Для определения высотных деформаций (средних глубин) русел рек нашли применение формулы, структура которых предложена Г. В. Железняковым и К. В. Гришаниным. Естественно, что с увеличением средних годовых расходов воды увеличиваются и глубины. Однако на них влияют и русловые переформирования.

16. Определение средних годовых расходов взвешенных наносов с увеличением среднего годового стока воды выполнено при допущении о незначительном изменении средней многолетней мутности в условиях потепления. В пользу указанного допущения свидетельствует отсутствие достаточно выраженной зависимости мутности с увеличением расходов воды. О донных (влекомых) наносах рассматриваемых рек можно судить по соотношению их со взвешенными наносами. Так в работе [9] в бассейне Волги по доле стока влекомых наносов в общем их объеме ($W_g / W_{\text{общ.}}, \%$) выделено три группы районов: 1 — < 25; 2 — 25–50; 3 — > 50.

Левобережные притоки верхней и средней Волги (выше г. Казани) относятся к третьей

из указанных групп. Река Меша и нижнее течение рек Кама и Вятка с притоками принадлежат к первой группе. Поскольку изменения климата происходят постепенно и речные бассейны, как правило, успевают адаптироваться к ним, можно предположить, что и указанные соотношения изменятся не сильно.

17. С увеличением модулей годового стока воды в условиях потепления климата увеличивается крупность донных отложений наносов в реках, что установлено по соответствующим связям, построенным для выделенных гидрологических районов.

18. Как известно, саморегулирующиеся речные системы способны путем внутренней перестройки продолжать выполнение своих функций при некоторых (ограниченных) изменениях внешних условий, в которых они развиваются. Учитывая, что изменения климата вследствие антропогенного воздействия происходят постепенно, рассматриваемая система, как правило, успевает адаптироваться к ним. Примерно такое же положение с антропогенным воздействием и на бассейн отдельной реки. Для предотвращения и сведения до минимума неблагоприятных последствий деформаций русел рассматриваемых рек и прохождения половодий, сопровождающихся заторами льда рекомендуется [1]:

— при проектировании сооружений выбирать оптимальные места размещения, выполнять основные требования к их конструкции, разрабатывать меры защиты и соблюдать требования экологической безопасности;

— составлять детальные прогнозы русловых деформаций на участках рек, где находятся промышленные и социальные объекты, по мере необходимости производить берегоукрепительные работы;

— для контроля фактического экологического состояния рек территории необходимо проводить гидроморфологический мониторинг, включающий наблюдения за рекой, ее долиной, поймой и руслом. Разработка и реализация программы наблюдений мониторинга позволит получать данные о состоянии рек на текущий момент, а также разрабатывать пути стабилизации экологической обстановки.

Список литературы

1. Денисова И. В., Шелухина О. А. Природные и антропогенные факторы экологической напряженности на реках // География и смежные науки. Герценовские чтения. — СПб., 2003. — С. 10–13.
2. Антроповский В. И. Гидролого-морфологические закономерности и фоновые прогнозы переформирования русел рек. — СПб.: Кристмас+, 2006. — 216 с.
3. Глушков В. Г. Морфология речного русла // Тр. I Всерос. гидрологического съезда. — Л., 1925. — С. 286–290.
4. Маккавеев Н. И. Русло реки и эрозия в ее бассейне. — М.: Изд-во АН СССР, 1955. — 347 с.
5. Антроповский В. И., Шелухина О. А. Морфология и деформация реки Волги (в верхнем и среднем течении) и ее левобережных притоков // Вестник ф-та географии. — СПб., 2005. — Вып. 5. — С. 42–53.
6. Георгиевский В. Ю. Изменение стока рек России и водного баланса Каспийского моря под влиянием хозяйственной деятельности и глобального потепления: автореф. дис. ... д-ра географ. наук. — СПб.: ГГИ, 2005. — 39 с.
7. Гришанин К. В. Динамика русловых потоков. — Л.: Гидрометеиздат, 1974. — 311 с.
8. Попов И. В. Деформации речных русел и гидротехническое строительство. — Л.: Гидрометеиздат, 1969. — 364 с.
9. Чалов Р. С., Штанкова Н. Н. Сток наносов, руслоформирующие расходы воды и морфодинамические типы русел рек бассейна Камы // Вопросы физической географии и геоэкологии Урала: межвуз. сб. науч. тр. / Пермский университет. — Пермь, 2000. — С. 99–116.

УДК 556.536

В. П. Зимичев,

канд. географ. наук, ст. науч. сотр.,
Арктический и антарктический научно-исследовательский институт
(Санкт-Петербург)

ОЦЕНКА РЕЖИМА ТВЕРДОГО СТОКА НА МАЛОИЗУЧЕННЫХ РЕЧНЫХ БАССЕЙНАХ ЦЕНТРАЛЬНОГО ТАЙМЫРА

THE ASSESSMENT OF SEDIMENT FLOW REGIMES ON INSUFFICIENTLY KNOWN RIVER BASINS OF THE CENTRAL TAIMYR

Дается характеристика гидрологических и седиментационных процессов в наиболее типичных речных и озерно-речных системах Центрального Таймыра, входящих в водосборный бассейн р. Нижней Таймыры. Приводится количественная оценка перераспределения взвешенных наносов в рассматриваемой русловой системе.

The assessment of hydrological and sediment processes in the most typical river and lake systems of the Central Taimyr affiliation in the river basin of the Nizhnyaya Taimyra River is proposed. The quantitative assessment on the suspended sediment redistribution in this river system is presented.

Ключевые слова: твердый сток, расход воды, горные реки, взвешенные наносы.

Key words: flow of solid matter, water discharge, mountain rivers, suspended sediments.

БАСЕЙН Нижней Таймыры включает несколько типов ландшафтных комплексов, по-разному влияющих на генезис и динамику переноса терригенного материала, как на транзитных участках, так и при приближении к замыкающему створу реки. Гидрографическая схема речной сети бассейна Нижней Таймыры с выделенными участками наблюдений представлена на рис. 1. Значительная часть стока в озеро Таймыр формируется на водосборных бассейнах горного массива Бырранга. Восточный район средневысотной части гор Бырранга — это бассейн реки Бикады. Центральный район низкогорной части Бырранга формирует сток в верховьях и левобережных притоках Верхней Таймыры. В общей сложности на горный ландшафт приходится около 50 % водосборного бассейна озера Таймыр.

Водные системы горного Таймыра к настоящему времени остались по-прежнему не изучены. В 1990-х гг. проводились специальные натурные наблюдения за режимом водно-балансовых характеристик в озерно-речных

системах Бырранга [1]. Выявлено, что всего 2–3 % переносимых русловой сетью взвешенных наносов покидают границы водосборного бассейна, остальная масса наносов осаждается в озерных котловинах горного массива.

Зависимость твердого стока от расходов воды в реках Бырранга довольно неустойчива, несмотря на очень хорошие связи $Q(H)$. Это можно объяснить тем, что эти водотоки протекают в неаллювиальных породах — галечных накоплениях конусов выноса со склонов долин. Такой материал не может транспортироваться рекой в нормальном режиме. Наличие в потоке взвешенных наносов во многом определяется локальными размывами берегов, сложенных торфяными массами. В этих случаях, как правило, не наблюдается устойчивой связи между твердым и жидким стоком.

В зарегулированных озерами водотоках расходы взвешенных наносов имеют довольно устойчивые небольшие величины — в пределах 0,005–0,04 кг/с. В последние декады перед замерзанием водотока и в период, когда

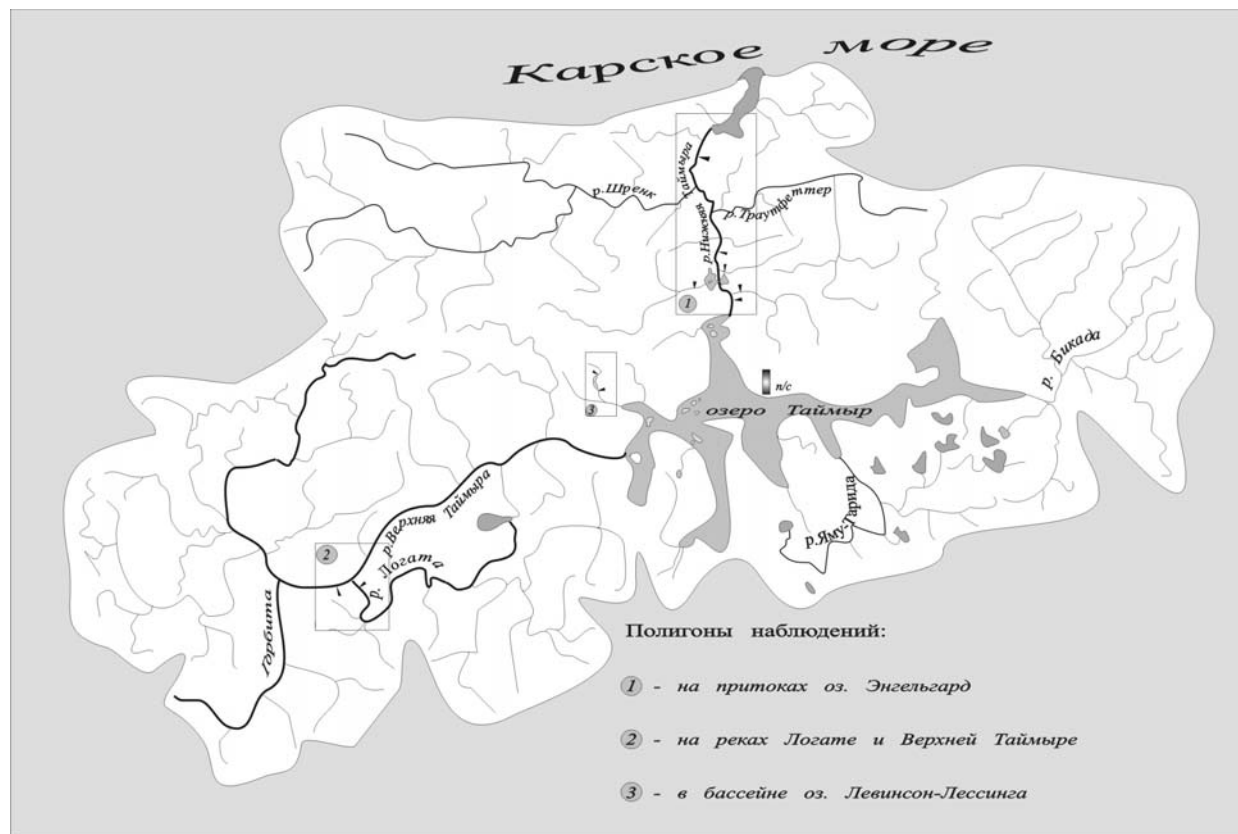


Рис. 1. Гидрографическая схема бассейна р. Нижней Таймыры

озеро в основном покрыто льдом, значения твердого стока уменьшаются на порядок. На основании материалов натурных наблюдений можно сделать следующие выводы об особенностях и закономерностях водной динамики горных озерно-речных систем Таймыра:

1. Поверхностный сток в озерную систему осуществляется в довольно короткий промежуток времени — немногим более трех месяцев.

2. Режим стока на впадающих в озеро водотоках имеет четко выраженную внутрисуточную динамику. Сток зарегулированного водотока, вытекающего из озера, подчиняется главным образом сезонным факторам.

3. Режим твердого стока носит более случайный характер, так как определяется преимущественно присутствием взвешенного материала в потоке. Влекомые наносы практически полностью отсутствуют.

4. Режим твердого стока на незарегулированных горных реках Таймыра преимущественно определяется факторами синоптического масштаба.

Гидрологическая изученность рек бассейна Верхней Таймыры и ее основных притоков весьма ограничена [2]. Особое внимание при проведении исследований на этих реках уделялось наблюдениям за уровнем режимом, стоком воды и наносов [3; 4; 5].

Кривые $R(H)$ и $Q(R)$ по характеру и форме повторяют кривую $Q(H)$. Для Верхней Таймыры такие зависимости также повторяют тип кривой $Q(H)$, но здесь наибольшие расходы твердого стока смещены вправо. Устойчивость связей $Q(R)$ говорит о том, что расходы взвешенных наносов в значительной степени определяются транспортирующей способностью потока, а не количеством поступающего в реку терригенного материала.

Суммарный сток взвешенных наносов в р. Логате за период наблюдений составил более 732 тыс. т, а сток наносов в Верхней Таймыре — более 800 тыс. т, то есть практически сопоставим со стоком наносов р. Логаты при существенном различии в объемах стока воды.

Характер и динамика твердого и жидкого стока в реках определяют режим русловых деформаций. Преимущественно на всем

протяжении р. Верхней Таймыры, русловой процесс определяется как ленточно-грядовая форма транспорта влекомых наносов. Ниже впадения р. Логаты у Верхней Таймыры практически больше нет крупных притоков, способных существенно изменить сток этой реки. Если суммарный сток по створам наблюдений сравнить со стоком половодного периода зарегулированной Нижней Таймыры по замыкающему створу в районе Зеленых Яров, то можно в первом приближении оценить долю притока Верхней Таймыры.

Суммарный сток Нижней Таймыры со стоком Шренка и Траутфеттера составляет величину около 33 км³ в год, причем на половодный период приходится около 23 км³. Реки Шренк и Траутфеттер дают соответственно около 25 и 7 % стока Нижней Таймыры. Суммарный сток Верхней Таймыры ниже впадения р. Логаты, по данным измерений [4], составляет около 13 км³, то есть более 50 % половодного стока Нижней Таймыры и около 40 % от ее годового стока. При этом остается еще неучтенной приходящая составляющая остальных притоков. Для ее оценки в первом приближении водотоки с характерными ландшафтообразующими признаками были использованы в качестве рек-аналогов. Твердый сток Нижней Таймыры в створе Зеленые Яры имеет величину порядка 500 тыс. т/год [2]. Сток взвешенных наносов Верхней Таймыры в среднем течении составил более 1 млн 6 тыс. т, а сток наносов остальной части водотоков, впадающих в озеро, составил около 1 млн 3 тыс. т [3; 4]. Таким образом, основная масса наносов (около 2,5 млн т), поступающая в озеро Таймыр, осаждается в нем. И лишь от 3 до 7 % в зависимости от фазы гидрологического режима и синоптической обстановки на акватории озера переносятся в исток Нижней Таймыры.

Значения твердых расходов в Нижней Таймыре довольно стабильны. Они имеют величины порядка 20–50 кг/с, не зависят от величины жидкого стока и увеличиваются примерно в 2–3 раза преимущественно в периоды штормов на оз. Таймыр.

Твердый сток Нижней Таймыры оценивался по створу Зеленые Яры, то есть включал в себя приточные составляющие р. Шренка и

Траутфеттера. При сопоставлении данных по твердому стоку реки Нижней Таймыры в створах выше оз. Энгельгардт и у Зеленых Яров в разные фазы открытого русла получены их количественные соотношения [1]. В начальной и пиковой фазах половодья доля взвешенных наносов, поступающих в верховья Нижней Таймыры, составляет 10–15 % от общего объема твердого стока в Зеленых Ярах. То

есть около 90 % наносов в замыкающий створ Нижней Таймыры попадают с приточной составляющей лишь в нижнем течении реки. В меженный период эта доля притока наносов уменьшается до 70 %.

Таким образом, основным фактором, определяющим объемы поступления наносов в дельту Нижней Таймыры, является регулирующая роль озера Таймыр.

Список литературы

1. Материалы экспедиционных исследований на Таймырском полуострове по программе российско-германского сотрудничества. LAPEX-93. Гидрологические и лимнологические исследования. — СПб.: Гидрометеиздат, 1994. — С. 19–23, 29–36.
2. Таймыро-Североземельская область. Физико-географическая характеристика. — Л.: Гидрометеиздат, 1970. — 374 с.
3. Зимичев В. П. Оценка гидрологического режима слабоизученных водосборных бассейнов полуострова Таймыр // Тез. док. VI Всерос. гидрологического съезда. — СПб., 2004. — С. 115–116.
4. Zimichev V. P. Hydrological observations at the Upper Taymyra and Logata rivers. Bericht sur Polarforschung // Reports on Polar Research. — 1996. — № 211. — P. 96–108.
5. Bolshiyakov D. Yu., Zimichev V. P., Gintz D. The features of the Hydrological Regime of the Lake-River Systems of the Byrranga Mountains (by the Example of the Levinson-Lessing Lake) // Land-Ocean Systems in the Siberian Arctic: Dynamics and History. — Berlin: Springer-Verlag, 1999. — P. 353–360.

УДК 627.42

С. В. Боровков,
канд. техн. наук,
ЗАО «Ленгипроречтранс»
(Санкт-Петербург)

ИНЖЕНЕРНОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ РУСЛА РЕКИ ИРТЫШ В РАЙОНЕ Г. ХАНТЫ-МАНСИЙСКА

ENGINEERING ADJUSTMENT OF THE IRTYSH RIVER CHANNEL NEAR KHANTY-MANSIYSK

В настоящей статье изложена проблема негативного развития руслового процесса на р. Иртыш в районе г. Ханты-Мансийска и предложены пути ее решения.

The problem of the negative channel process development on the Irtysh River near Khanty-Mansiysk is set out in the paper. And the solution of this problem is proposed.

Ключевые слова: русловой процесс, дноуглубление, спрямление русла, регулирование руслового процесса.

Key words: bed evolution, dredging, channel straightening, bed evolution regulation.



ЭВОЛЮЦИЯ русел (русловой процесс) — процесс многофакторный и сложный, оказывающий различное воздействие на объекты хозяйственной деятельности человека, расположенные по берегам рек. Очень часто это воздействие носит негативный характер.

Подобная ситуация сложилась с начала 1970-х гг. на одной из крупнейших рек России — Иртыше, на его устьевом участке в районе г. Ханты-Мансийска. Решением проблемы по заданию Правительства Ханты-Мансийского автономного округа — Югры занялись специалисты института ЗАО «Ленгипроречтранс» совместно с коллегами из Государственного гидрологического института (ГГИ).

Негативное воздействие на данном участке р. Иртыш обусловлено развитием извилистости русла, то есть развитием северной и южной его излучин, и выражается в интенсивном размыве береговой полосы и значительной заносимости водных подходов к причалам речного вокзала (см. рис. 1, 2).

За период с 1970-х гг. фактические потери перспективной территории района Восточный г. Ханты-Мансийска составляют около 200 га при темпах размыва береговой полосы северной излучины от 15 до 20 м/год. Эффект размыва особенно сильно выражен на прижимном участке северной излучины в районе недавно построенной автодороги.

Объемы дноуглубительных работ в протоке Самаровская для обеспечения нормального функционирования речного порта в отдельные годы достигали порядка 600 тыс. м³.

На схеме р. Иртыш от г. Ханты-Мансийска до 70 км по судовому ходу видно развитие и смещение излучин русла в границах достаточно широкой поймы. В научной литературе этот процесс называется меандрированием. По многочисленным старицам на пойме реки можно проследить прежние положения русла на многие десятилетия назад. По этим признакам схема эволюции речных излучин такая: формируется начальный изгиб, затем образуется излучина, растет и достигает предельного значения ее кривизна, происходит спрямление (прорыв) излучины и затем цикл ее развития повторяется. Этот

процесс имеет длительный, многолетний характер.

К настоящему времени северная излучина достигла той степени кривизны, при которой в экстремальных условиях высоких половодий может начаться процесс естественного спрямления русла. Очевидно, что этот процесс будет носить неуправляемый характер и в условиях близости города может иметь крайне нежелательные последствия.

Для решения указанной проблемы необходимо осуществить инженерное вмешательство в развитие реки, а именно устройство упреждающего спрямления, подконтрольного человеку.

Способ искусственного спрямления речных излучин достаточно широко применяется на практике. Например, подобные работы осуществлены на реках: Вычегде, Дону, Оке, некоторых сибирских реках, в том числе Конде. Сложность решаемой проблемы заключается в некоторой противоречивости решаемых хозяйственных задач:

- с одной стороны, необходимо существенно сдержать развитие северной излучины и увеличить водность протоки Самаровская;

- с другой — увеличение водности в протоке Самаровская не должно оказать негативного влияния на объекты водного транспорта, расположенные по правому берегу протоки.

Таким образом, задача состояла в поиске и обосновании оптимального способа регулирования речного потока как определяющего фактора руслового процесса

На первый взгляд может показаться, что существует вполне реальный альтернативный способ решения задачи — закрепить размываемые берега русла и проводить ежегодные дноуглубительные работы в Самаровской протоке. Конечно, данное решение возможно, но оно технически и экономически нецелесообразно, так как при этом свободная высота берегоукрепительных сооружений с учетом прогнозных размывов дна (см. рис. 2) может составить до 35 м.

Для обоснования решений по регулированию руслового процесса на данном участке р. Иртыш были выполнены следующие исследования:

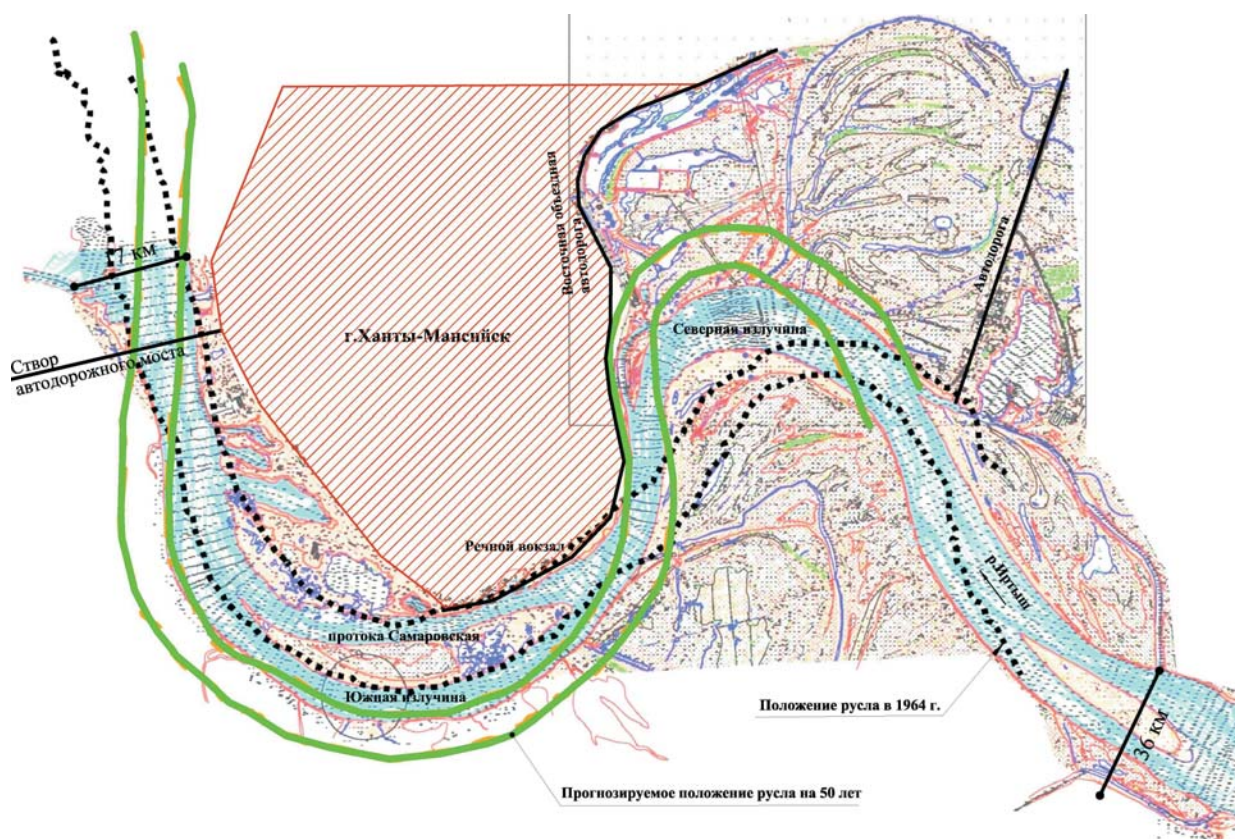


Рис. 1. План участка в 2008 г. с нанесенным положением русла в 1964 г. и прогнозным его положением на 50 лет

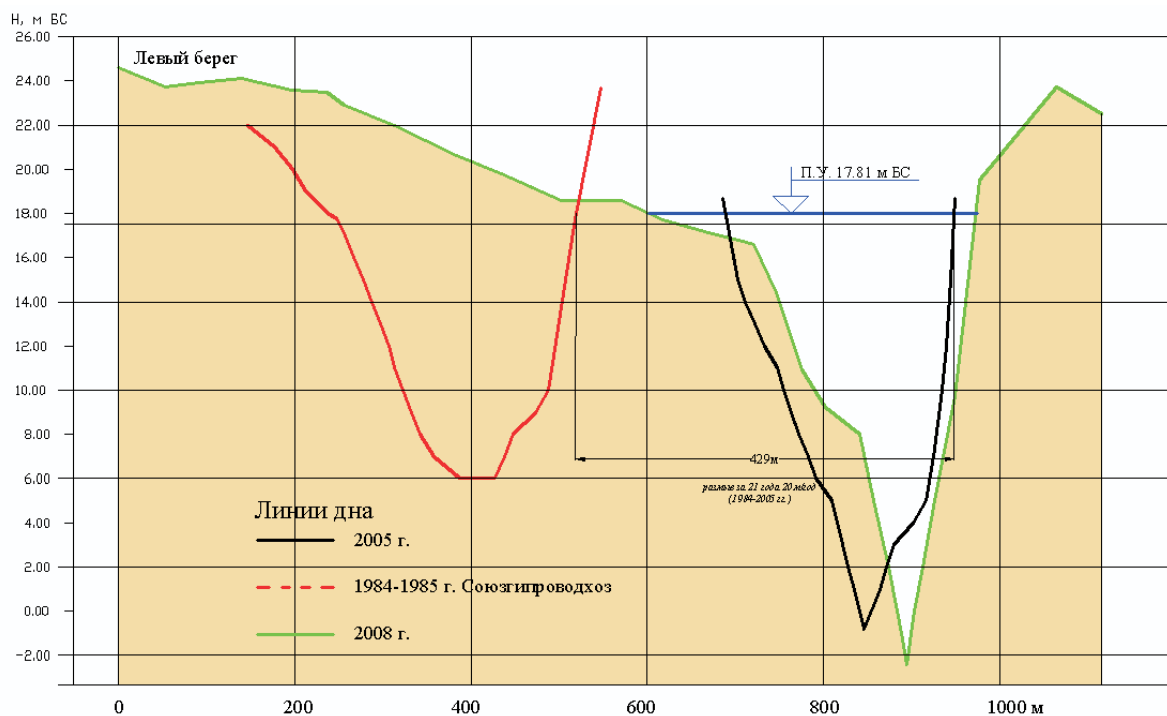
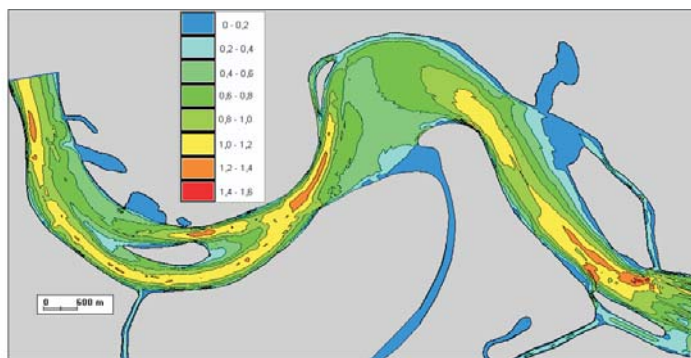


Рис. 2. Совмещенные поперечные профили северной излучины р. Иртыш за период 1984–2008 гг. в характерном створе

Современное
состояние русла (без
мероприятий)



Основной вариант
Спрямляющий канал
и прорезь в протоке
Самаровская

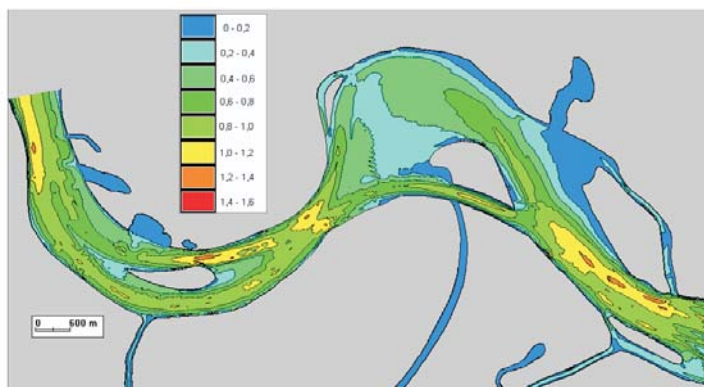


Рис. 3. Планы течений на математической модели

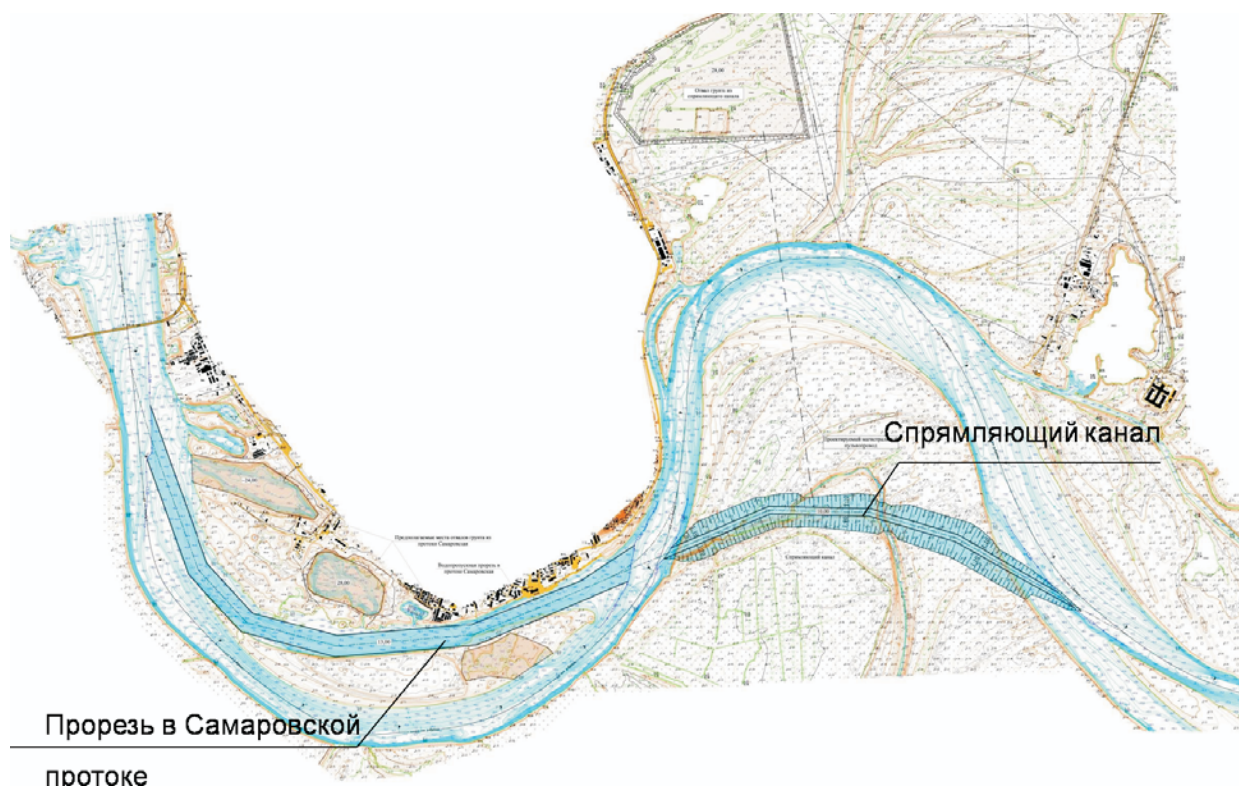


Рис. 4. Схема сооружений по спрямлению р. Иртыш

— инженерные изыскания на участке, в том числе топографо-геодезические и гидрографические работы, инженерно-геологические, инженерно-экологические и инженерно-гидрологические работы;

— изучение гидравлики речного потока с выполнением гидравлического (физического) моделирования в лабораторных условиях и математического моделирования в компьютерной моделирующей системе (Ленгипроречтранс, рис. 3).

В результате было предложено осуществить спрямление русла путем устройства (см. рис. 4):

— *спрямляющего канала*, средней шириной 200 м и глубиной до 13 м на левобережной пойме северной излуины;

— *подводной прорези*, шириной 200 м и глубиной до 2 м в протоке Самаровская на безопасном расстоянии от причалов речного порта.

В связи со значительными объемами земляных работ при устройстве указанных сооружений весьма важным вопросом исследования был вопрос размещения отвалов извлекаемого грунта.

Были рассмотрены два варианта размещения отвалов грунта:

— транспортировка грунта на правобережную пойму — перспективную городскую территорию, с выведением поверхности отвала грунта на незатопляемую отметку;

— расположение грунта на левобережной пойме по обе стороны спрямляющего канала.

Наиболее привлекательным с точки зрения развития г. Ханты-Мансийска, но и весьма затратным является первый вариант размещения отвалов грунта.

Выполненная оценка гидравлического эффекта инженерных мероприятий по спрямлению р. Иртыш показала, что устройства только спрямляющего канала и водопропускной прорези недостаточно для снижения темпов развития северной излуины и размыва ее правого прижимного берега, поэтому было рекомендовано наряду с мероприятиями по спрямлению выполнить работы по укреплению размываемого берега северной излуины, при этом показаны техническая возможность и экономическая целесообразность выполнения берегоукрепительных работ.

УДК 647.627: 641.8

О. И. Гончаров,

Волго-Балтийское государственное
бассейновое управление
водных путей и судоходства
(Санкт-Петербург)

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ИНТЕНСИВНОСТИ ЗЕМЛЕЧЕРПАНИЯ И ВОДНОСТИ НАВИГАЦИИ НА ПОДДЕРЖАНИЕ ТРАНЗИТНЫХ ГЛУБИН

THE ANALYSIS OF THE INTENSITY DREDGING WORK AND WATER SUPPLY FOR NAVIGATION FOR MAINTENANCE OF TRANSIT DEPTHS

В статье рассмотрен анализ интенсивности влияния землечерпательных работ на поддержание габаритов пути.

The analysis of the intensity dredging work impact at the maintenance of overall waterways dimensions is realized.

Ключевые слова: землечерпание, судоходные глубины, гидроузел, регулирование стока.

Key words: dredging, navigation depths, waterworks facilities, flow regulation.

1. Судосходные условия в нижних бьефах гидроэлектростанций

Общие закономерности переформирования русел рек в нижних бьефах гидроэлектростанций, обусловленные изменением режима речного стока, к настоящему времени изучены недостаточно полно. Продолжают сохраняться трудности в количественном прогнозе деформаций русла для учета их при проектировании и строительстве гидротехнических сооружений. Это объясняется тем, что на русловые процессы, определяемые режимом стока, оказывают влияние интенсивные дноуглубительные работы на перекатах для улучшения судосходного состояния участка, а также русловая добыча песчано-гравийных материалов для строительной индустрии.

Отсутствие надежного долговременного прогноза деформаций русла нередко снижает эффективность работы гидротехнических сооружений или создает предпосылку их разрушения. Исследования руслового режима нижних бьефов в многолетнем разрезе продолжают оставаться актуальными, способствуют накоплению данных для использования в практике гидротехнического строительства.

Характер и интенсивность деформаций русла в нижних бьефах гидроэлектростанций в определенной мере зависят от присущего конкретной реке или ее участку типа русла и факторов, воздействующих на русловые процессы.

С созданием водохранилища и перераспределением стока реки во времени происходит увеличение меженных расходов воды, способствующее в перспективе долговременному меженному повышению уровня воды в нижнем бьефе. Транзитные глубины судового хода должны увеличиваться. Долговременное повышение уровней воды вызывает некоторый рост отметок гребней перекатов. Постепенная глубинная эрозия русла — это повышение уровня и первоначально достигнутое увеличение транзитных глубин судового хода нейтрализацией.

Образование на равнинной реке протяженного участка с увеличенными глубинами в верхнем бьефе (водохранилище) побуждает работников производства к «выравниванию»

транзитных глубин, то есть к увеличению глубин и на участке нижнего бьефа. Это может быть обеспечено путем интенсификации дноуглубительных работ в нижнем бьефе. Достигнутое увеличение глубин судового хода в нижнем бьефе сопровождается определенной посадкой уровня воды. На эту ситуацию накладываются дополнительные факторы — интенсивная добыча песчано-гравийных материалов и вызванная этим посадка уровня воды. Данные обстоятельства определяют общий характер развития деформаций русла на участках нижних бьефов большинства ГЭС на равнинных реках.

Строительство комплексных транспортно-энергетических гидроузлов на судосходных реках России коренным образом меняет условия судосходства и производства путевых работ. В результате образования крупных водохранилищ выше гидроузлов создаются большие по протяженности глубоководные участки, на которых почти полностью отпадает необходимость в дноуглубительных работах. Землечерпание как мера поддержания судосходных глубин сохраняется в зоне выклинивания подпора и на подходах к портам, пристаням, судоремонтным заводам, предприятиям речного транспорта, расположенным в районе водохранилищ.

При большой емкости водохранилища, позволяющей осуществлять многолетнее, годичное или сезонное регулирование, происходит выравнивание внутригодового стока ниже ГЭС, снижение паводка и увеличение среднесуточных расходов в меженный период по сравнению с бытовыми расходами.

Положительное значение такого регулирования для водного транспорта заключается в уменьшении заносимости перекатов при прохождении весеннего паводка и увеличении глубин в меженный период.

Наряду с основным видом регулирования водохранилища гидроэлектростанций осуществляют дополнительно суточное и недельное регулирование, обусловленное неравномерностью нагрузки ГЭС в течение суток (недели), при котором периодически в часы пик нагрузки в нижний бьеф сбрасываются повышенные расходы воды. Нарастание расходов в нижнем бьефе распространяется вниз

по течению в виде попуска, вызывая большие колебания уровней воды, увеличение продольных уклонов и скоростей течения. В результате на значительном протяжении ниже ГЭС происходят интенсивные русловые переформирования, отмечается повышенная заносимость судовых ходов на перекатах, и возрастает объем землечерпания.

Недостаточная эффективность проводимых путевых работ, в частности значительное увеличение объема землечерпания для обеспечения нормированных глубин, объясняется интенсивными русловыми переформированиями и слабой изученностью руслового процесса в условиях неустановившегося режима.

Исследование процесса взаимодействия нестационарного потока ниже гидроузлов с речным руслом имеет большое практическое значение для речного транспорта, поскольку непосредственно связано с задачей увеличения габаритов пути и улучшения судоходных условий. Несмотря на то что режимом нижнего бьефа ГЭС занимались многие исследователи, очень важный для транспортной гидротехники вопрос о режиме русла и перекатов при суточном регулировании остается недостаточно изученным.

Русловой процесс ниже гидростанций изменяется по сравнению с бытовым режимом под действием трех основных факторов: изменения величины среднесуточных расходов воды, изменения режима твердого стока, внутрисуточных и недельных колебаний — в зоне с неустановившимся движением, где действуют указанные факторы, русловой процесс значительно интенсифицируется, что проявляется в усилении процесса размыва берегов и переформировании перекатов. В первые годы после пуска ГЭС резко увеличивается объем землечерпания и повторность работ.

Большая повторность землечерпательных работ на перекатах, близко расположенных к плотине, показывает, что основным фактором, определяющим ход переформирования перекатных участков, является не характер весеннего паводка, а режим попусков суточного регулирования.

Анализ большого числа русловых съемок перекатов, расположенных в нижних бьефах ГЭС, показал, что во всех случаях, когда

в интервале между съемками землечерпательные работы на перекате не производились и период этот был достаточно продолжительным, наблюдается намыв гребней с одновременным смещением их вниз по течению.

Явление намыва гребней перекатов ниже гидроузлов отчетливо проявляется при наличии подпора в нижнем бьефе, когда судоходная глубина на перекатах обеспечивается без землечерпательных работ. В этих условиях режим перекатов будет определяться ходом руслового процесса, без влияния землечерпания, как это имеет место в бесподпорных условиях. Намыв перекатов происходит в пределах участка ограниченной длины — порядка 25–30 км, на котором и в условиях подпора наблюдаются значительные суточные колебания уровней и сохраняется неустановившийся режим течения.

Кроме значительного воздействия суточного регулирования, существенное влияние на ход руслового процесса оказывает явление разделения и слияния потоков. Неустановившийся режим этого участка особенно осложняется волновыми явлениями, возникающими в результате сбросов в канал больших объемов воды при шлюзовании. Периодически проходящие при суточном регулировании мощности гидростанции волны попусков с большими расходами воды воздействуют на русло реки подобно весеннему паводку.

Выполненный анализ обеспечения меженных транзитных глубин судовых ходов бассейнов северных рек за период с 1970 по 1993 г. показал, что интенсивное землечерпание непосредственно и устойчиво поддерживает среднее приращение глубин судовых ходов относительно естественно-бытовых. На средние величины меженных глубин накладываются гармонические колебания циклических гидрологических изменений относительно среднемеженного и проектного уровней воды с утвержденной многолетней обеспеченностью.

Анализ отчетных данных выявил следующие факторы для организации путевых работ:

— на состояние транзитных глубин на плес совместное влияние оказывают интенсивность землечерпания и водность навигации;

— в маловодные навигации регулирующее воздействие на поток выправительных сооружений недостаточно и глубины поддерживаются менее гарантированных. Этот недостаток относится к сооружениям весеннего регулирования;

— резкое уменьшение объемов землечерпания может значительно и незамедлительно повлиять на состояние транзитных глубин, на малых реках эффект дноуглубления сохраняется дольше;

— форсированное увеличение объемов землечерпания приводит к излишнему врезу в русло и посадке меженных уровней воды, что снижает эффект приращения глубин судового хода;

— за счет равномерного питания рек на болотистой местности в меженные периоды обеспечиваются землечерпанием относительно устойчивые транзитные глубины;

— в общем случае за последние 20 лет одностороннего понижения уровней воды при систематическом землечерпании на реках не выявлено. Изменения транзитных глубин синхронно следуют за гармониками колебаний уровней воды;

«Понижение водности» и «посадка уровней воды» имеют различные причины происхождения. Первое обусловлено гидрологическими причинами, а второе — гидравлическими вследствие изменения сопротивления русла движению потока (срезка гребней перекатов, удаление русловых образований).

При повышении габаритных размеров судового хода объемы дноуглубления возрастают в степенной зависимости.

Способ технико-экономического обоснования глубин судового хода по приведенным затратам на транспортный флот и водные пути сводится к отысканию расчетной глубины, соответствующей наименьшим затратам — нижней экстремальной точке кривой суммарных затрат на флот и путь.

Технически эту расчетную глубину называют «оптимальной», хотя она является всего лишь наивыгоднейшей по приведенным затратам. Учет вариаций по интенсивности движения транспортного флота оставляет ее таковой. При этом затраты на флот считают неизменными. Все обоснование замкнуто на

определение приведенных затрат как функции от переменной глубины.

Расчетная глубина судового хода не должна превышать глубину, возможную по гидравлично-морфометрическим условиям. Это ограничение не введено в методику обоснования габаритных размеров судового хода. Такое технико-экономическое обоснование следует рассматривать как вариант прогнозирования в первом приближении. Оно предполагает неограниченную мощность землечерпательного парка и широкий выбор типа транспортного судна и их количества, что сдерживается затруднениями в судостроении. Актуальной стала проблема оптимального соотношения габаритных размеров судового хода и главных размеров поперечного сечения русла в условиях динамического равновесия профиля, то есть развитие гидравлично-морфометрического способа обоснования максимально возможных судоходных глубин.

Вопрос о максимально возможных судоходных глубинах был поставлен Х. М. Полинным. В 1960-х гг. решение этого вопроса было предложено Н. А. Ржаницыным и Е. К. Рабковой. Был разработан приближенный метод расчета максимально возможных судоходных глубин. В основу метода положены следующие характеристики речного потока:

— показатель плеса, характеризующий степень устойчивости русла ($Kп$);

— показатель формы русла, заимствованный из работ НИИВТа и представленный в виде коэффициента полноты сечения ($b = T_{ср.}/T_{макс.}$);

— показатель относительной ширины судового хода в виде $\beta = bсх/B$, тоже широко применяемый в расчетах землечерпательных прорезей и выправительных сооружений;

— морфометрический показатель плесовых ложин в виде преобладающей на них максимальной глубины $T_{пл.макс.}$

Крупные водохранилища, создаваемые на реках со значительным среднегодовым стоком воды, используются для решения комплекса энергетических, мелиоративных, водно-транспортных и других задач. Несмотря на возникающие противоречия между отдельными отраслями народного хозяйства в использовании водных ресурсов рек, основная цель

регулирования стока рек едина. Она заключается в накоплении паводкового стока рек для его последующего рационального расходования. В современных условиях создание крупных водохранилищ только с какой-нибудь одной целью, без комплексного решения других немыслимо. Поэтому сущность изменений режима стока воды в нижних бьефах всех крупных водохранилищ аналогична.

Изменение режима стока воды оказывается достаточно большим не только непосредственно в нижнем бьефе гидроузла, но и в значительном удалении от последнего, и даже ниже впадения крупных притоков. На водохранилищах с малой степенью зарегулирования (например, Горьковском) изменения режима стока невелики, но качественно аналогичны.

Изменение расходов воды является важнейшей гидрологической особенностью зарегулированной реки, обуславливающей изменение ее режима в целом. На участках рек выше впадения крупных притоков изменение режима стока еще более ощутимо. Обращает на себя внимание также значительное возрастание расходов воды зимнего периода из-за увеличения нагрузки ГЭС.

В нижних бьефах водохранилищ сезонного регулирования возрастание зимнего расхода больше. В противоположность этому на водохранилищах суточного регулирования зимний расход возрастает в среднем всего в 1–2 раза. В отдельных случаях летний расход не возрастает, а полезная емкость водохранилища преимущественно срабатывается только в зимний период. Особенностью режима стока воды в нижнем бьефе большинства гидроузлов является регулирование его в течение суток и недели.

Исследования, проведенные Днепровским и Волжским бассейновыми управлениями в нижних бьефах ГЭС, показывают, что неравномерность расходов воды в течение суток по мере удаления от створа плотины сначала быстро уменьшается, а затем выравнивание расходов воды замедляется, и волны суточного колебания расхода с малой амплитудой распространяются на расстояние в несколько сот километров, образуя зону неустановившегося движения потока.

Зона неустановившегося движения потока тем длиннее, чем больше абсолютная разность величин максимального и минимального попускowego расхода воды и продолжительность их поступления в течение суток.

Определяющим является режим движения перемещающейся по бьефу волны пуска, которая обуславливает переменные по длине участка и времени суток глубины судового хода. Важными факторами являются возможные деформации русла вследствие зарегулированности стока, которые приводят к изменению суточного графика колебания уровней воды и негативно отражаются на судоходстве. Проблемы режима судоходства в нижних бьефах ГЭС с точки зрения влияния на него русловых процессов и глубинной эрозии являются не до конца изученными.

Одним из важнейших техногенных факторов, влияющих на формирование русла после создания гидроузлов, является воздействие дноуглубительных и карьерных работ. Значительные объемы добычи нерудных строительных материалов (НСМ), особенно в зоне влияния суточного регулирования ГЭС, приводят к увеличению общей посадки уровня воды. Интенсивность роста объемов проводимых транзитных дноуглубительных работ определяется направленностью русловых деформаций и обусловлена стремлением увеличить транзитную судоходную глубину на протяженном участке «водохранилище–нижний бьеф».

Современное состояние теории и практики русловой гидротехники позволяет дать достаточно обоснованное теоретическое объяснение сущности изменения характера русловых процессов на реках после зарегулирования их стока крупными водохранилищами. Ряд существенных факторов, предопределенных долговременным характером процесса перестройки русла, и закономерности последующих его деформаций продолжают оставаться недостаточно исследованными. Отсутствуют четкие обоснования по оптимизации режима судоходства при нестабильных в течение суток глубинах.

Комплексные гидроузлы на реках оказывают большое влияние на судоходное состояние естественных водных путей. С вво-

дом в эксплуатацию гидроузлов, регулирующих речной сток, создаются новый водный и русловой режимы; меняется интенсивность и характер русловых процессов. Основные закономерности руслового режима крупных гидроузлов были охарактеризованы следующими стадиями.

В первой стадии отмечается интенсивный локальный размыв русла на нескольких километрах ниже рисбермы плотины — приплотинном участке, в результате чего быстро образуется «глубокая яма». Продукты эрозии при этом нередко образуют в некотором удалении от плотины мощные скопления наносов. Причиной этого является изменение транспортирующей способности потока по длине. Все это вызывает местный подпор потока и временное (на несколько лет) повышение уровня воды.

На второй стадии процесса подъем уровня воды сменяется его посадкой, возникающей из-за глубинной эрозии и трансформации живого сечения реки. Начиная с этой стадии главным фактором развития эрозии на значительном протяжении нижнего бьефа является насыщение осветленного водохранилищем потока твердыми частицами за счет размыва ложа дна реки.

На третьей стадии основным фактором снижения уровней является глубинная эрозия, зона действия которой постепенно удлиняется и охватывает все более значительное пространство вниз по течению.

Четвертая стадия — конечная стадия процесса — характеризуется относительной стабилизацией продольного профиля и форм поперечного сечения русла.

Учет приведенной классификации важен при проектировании и строительстве в нижних бьефах гидросооружений и других объектов. Данная схема деформаций русла реки не учитывает накладывающееся на нее влияние интенсифицированных дноуглубительных и карьерных работ.

Методом организации судоходства в условиях переменных глубин является паузка судов перед прохождением лимитирующего участка и последующая догрузка на выходе. Однако организация паузки и догрузка эффективны, когда эксплуатационные затраты

на освоение грузопотока с использованием паузки судов не превышают эксплуатационные затраты на освоение грузопотока без паузки. В нижнем бьефе Нижегородской ГЭС применение подобного метода привело также к существенным потерям судоходных компаний от неполного использования грузоподъемности судов.

За время эксплуатации Нижегородской ГЭС предполагался ряд инженерно-технических мероприятий с целью улучшения условий судоходства. При этом ряду организаций (ВГАВТ, Гипроречтранс) было предложено несколько вариантов стабилизации русла. Однако ввиду сложности практического осуществления ни один из них не был применен. В результате стабилизации русла в нижнем бьефе Нижегородской ГЭС явилась следствием естественного хода русловых процессов.

На основе анализа зарубежного и отечественного опыта организации судоходства в нижних бьефах ГЭС было введено два понятия, определяющих характер стабилизации русла реки вследствие зарегулированности стока: естественная и искусственная стабилизация русла.

Первая характеризуется естественными условиями протекания русловых процессов, когда характер и интенсивность деформаций русла определяются только природными факторами и работой ГЭС. Длительность ее может составлять от 50 до 100–200 лет. Закономерности русловых деформаций в этом случае описаны Н. И. Маккавеевым и Б. Г. Федоровым. Искусственная же стабилизация русла возможна при активном вмешательстве человека в процесс русловых переформирования. Продолжительность ее гораздо меньше и зависит от применяемых методов и конкретных условий.

Достоверный и долговременный прогноз деформации русла при проектировании гидроузлов необходим для обеспечения условий нормальной эксплуатации как самого гидроузла, так и водных путей и инженерных сооружений на участке нижнего бьефа.

Одной из первоочередных задач по совершенствованию организации судоходства является увеличение пропускной способности водных путей. При этом важно выявляе-

ние и прогнозирование резервов времени для прохождения судами участка нижнего бьефа с учетом особенностей гидрологического режима нижних бьефов гидроузлов.

При проектировании гидроузла обязательным является прогноз трансформации русла в нижнем бьефе ГЭС, и в первую очередь прогноз понижения уровня воды. В процессе эксплуатации гидроузла в результате влияния техногенных факторов возможно отклонение от запроектированных значений ввиду неучтенности местных особенностей и в том числе вследствие добычи НСМ. На данный момент нет достоверной оценки доли посадки уровня воды, приходящейся на русловые процессы, и доли, приходящейся на карьерные разработки.

2. Исследования неустановившегося движения воды на реке Свирь

Для создания новых методов расчета неустановившегося движения, а также усовершенствования существующих необходимо располагать натурными материалами, которые бы достаточно полно и всесторонне характеризовали это сложное явление. Однако натурные материалы по исследованию волн попусков малочисленны и не освещают всего многообразия морфологических особенностей, учет которых зачастую необходим при производстве расчетов.

Исходя из этих соображений, Государственным гидрологическим институтом при участии Центрального института прогнозов на реках Тверце и Оредеж был проведен полевой эксперимент по изучению распространения волн попусков, в котором главное внимание было обращено на изучение влияния усложняющих обстоятельств. Результаты исследований изложены в монографии под редакцией Н. Е. Кондратьева и В. А. Урываева.

Наименее изученным до настоящего времени остается вопрос о распространении волн попусков в зимних условиях. В этом случае гидродинамическая задача еще усложняется наличием ледяного покрова, который обладает в разных условиях его существования различными свойствами и, следовательно, оказывает различное сопротивление потоку.

Явление становится еще более сложным при наличии шуги и связанных с нею зажоров.

На необходимость натуральных исследований неустановившегося движения воды в зимних условиях не раз указывалось в решениях межведомственных совещаний, в частности Совещания по проблеме неустановившегося движения воды, организованного Научно-техническим советом Главного управления гидрометеорологической службы.

Крайняя недостаточность натуральных материалов по изучению волн попусков в зимних условиях в значительной мере тормозит создание новых и совершенствование существующих методов расчета неустановившегося движения воды при наличии льда.

Указанные обстоятельства послужили основанием для постановки Государственным гидрологическим институтом полевых исследований волн попусков в зимних условиях в нижнем бьефе Нижнесвирской ГЭС.

Для более наглядного выявления особенностей в характере распространения волн попусков, обусловленных наличием ледяного покрова, было признано целесообразным повторить наблюдения и при открытом русле на том же объекте, при том же графике попусков.

Река Свирь в пределах участка — от Нижнесвирской ГЭС до впадения р. Шоткусы, протяжением 59,1 км — имеет русло правильной корытообразной формы, ограниченное почти на всем участке незатопляемыми берегами. Несколько впадающих в пределах участка притоков несут весьма малый расход воды по сравнению с расходом самой Свири, так что исследуемый участок может считаться практически бесприточным. Хорошая топографическая изученность реки исключала необходимость проведения специальных съемочных работ.

Схемой развития водных путей Волго-Балтийского водного пути на период до 2015 г. предусмотрено обеспечить транзитные гарантированные габариты судового хода на уровне: глубина — 4,5 м; ширина — 90 м (на криволинейных участках до 120 м); минимальный радиус закругления — 800 м. Путевые работы по повышению гарантированных габаритов являются основной частью комплекса мероприятий, направленных на увеличение про-

пускной способности этой магистрали. Недостаточные габариты пути приводят к тому, что сейчас на реке Свирь имеются лимитирующие судоходство участки — с односторонним движением, с ограничением скоростей хода одиночных судов и встречных судов при расхождении. Это отрицательно сказывается на эксплуатационных показателях использования флота.

Капитальные работы по достижению установленных на перспективу гарантированных габаритов производятся на отдельных участках поэтапно.

При существующих гарантированных габаритах пути на участке реки Нижняя Свирь действуют ограничения режима движения флота. С завершением работ по коренному улучшению участка реки ограничение скоростей хода будет снято. Сократится время прохождения участка судами и составами, что повысит их провозную способность, снизит эксплуатационные расходы по перевозкам и капиталовложения во флот на расчетный объем перевозок.

Для оценки экономической эффективности улучшения судоходных условий на участке выполняются расчеты и сопоставление суммарных затрат по путевым работам и транспортному флоту по двум вариантам: базовому и проектному. При базовом варианте гарантированные габариты судового хода остаются на современном уровне, их поддержание осуществляется эксплуатационными дноуглубительными работами; сохраняются предусмотренные правилами судоходства ограничения и суда проходят участок реки Нижняя Свирь с минимально допустимыми скоростями. При проектном варианте производятся капитальные работы по увеличению габаритов судового хода, вследствие чего лимитирующие судоходство факторы исключаются. Транспортный флот проходит участок с расчетными техническими скоростями.

Берега реки Свирь в ее нижнем течении интенсивно разрушаются, особенно в последние годы. Общий объем разрушений составляет около 40 погонных километров. Вопрос берегоукрепления требует неотложного решения и может быть решен за счет средств из

централизованного российского фонда на экологические мероприятия.

ГБУ «Волго-Балт» имеет богатый опыт производства берегоукрепительных работ на Водораздельном канале — закреплено более 45 км откосов. Тип крепления — каменный банкет в урезной зоне пляжного откоса зарекомендовал себя положительно. Крепление надежно, не теряет защитных свойств при деформациях откоса, стремится к самостабилизации, легко поддается ремонту при эксплуатации.

Факторы, влияющие на процесс разрушения берегов, носят естественный и антропогенный характер. Рассматриваемый участок реки Свирь находится в нижнем бьефе Нижнесвирской ГЭС, в зоне неустановившегося водного режима. Суточное и недельное регулирование стока воды Нижнесвирской ГЭС, являющейся пиковой станцией в системе Ленэнерго, вызывает резкие колебания уровней воды. Амплитуда суточных колебаний уровней воды достигает 2,5 м. Недельные колебания — 3,2 м.

Сложная картина колебаний уровней дополняется тем, что на волны попусков ГЭС накладываются волны попусков, создаваемые шлюзованием, и волны, создаваемые аварийным сбросом воды через водосливную плотину. При этом резко изменяются все параметры водного потока: уровни, расходы, скорости течения и уклоны.

Наибольшего значения уклоны достигают в момент заполнения нижнего бьефа после его полного опорожнения в выходные дни, а также ежедневно в утренние часы пик. Скорости течения в нижнем бьефе при этом значительно превышают размывающие, особенно в непосредственной близости от ГЭС. Это приводит к значительному размыву берегов в широком диапазоне изменений уровней. По данным исследований кафедры водных путей и водных изысканий ЛИВТа, выполненных на нижней Свири в 1978 г., ее неустановившийся водный режим является одной из главных причин постоянного размыва берегов.

Через ГЭС из водохранилища проходит осветленный поток, обладающий повышенной транспортирующей способностью. Это оказывает размывающее воздействие на все русло и, в частности, на берега.

К числу других факторов разрушения берегов относятся ледовые явления, которым присущ в нижнем бьефе сложный характер: образование и разрушение ледовых полей под воздействием попусков, частые ледоходы при резком колебании уровней, заторные явления и образование шуги.

Естественным фактором является воздействие потока на вогнутые берега. На поворотных участках образуются винтовые течения и скорости нисходящих вдоль вогнутых берегов течений складываются со скоростями продольных течений, что приводит к глубокой эрозии берегов с последующим их обрушением.

Одним из антропогенных факторов является судовая волна, воздействующая на берега, но этот фактор носит периодический характер и не является преобладающим, так как скорость движения судов ограничена местными правилами плавания.

Сочетание всех этих факторов выдвигает требование создания берегоукрепительных сооружений с предварительными исследованиями и экспертизой проектов.

Основной причиной заносимости прорезей на нижней Свири является воздействие на различные элементы русла судовых волн в широком диапазоне колебания уровней.

Судовые волны разрушают берега, побочни, отвалы грунта, вызывают оползание кромок прорезей. Волны попуска обуславливают значительное колебание уровней и значительно расширяют зону воздействия судовых волн. Если эта зона находится выше переката, то частицы грунта разрушенных элементов русла перемещаются течением реки на перекат и откладываются на нем в результате уменьшения транспортирующей способности потока на перекате.

На перекате Лодейное Поле заносимость можно объяснить уменьшением транспортирующей способности потока из-за наличия подпора уровня от нижерасположенного довольно крутого поворота русла. Донные скорости на подходе к повороту уменьшаются быстрее поверхностных, что способствует отложению наносов и росту подводных кос правобережного побочня, снижая глубины в районе судового хода.

Регулярное дноуглубление, проводимое на перекате, разрешает проблему судоходства на этом участке лишь на короткий срок, так как отвал укладывается на тот же правобережный побочень и вскоре снова частично сносится течением в прорезь.

Положение с заносимостью переката усугубляется воздействием судовых волн. Судовой ход проходит в непосредственной близости от побочня и укладываемого на него отвала грунта.

Судовые волны очень быстро размывают эти элементы русла и участок берега выше переката и сносят частицы грунта в прорезь.

Все это приводит к ежегодным повторным дноуглубительным работам на перекате Лодейное Поле, который считается самым сложным на нижней Свири.

На Свирских Мелях причиной заносимости переката является понижение транспортирующей способности потока в результате уменьшения скоростей на уширении русла, а также перемещение в прорезь песков побочня и отвалов грунта.

На перекате Свирские Мели влияние судовой волны на заносимость судоходной прорези является преобладающим. Здесь нет ярко выраженного поперечного перемещения частиц грунта самим потоком, так как участок прямолинеен и нет резких изменений рельефа дна.

Заносимость прорези происходит за счет вызванного судовой волной поперечного течения и оползания подводных кромок прорези. Размыв берегов на перекате и выше него происходит интенсивней и, следовательно, больше твердого материала поступает на перекат.

Процесс заносимости прорезей можно характеризовать следующей последовательностью хода руслового процесса:

- размыв берегов, побочней и отвалов грунта в результате воздействия судовой волны и волны попуска;
- поперечное перемещение частиц размытого грунта в сторону судового хода под действием откатывающихся судовых волн;
- перемещение влекомых наносов транзитным потоком при прохождении волны попуска;

— отложение наносов на нижележащих перекатах в результате потери транспортирующей способности потока.

Анализ перекатов Лодейное Поле и Свирские Мели показывает, что за последние 17 лет на перекатах произошли значительные изменения.

На перекате Лодейное Поле емкость русла увеличилась на 25 %, произошел повсеместный размыв берегов, а максимальный размыв ведущего берега составил 20–25 м, при высоте бровки 4–6 м.

На перекате Свирские Мели емкость русла увеличилась на 29 %, размыв берегов также произошел почти повсеместно и составил 25–30 м.

Увеличение емкости русла объясняется повышенной взвешивающей и транспортирующей способностью осветленной воды из водохранилища. Значительную часть в увеличении емкости русла составляет и проведение регулярного ежегодного дноуглубления на перекатах и повышение гарантированных габаритов пути. На долю этих факторов приходится порядка 10 % увеличения емкости русла.

Емкость русла на перекатах увеличивается в среднем на 1,5–1,7 % в год, из них 0,6 % приходится на дноуглубление. Размыв берегов составляет 0,5–1,0 м/год, доходя местами до 2 м/год.

Учитывая характер грунтов, слагающих

перекаты и берега, а это суглинки и супеси с включением валунов, необходимо сказать, что скорость деформаций русла выше ожидаемой. Значительное увеличение емкости русла и интенсивные русловые переформирования происходили в нижнем бьефе гидроузла только в первые годы после его возведения, а в дальнейшем этот процесс стабилизировался и русло с зарегулированным стоком отличалось большей устойчивостью, чем в бытовых условиях. Нижнесвирская ГЭС сдана в эксплуатацию в 1933 г. и за 74 года русло стабилизировалось.

Если не считать водохозяйственного воздействия человека, то собственные переформирования переката незначительны, перекаты устойчивы и на протяжении многих лет существуют на одних и тех же местах. Донные гряды на перекатах невысокие, перемещаются они со скоростью около 1 м/сут. На перекатах нет каких-либо резких отклонений в направлении и скорости течения.

Наряду с повышенной взвешивающей и транспортирующей способностью, поступающей из водохранилища воды и проводимыми землечерпательными работами должны существовать и другие факторы, обуславливающие значительную деформацию русла.

К этим факторам, вероятно, относятся повышенные скорости потока при волнах пуска ГЭС и судовых волнах.

УДК 627.4

А. М. Гапеев,
д-р техн. наук, профессор,
СПГУВК;

В. В. Кононов,
канд. техн. наук, доцент,
СПГУВК

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВОДНОЙ ЭНЕРГИИ ДО ИЗОБРЕТЕНИЯ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ ТУРБИН

USING OF WATER POWER BEFORE THE INVENTION OF HYDRAULIC TURBINES

Рассматривается история использования водной энергии в гидросиловых установках (водяных двигателях) с древних времен до изобретения гидравлических турбин в начале XIX в.

The article considers the history of water power using in hydro-power plants (water-engines) from the ancient times till the invention of hydraulic turbines at the beginning of the XIX century.

Ключевые слова: водоподъемные устройства, водяные колеса, водная энергия, гидросиловые установки, гидравлические турбины.

Key words: devices, water-wheels, water power, hydro-power plants, hydraulic turbines.

Водоподъемные устройства

С момента перехода к оседлому образу жизни человек стремился использовать энергию текущего, падающего водного потока и напора. В древних цивилизациях: египетской, шумерской, китайской, бенгальской (4–3 тыс. лет до н. э.), для подъема воды и подачи ее на поля использовались водоподъемные колеса¹ (рис. 1). Они устраивались с черпаками или лопатками по ободу. У колеса с черпаками (рис. 1, а) вода поднималась до верхней точки колеса, изливалась из черпаков в приемный резервуар и поступала затем в оросительный канал. У колеса с лопатками (рис. 1, б) вода поднималась по желобу вверх на необходимую высоту и далее изливалась в канал. Водоподъемные колеса приводились во вращение рабами, верблюдами или волами. Рабы, находясь на колесе, шагали по специальным ступенькам и создавали вращательный момент.

Нории — водоподъемные устройства в виде бесконечной вертикальной цепи с черпаками или дисками (рис. 2). Принцип подъема и излива воды был тот же, что и у водоподъемных колес. Разница состояла лишь в том, что на цепь вместо черпаков надеты диски, часть которых при вращении цепи проходит через трубу, поднимая воду к отводящему лотку.

Для подъема воды на небольшую высоту использовались архимедов винт, ворота, четочные подъемники, противовесные системы в виде «журавля». Архимедов винт (рис. 3, а) состоит из цилиндра, соединенного с осью посредством винтовой поверхности. При вращении оси вода поднимается вверх, так как она стремится сохранить самое низкое место между поверхностью винта и поверхностью цилиндра. Четочный водоподъемник (рис. 3, б) состоит из трубы, поставленной в колодец с широким раструбом в

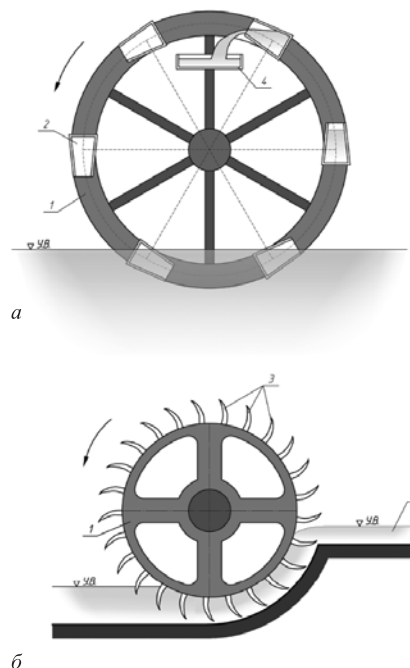


Рис. 1. Водоподъемное колесо:
а — с черпаками; б — с лопастями;
1 — колесо; 2 — черпак; 3 — лопасти;
4 — водоотводящий лоток

нижней части. Через ворот в трубу запускался запасованный на ворот канат с большим количеством грузиков размером, равным внутреннему диаметру трубы. При вращении ворота грузики-поршни входили в трубу и поднимали воду. С верхнего обреза трубы вода изливалась в емкости для дальнейшего использования. Противовесная система типа колодезного «журавля» (в некоторых странах имевшая название «шадуф») является одним из древнейших и простейших водоподъемных устройств. При необходимости поднять воду на большую высоту использовалась система шадуфов, в которой вода подавалась наверх в несколько приемов — со ступени на ступень.

Водяные колеса

Достоверно неизвестно, когда и где было изобретено водяное колесо — первый в

¹ Водоподъемные колеса используются и в настоящее время для подъема питьевой воды из колодцев в оазисах.

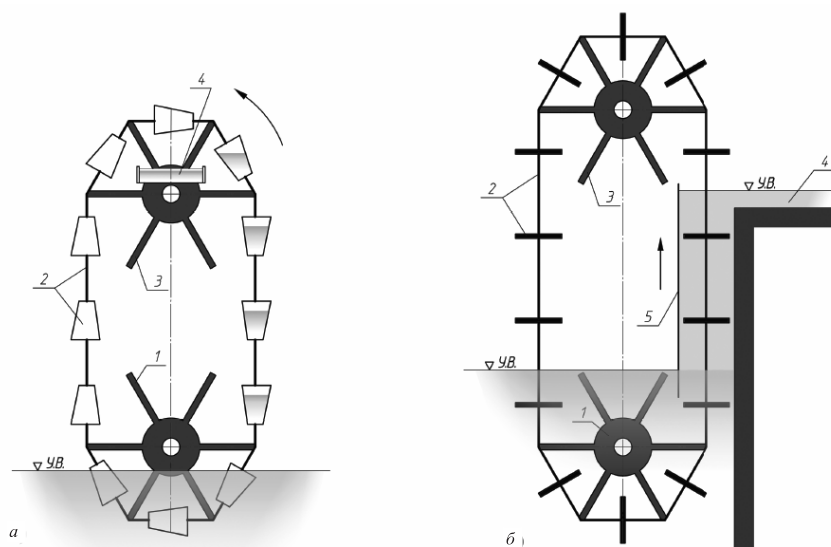


Рис. 2. Нории:

а — с черпаками; б — с дисками:

1 — ведомый вал; 2 — цепь с черпаками (дисками); 3 — ведущий вал;

4 — лоток для отвода воды; 5 — труба

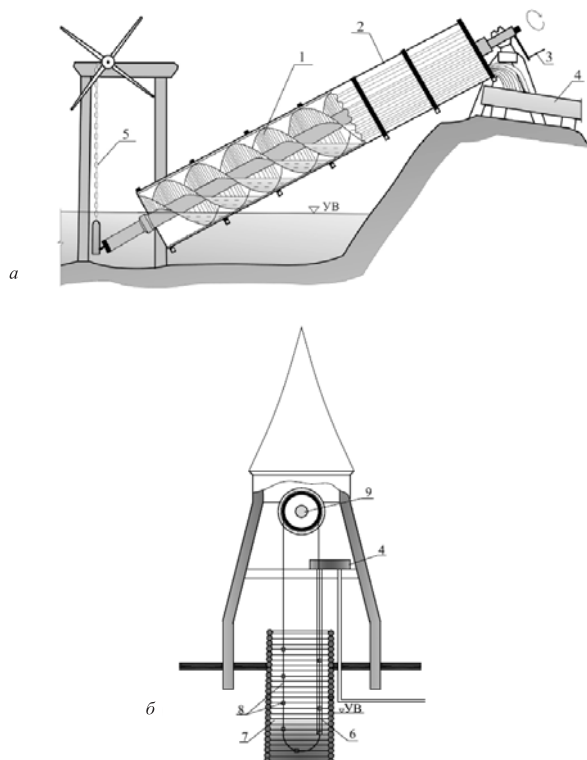


Рис. 3. Водоподъемные устройства:

а — архимедов винт; б — четочный подъемник:

1 — винтовая лестница; 2 — цилиндр;

3 — рукоятка вращения; 4 — отводящий лоток;

5 — регулирующее устройство;

6 — труба; 7 — колодец;

8 — канат с грузиками-поршнями; 9 — ворот

мире двигатель, преобразовавший энергию водного потока в механическую энергию. В I в. до н. э. римский архитектор, инженер и историк Витрувий в своем трактате «Десять книг об архитектуре» приводит описание нижнебойного (другое название — подливного) водяного колеса, которое приводилось во вращение действием водного потока на его нижние лопасти (рис. 4). Эти колеса устраивались на реках, имеющих большую скорость течения, и при подаче воды под напором. Использовалось несколько типов нижнебойных водяных колес. В одном из них, обыкновенном, вода подавалась под водяное

колесо и действовала на его лопасти ударом (рис. 4, а), при этом происходила потеря воды между дном и краями лопаток, отчего происходила потеря части энергии.

Затем энергия затрачивалась на удар воды о лопасти. Вследствие указанных потерь коэффициент полезного действия (КПД) этого колеса был не более 30 %. Распространенным типом нижнебойных водяных колес было «висячее» колесо, которое устанавливалось на свободном течении реки и погружалось в воду своими нижними лопатками. Наиболее совершенным было нижнебойное водяное колесо конструкции Понселе¹ (рис. 4, б). Оно изготавливалось с криволинейными лопатками такой формы, при которой вода входила почти без удара и выходила почти без начальной скорости. Вода подавалась на колесо под напором 1,5–2,0 м, двигалась по направлению криволинейных лопаток вверх и оказывала на них гидродинамическое давление. Дойдя до верхней части лопаток, вода начинала падать вниз, скользя по лопаткам и действуя на них своей

¹ Понселе Жан Виктор (1788–1867) — член-корреспондент Петербургской академии наук, автор трудов по механике и гидравлике.

силой тяжести. В точке выхода воды с колеса она почти не имела скорости, так как, двигаясь по лопатке, имела скорость, обратную вращению колеса. Можно подобрать лопатки такой длины, при которой эти противоположные скорости будут равны. КПД колеса Понселе составлял 60–70 %.

Кроме нижнебойных колес, широко использовались также среднебойные и верхнебойные водяные колеса.

Среднебойные водяные колеса были устроены так, что вода подавалась на них в середину колеса или несколько ниже (рис. 5, а). Эти колеса использовались при больших расходах воды и небольших напорах. Под колесом располагался кожух, препятствующий протечкам воды. Впуск воды на колеса устраивался перегородчатый, так что она подавалась на несколько лопаток. В колесе использовалась частично кинетическая, частично потенциальная энергия. КПД колеса составлял 50–60 %.

Верхнебойные водяные колеса (другое название — наливные) приводились в движе-

ние потоком воды, падающим на верхние лопасти (рис. 5, б). Вода подводилась к колесу в лотке, расположенном на некоторой высоте h над верхними лопастями. В момент касания лопастей вода имела скорость $v = \varphi \sqrt{2gh}$, где φ — коэффициент скорости, зависящий от формы лотка. Лопасти верхнебойного колеса устраивались в виде ящиков без верха: деревянные лопасти имели форму ломаной линии, металлические — криволинейную с отверстием в нижней части для выхода воздуха при заполнении лопасти водой. Верхнебойные колеса использовались при небольшом расходе воды, но при значительном напоре (h — до 10 м). КПД верхнебойного колеса составлял 75 %. Для получения большего крутящего момента диаметры водяных колес имели большие размеры — до 15–17 м.

Гидросиловые установки

Механическая энергия, создаваемая водяным колесом, была использована при уст-

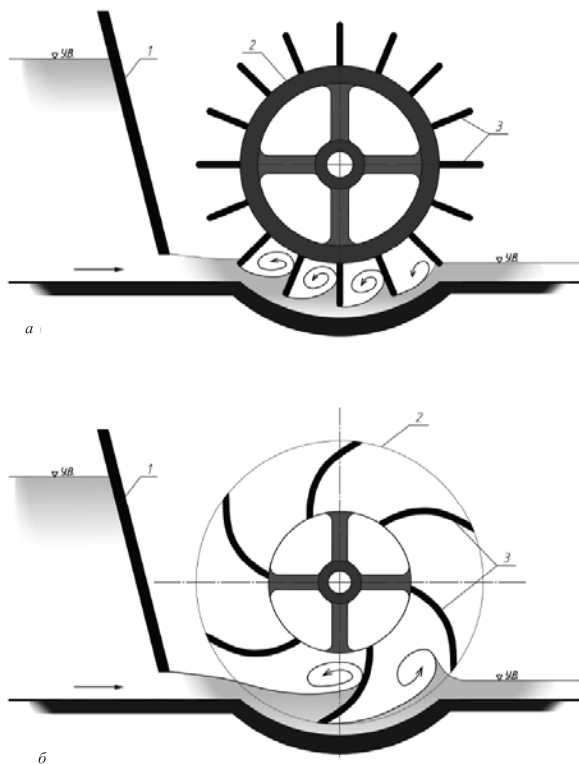


Рис. 4. Нижнебойное (подливное) колесо:
а — обыкновенное; б — типа Понселе;
1 — впускная стенка; 2 — колесо;
3 — лопатки

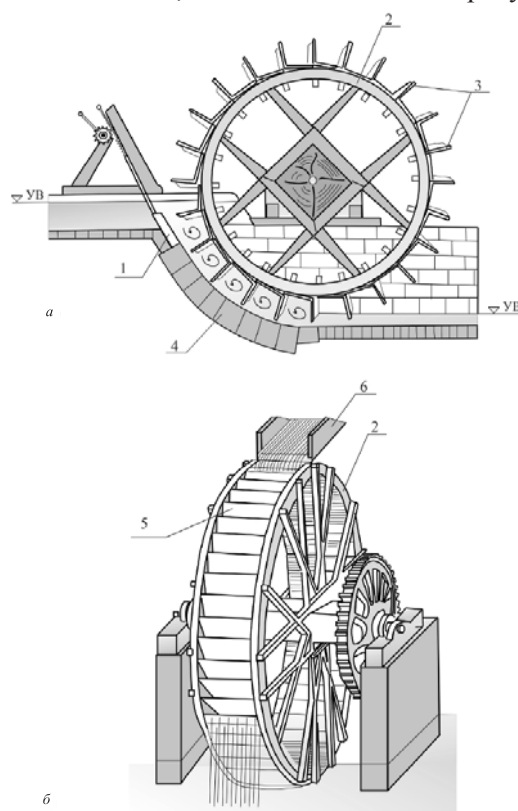


Рис. 5. Водяное колесо:
а — среднебойное; б — верхнебойное;
1 — перегородка; 2 — колесо; 3 — лопатки;
4 — кожух; 5 — ящики колеса;
6 — подводящий лоток

ройстве гидросиловых установок — машин и механизмов для работы в самых разных отраслях хозяйства. В сельском хозяйстве строились мельницы для помола зерна, крупы, изготовления масла (маслобойни), валяния сукна. В промышленности гидросиловые установки строились для распиловки леса («пильные мельницы»); производства бумаги («бумажные мельницы»); для кузнечных работ («молотовые кузницы»); для изготовления кож, пряжи, тканей; для откачки воды из шахт; для подъема руды и ее измельчения; для обработки металла и др.

Великий итальянский ученый и художник Леонардо да Винчи в своих книгах эскизов привел несколько рисунков водяных колес и механизмов с их применением: гидравлическую пилу, в которой водяное колесо приводило в движение вертикальную пилу и тележку со стволом дерева; архимедов винт, приводимый в движение водяным колесом; водяное колесо с чашами, которые зачерпывали воду из нижней емкости и выливали ее в верхнюю.

При строительстве гидросиловых установок на реке возводился комплекс гидротехнических сооружений: плотина; мост; водоводы в

виде лотков к водяным колесам (в России они назывались «лари»); водяные колеса; гидросиловые установки; водоспуски; каналы для сброса отработавшей воды.

Гидросиловые установки получили широкое распространение в странах Европы: Франции, Германии, Швеции, Италии, Испании, Греции и др. Одним из выдающихся примеров гидросиловых установок была построенная на р. Сене в 1682 г. установка для подачи воды к дворцам и фонтанам пригородов Парижа—Версаля, Трианона, Марли. На участке от города Безона до Порт-Марли р. Сена разделена на два рукава. На одном из них была построена плотина, поддерживавшая напор 1,65 м. Из водохранилища перед плотиной вода подавалась на 14 нижнебойных колес диаметром по 12 м каждое. От них приводились в действие: в общей сложности 221 насос; приводы при помощи кривошипов малых тяг шатунов общим протяжением 1430 м; подъем воды через два промежуточных водохранилища на общую высоту 162,15 м. Здесь вода поступала в акведук, подававший воду к дворцам и фонтанам Версаля, Марли, Трианона. Установка давала в сутки около 5 тыс. м³ воды и развивала мощность 92 кВт.

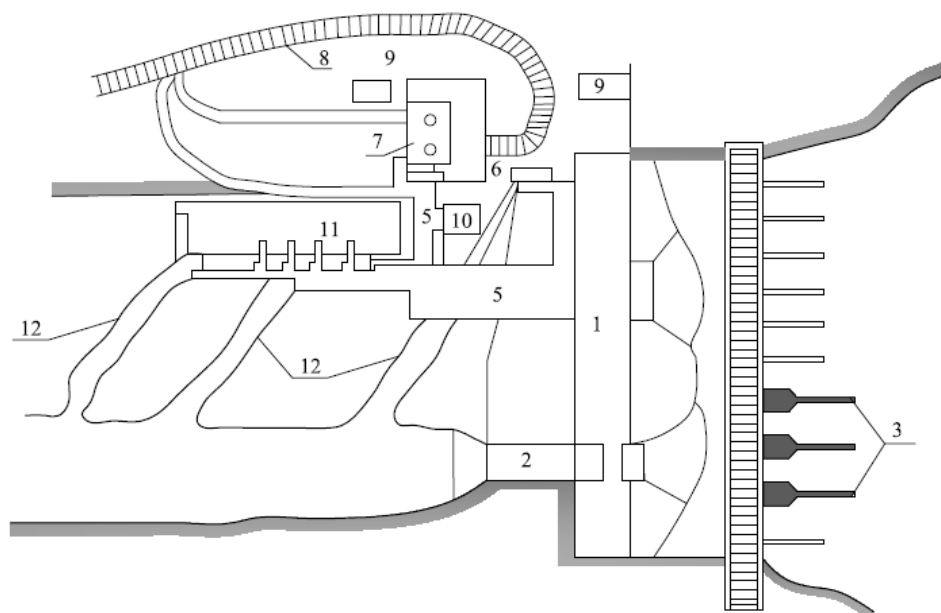


Рис. 6. Гидротехнические сооружения Поротовского завода в XVII в.:

- 1 — плотина; 2 — водоспуск; 3 — быки; 4 — мост; 5 — лари; 6 — вертельная; 7 — домны;
8 — мост на домну; 9 — изба — «делают в ней ядерные фурмы»; 10 — мучная мельница;
11 — молотовая кузница; 12 — каналы для сброса отработавшей воды

В России в ранних памятниках русской письменности IX в. встречаются названия «мельница», «мельник». Упоминания о построенных водяных мельницах имеются в документах XIII–XV вв. Например, великий князь Дмитрий Донской в 1389 г. по духовному завещанию отказал (подарил) своей жене село Семницкое с мельницей на р. Яузе. В духовной грамоте князя Владимира Андреевича от 1410 г. упоминаются села «...Поповское на Коломенке с мельницею, Колычево на Неглимене мельница; Курьясов с Луги до на устьи Мьстицы мельница, Косино с тремя озера до мельница на усть Яузы».

Промышленные гидросиловые установки начали строить в России позже, чем в Европе. В 1630-е гг. в центральном промышленном районе были построены четыре металлургических завода на р. Тулице. Затем были построены: завод для производства пушечных ядер на р. Ваге; четыре Каширских завода на р. Скниге; Поротовский завод на р. Протве (рис. 6); Угодский завод на р. Угодке и др. В начале XVIII в. были построены гидросиловые установки: для Ижорского завода на р. Ижоре; для Сестрорецкого завода на р. Сестре; на Урале — для Нижнетагильского, Екатеринбургского, Златоустовского, Воткинского, Кизеловского, Бисерского и других заводов. Наряду с практическими работами по строительству гидросиловых установок инженеры и ученые вели теоретические разработки в области использования водной энергии, гидравлики и гидромеханики. Академики Петербургской академии наук Д. Бернулли (1700–1783), Л. Эйлер (1707–1783) заложили основы гидравлики и гидромеханики. М. В. Ломоносов (1711–1765) в работе «Первые основания металлургии» (1742) сделал раздел о гидросиловых установках на рудниках. В нем содержится детальное описание и чертежи: рудоподъемной машины, приводимой в действие водяным колесом; установки с ручными насосами; насосных поршневых и четковых установок, приводимых в действие водяными колесами; водоподъемной машины с приводом ее от водяного колеса, расположенного на значительном расстоянии. Свои теоретические работы М. В. Ломоносов реализовал на практике, построив в 1754 г. на

р. Рудице фабрику по производству цветного стекла. На ней работала гидросиловая установка с тремя водяными колесами: «...первое для двух рам пильных, чтобы пилить доски к фабричному строению и впредь для пристроек, починок и ящиков под материалы; второе колесо для машин, которыми толочь, молотить и мешать материалы, в стекло потребные, и шлифовать мозаику, для которых кругов в мельнице два покои особые; третьим колесом ходят жернова для молотья хлеба, на котором содержат фабричных людей».

Гидросиловые установки широко применялись при строительстве горнорудных заводов и рудников на Урале и Алтае. На одном из алтайских рудников — Змеиногорском — в начале 1650-х гг. XVII в. И. И. Ползуновым (изобретателем паровой машины) впервые в России была построена гидросиловая установка с деривационным (обходным) каналом для подвода воды к водяному колесу. На этом же руднике выдающимся русским гидротехником-самородком Кузьмой Дмитриевичем Фроловым (1726–1800) был построен в 1787 г. комплекс гидротехнических, горнозаводских сооружений, не имевший аналогов в мире. На р. Змеевке были построены: плотина, поддерживавшая напор 6,5 м; водозабор из водохранилища перед плотиной; деривационный канал длиной 535 м для подачи воды на первое верхнебойное водяное колесо пильной мельницы; отработавшая вода снова поступала в канал длиной 107 м, подводивший воду ко второму водяному колесу рудоподъемной машины на Екатерининский шахте; отработавшая вода поступала в канал длиной 62 м, подводивший воду к третьему водяному колесу диаметром 17 м Екатерининской водоподъемной машины с глубиной шахты 102,4 м; отработавшая вода поступала в канал длиной 320 м для подачи воды к четвертому водяному колесу диаметром 16 м Вознесенской водоподъемной машины с глубиной шахты 60 м и одновременно Вознесенской рудоподъемной машины; отработавшая вода стекала по водотводу длиной 1050 м в р. Змеевку; в этот же водоотвод сливалась вода, откачиваемая насосами из шахт. Общая длина пути движения воды от водозабора до водосброса составляла 2200 м. Комплекс сооружений, построенный

К. Д. Фроловым исключительно из местных материалов: дерева, глины, камня, железа, проработал без существенных изменений около ста лет. Плотина Змеиногорского рудника высотой 18 м, длиной по гребню 128 м, шириной 12 м сохранилась до настоящего времени.

Предшественники современных гидротурбин

Гидравлические турбины являются более совершенными двигателями, чем водяные колеса: во-первых, потому что они легко могут быть применены при малых расходах и больших напорах, и, во-вторых, они дают больший КПД.

Первые гидротурбины были по существу усовершенствованными водяными колесами с добавлением следующих элементов:

- направляющего аппарата;
- создание осевого или радиального направления движения воды в турбине;
- использование реактивной и активной части энергии воды.

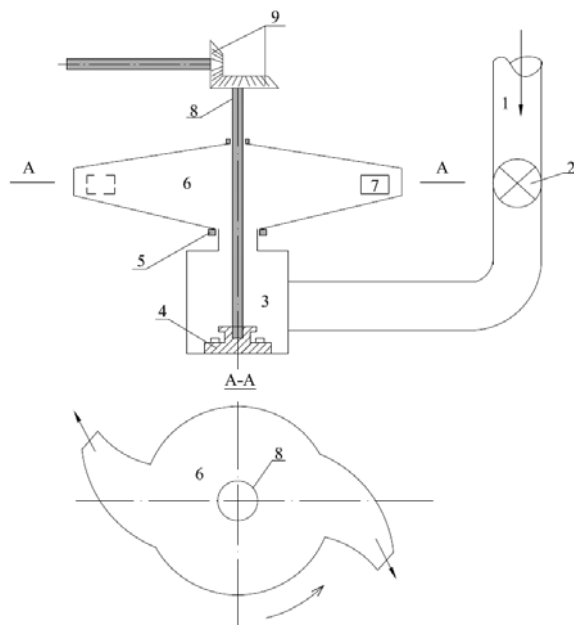


Рис. 7. Схема турбины без направляющего аппарата шотландского типа: 1 — труба; 2 — затвор; 3 — камера; 4 — подпятник; 5 — подшипник; 6 — колесо; 7 — отверстия для излива воды; 8 — вал; 9 — зубчатая передача

В качестве примеров рассмотрим несколько типов первых гидравлических турбин.

Турбина без направляющего аппарата шотландского типа (рис. 7). Вода при открытии затвора по трубе поступает в коробку (камеру). На коробку одевается колесо с подшипником, способное вращаться с легким трением. Колесо укрепляется на валу, который опирается на подпятник и проходит через

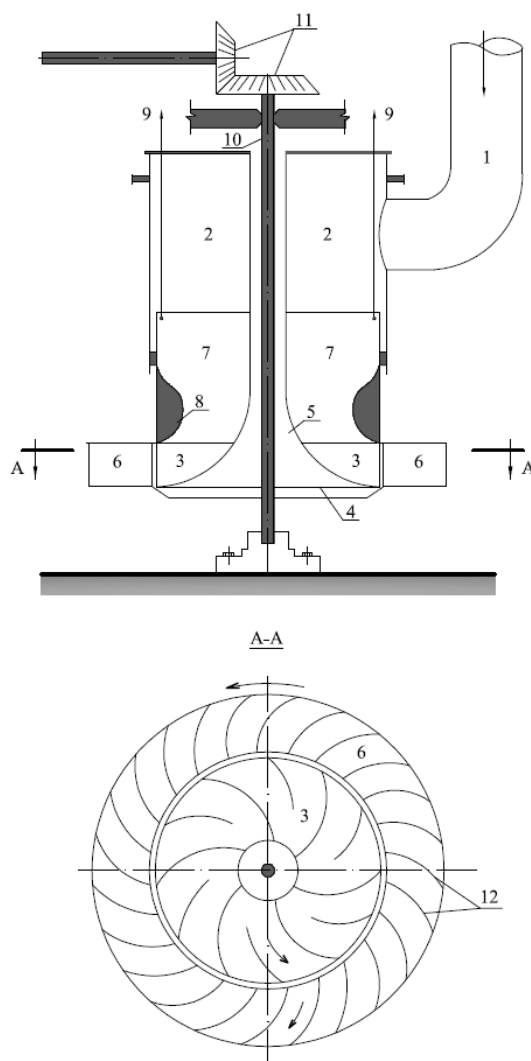


Рис. 8. Схема турбины с направляющим аппаратом конструкции Фурнейрона:

- 1 — напорная труба; 2 — подводящий цилиндр;
- 3 — направляющий аппарат; 4 — днище колеса;
- 5 — средняя труба; 6 — колесо турбины;
- 7 — кольцевой цилиндр; 8 — верхнее очертание направляющего аппарата; 9 — тяги кольца;
- 10 — вал; 11 — зубчатая передача;
- 12 — лопатки турбины

подшипник. Вал передает вращение с помощью конических зубчатых колес на горизонтальный вал. Вода, изливаясь из отверстий, производит работу своей реакцией. КПД этой турбины не более 40 %.

Турбина радиальная с направляющим аппаратом конструкции Фурнейрона (рис. 8) состоит из подводящего цилиндра, в который вода поступает из напорной трубы. Далее вода поступает в направляющий аппарат, который, состоит из ряда искривленных лопаток (одни из них более длинные, другие — короткие). Все лопатки открыты сверху, а снизу укреплены на днище колеса. Днище соединяется посредством средней трубы с верхней крышкой турбины. В кольцеобразном зазоре между направляющим аппаратом и колесом турбины можно для регулирования расхода воды поднимать и опускать посредством тяг жестяной цилиндр (кольцевой щит). Внутри этого цилиндра укреплены куски дерева, входящие между каждыми двумя направляющими лопатками и дающие надежное направление кольцевому щиту. Они являются верхним очертанием направляющего аппарата, из которого вода выходит через отверстия в колесо турбины в горизонтальном направлении. Колесо турбины имеет лопатки, изогнутые в противоположную сторону изгиба лопаток направляющего аппарата.

Колесо турбины связывается посредством дна в одно целое с осью турбины. Эта ось опирается на подпятник и проходит сквозь среднюю трубу так, что вода не может из турбины вливаться в эту трубу и, следовательно, ось остается сухой. От оси движение передается посредством зубчатых колес на рабочий вал. Вода, изливаясь струями из направляющего аппарата, давит на вогнутые части лопаток турбины, вследствие чего колесо вращается в сторону, указанную стрелкой. Лопатки рассчитываются так, чтобы вода входила в колесо по направлению лопаток (в относительном движении), и скорость колеса берется такая, чтобы вода выходила из него почти без абсолютной скорости. Турбина работает хорошо и имеет высокий КПД только при том расходе, на который она рассчитана.

Турбина осевая с направляющим аппаратом конструкции Жонваля

Особенность устройства этой турбины — наличие всасывающей трубы, что позволяет расположить турбину над уровнем воды (рис. 9). Турбина имеет верхний резервуар, в который поступает вода из реки. К этому резервуару приделывается всасывающая труба, в верхней части которой укреплен всасывающий аппарат. Сквозь середину направляющего аппарата проходит вал колеса турбины, причем отверстия в колесе турбины располагаются напротив отверстий направляющего аппарата. Ось ставится на подпятник, который помещается или внизу трубы, или в самой трубе на особых опорах. Вверху ось сцепляется посредством конических зубчатых колес с горизонтальным валом. Расход воды, притекающий к колесу, регулируется щитом между трубой и отводным каналом. Вода, двигаясь по направлению оси между лопатками направляющего аппарата, ударяет

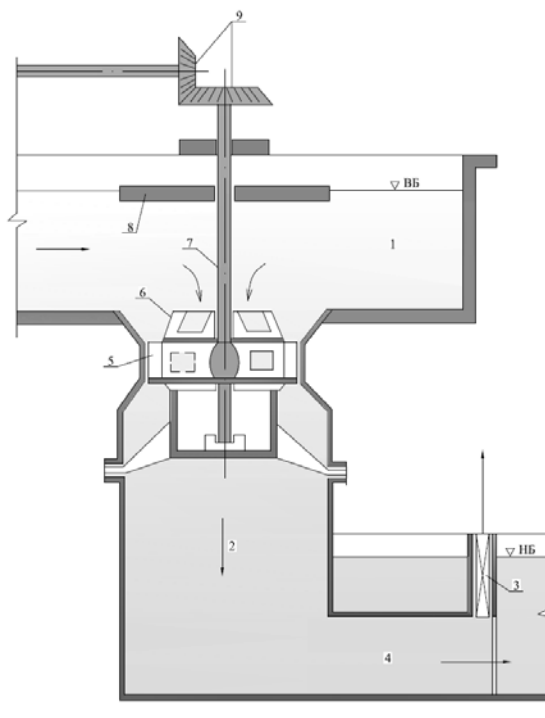


Рис. 9. Схема турбины с направляющим аппаратом конструкции Жонваля:

- 1 — верхний резервуар; 2 — всасывающая труба;
- 3 — подъемный щит; 4 — отводной канал;
- 5 — колесо турбины; 6 — всасывающий аппарат;
- 7 — вал; 8 — деревянный поплавок;
- 9 — зубчатая передача

в противоположные изогнутые лопатки колеса турбины и заставляет его вращаться справа налево. Для обеспечения спокойной поверхности воды в подводящем ларе над колесом опускается деревянный поплавок. Турбина Жонваля дает высокий КПД.

Турбина осевая с направляющим аппаратом без всасывающей трубы конструкции Фонтена применяется при небольшом напоре, но при большом расходе воды (рис. 10). Она состоит из направляющего аппарата, который размещается в нижней части турбины. Из него вода входит в колесо турбины. Лопатки направляющего аппарата и колеса турбины такие же, как и в турбине Жонваля. Колесо связано в одно целое с трубчатой осью, которая надевается на неподвижный костыль. Трубчатая ось оканчи-

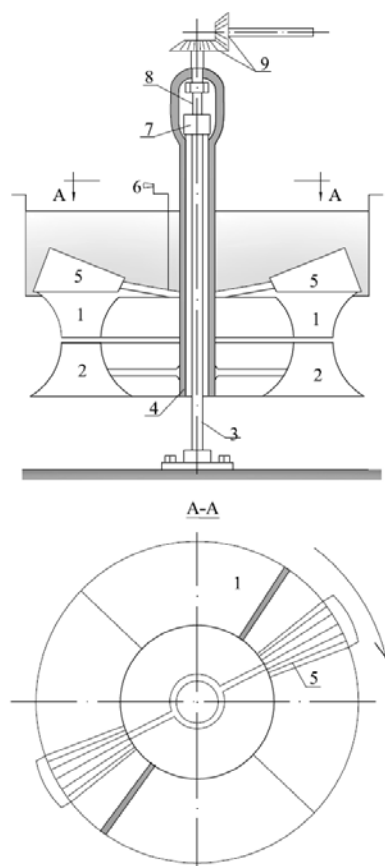


Рис. 10. Схема турбины с направляющим аппаратом конструкции Фонтена:

- 1 — направляющий аппарат;
2 — колесо турбины; 3 — неподвижный костыль;
4 — трубчатая ось; 5 — конусы турбины;
6 — рукоятка конуса; 7 — подпятник; 8 — пяту;
9 — зубчатая передача

вается в верхней части вертикальным кольцом, на котором укреплен пяту. Она опирается на подпятник, устроенный на костыле, что удобно для подачи смазки сверху. Кольцеобразные кожаные ленты укрепляются одним своим концом на направляющем аппарате, а другим наматываются на конусы. Если двигать конусы по направлению, указанному стрелкой, то кожаные ленты разворачиваются и закрывают несколько отверстий в направляющем аппарате, чем и достигается регулирование расхода. Конус приводится в движение рукояткой.

Турбина Цуппингера относится к парциально-радиальным, в которых вода впускается не по всей окружности колеса, а только по некоторой ее части (рис. 11). Вода подается по напорной трубе и поступает в направляющий аппарат, который обычно имеет только три канала, ограниченные кривыми лопатками. Из направляющего аппара-

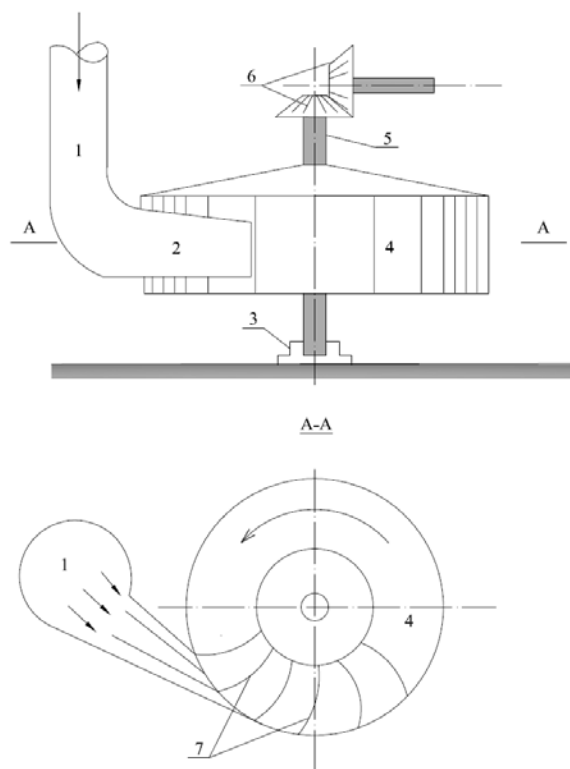


Рис. 11. Схема турбины Цуппингера:

- 1 — напорная труба;
2 — направляющий аппарат; 3 — подпятник;
4 — колесо турбины; 5 — вал;
6 — зубчатая передача;
7 — лопатки турбины

та вода поступает внутрь колеса турбины и, двигаясь между его лопатками, заставляет колесо вращаться в направлении, указанном стрелкой. При этом вода движется только в нескольких каналах колеса турбины. Части колеса, отходящие от направляющего аппарата, движутся без воды. Вода в этой турбине проливается внутри колеса; имеются варианты таких колес, в которых отработавшая вода отбрасывается назад к внешней части его окружности вследствие действия центробежной силы. Вертикальная ось колеса опирается на подпятник и имеет на верхнем конце коническое зубчатое колесо, передающее движение горизонтальному рабочему валу. Для регулирования расхода воды перед направляющим аппаратом устанавливается подвижный затвор.

Турбина Жерара относится к типу активных, так как вода движется в колесе в условиях действия атмосферного давления (рис. 12). Вода подается по напорной трубе в направляющий аппарат и поступает в нижнюю часть турбины с горизонтальной осью вращения. Особенность турбины состоит в устройстве лопаток колеса. Лопатки омываются водой, и к ним сбоку по направлению, параллельному колесу турбины, входит атмосферный воздух. Такое устройство обеспечивает хорошую работу турбины при разных расходах воды. Ось колеса турбины устанавливается на двух подшипниках, из которых один помещен перед колесом, а другой ставится на направляющем аппарате. Расход воды регулируется при помощи специальных клапанов, расположенных в верхней части колеса турбин.

В приведенных типах гидротурбин ставилась задача увеличения момента вращения на валу турбины и, следовательно, увеличе-

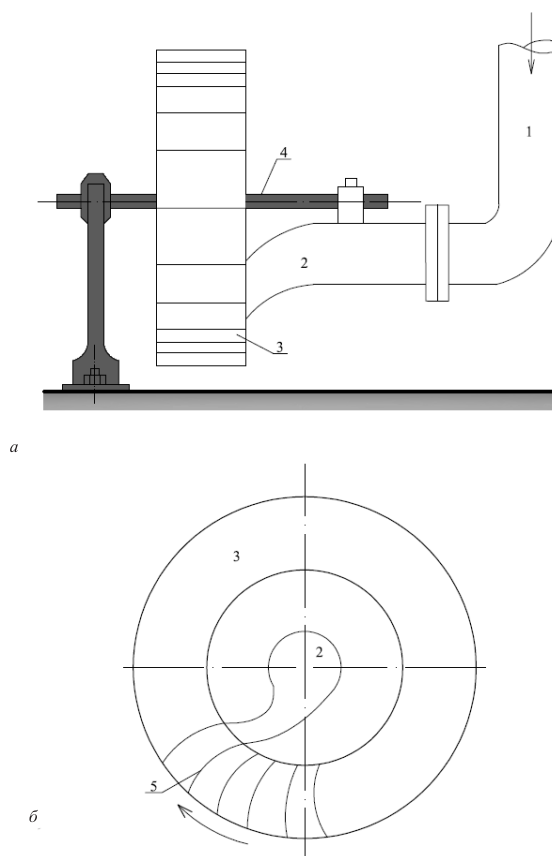


Рис. 12. Турбина Жерара:

а — схема турбины; б — план лопаток:

1 — напорная труба; 2 — направляющий аппарат;
3 — колесо турбины; 4 — вал; 5 — лопатки

ния момента вращения на рабочем валу. После изобретения генератора электрической энергии гидротурбина явилась основой создания гидроэлектростанций (ГЭС). Генератор монтируется на валу турбины. Первая в России ГЭС была построена в 1892 г. на Зыряновском руднике на Алтае (р. Березовка). На ГЭС были установлены четыре гидротурбины общей мощностью 150 кВт.

Список литературы

1. Жуковский Н. Е. Полное собрание сочинений. Лекции. — М.; Л.: Гос. изд-во оборонной пром-сти, 1939. — Вып. 4. — 460 с.
2. Данилевский В. В. История гидросиловых установок России до XIX века. — М.; Л.: Госэнергоиздат, 1940. — 208 с.
3. Использование водной энергии / под ред. Д. С. Щавелева. — Л.: Энергия, 1976. — 655 с.

4. Гидроэлектрические станции / под ред. В. Я. Карелина. — М.: Энергоатомиздат, 1987. — 464 с.
5. Ганеев А. М., Кононов В. В. История гидротехники и гидротехнического факультета СПГУВК: учеб. пособие. — СПб.: СПГУВК, 2006. — 213 с.
6. Боярский В. М. Строительное дело и гидротехника. История развития: учеб. пособие. — СПб.: СПГПУ, 2007. — 250 с.

УДК 627.7

В. М. Кириллов,
д-р техн. наук, профессор,
СПГУВК;
П. А. Романов,
СПГУВК

СРАВНЕНИЕ ОТЕЧЕСТВЕННЫХ И ЕВРОПЕЙСКИХ МЕТОДИК РАСЧЕТА БОЛЬВЕРКОВ

COMPARISON OF HOME AND EUROPEAN DESIGN PROCEDURES OF BULWARKS

Сопоставляются результаты расчетов напряженно-деформированного состояния лицевой стенки бульверка по российским и европейским нормам. Показано заметное различие в расчетах.

The authors compare the results of deflected mode calculation for a bulwark wall in accordance with Russian and European standards. They show the evident difference in calculations.

Ключевые слова: бульверк, грунты, сопротивления, надежность, изгибающий момент.
Key words: bulwark, soils, resistance, reliability, bending moment.

Введение

В странах ЕС окончательная редакция текста ЕК7 [1] принята в 2003 г., причем еврокоды приобретают статус национальных стандартов. Представляется целесообразным унифицировать отечественные документы с общеевропейскими аналогично тому, как это сделано применительно к расчету оснований и фундаментов мелкого заложения [2].

Одной из актуальных задач портовой гидротехники является проектирование бульверков с заданной свободной высотой H под действием проектной эксплуатационной нагрузки. Как СНиП 2.06.07-87 [3], так и ЕК7 формулируют эту задачу одинаково: не допустить потери основанием несущей способности, а сооружением — устойчивости, и, кроме этого, горизонтальные перемещения лицевой

стенки не должны превышать заданной предельной величины.

1. Показатели грунтов

В отечественных расчетах оснований показатели грунтов определяются согласно СНиП 2.02.02-85 [4].

В ЕК7 [1] проектное значение X_d свойства грунта вычисляется через характеристическое значение X_k , определяемое по результатам испытаний с доверительной вероятностью 0,95. Связь между X_d и X_k имеет вид

$$X_d = X_k / \gamma_i, \quad (1.1)$$

где γ_i — частные коэффициенты надежности: γ_F — по нагрузкам; γ_R — по сопротивлению; γ_M — по грунту. Следовательно, требования к доверительной вероятности характери-

ческих значений c , ϕ , E и плотности грунта g такие же, как к доверительной вероятности показателей грунта по 1-й группе предельных состояний в [4], то есть X_K в ЕК7 эквивалентно X_I в [4]. Это значит, что статистические показатели неоднородности свойств грунта, учитываемые в СНиП [4] коэффициентом надежности по грунту, в ЕК7 учтены заранее. Дополнительно вводимые коэффициенты надежности γ_F и γ_R учитывают вероятность других неблагоприятных обстоятельств, например погрешности в принятой модели грунта.

2. Расчеты

Отечественные расчеты больверка по 1-му и 2-му предельным состояниям выполняются с учетом требований, изложенных в [4–6].

Расчеты по ЕК7 [1] также предусматривают две проверки.

2.1. Проверка сопротивления при предельных значениях свойств конструкции и грунта

Рассматривая ситуацию предельного значения при разрушении, необходимо удовлетвориться, что

$$E_d \leq R_d, \quad (2.1)$$

где E_d — проектное значение влияния воздействия (расчетное значение действующей обобщенной силы или деформации); R_d — проектное значение сопротивления воздействию (расчетное значение обобщенной силы предельного сопротивления).

Левая часть неравенства (2.1) должна удовлетворять уравнениям:

$$E_d = E \left\{ \gamma_F \cdot F_{REP}; X_K / \gamma_M \right\}, \quad (2.2)$$

$$\text{или } E_d = \gamma_F \cdot E \left\{ F_{REP}; X_K / \gamma_M \right\}, \quad (2.3)$$

где F_{REP} — представительное значение воздействия (постоянная плюс временные и особые нагрузки).

Правая часть неравенства (2.1) устанавливается из уравнений:

$$R_d = R \left\{ \gamma_F \cdot F_{REP}; X_K / \gamma_M \right\}, \quad (2.4)$$

$$\text{или, } R_d = R \left\{ \gamma_F \cdot F_{REP}; X_K \right\} / \gamma_R \quad (2.5)$$

$$\text{или } R_d = R \left\{ \gamma_F \cdot F_{REP}; X_K / \gamma_M \right\} / \gamma_R. \quad (2.6)$$

Выбор того или иного из вариантов (2.2)–(2.6) зависит от традиций геотехнических школ разных европейских стран. Знак равенства в (2.1) способствует наиболее экономичному решению. Учет зависимостей (2.2)–(2.6) дает наиболее неблагоприятную конкретизацию (2.1) в виде

$$\gamma_F \cdot F_{REP} = R \left\{ X_K / \gamma_M \right\} / \gamma_R. \quad (2.7)$$

ЕК7 допускает 3 проектных подхода при рассмотрении (2.7). Каждому подходу соответствует свой набор частных значений коэффициентов надежности. В большинстве европейских стран предпочитают ограничиваться вариантом, включающим набор коэффициентов надежности A1 и M2 (см. табл. 1). При этом необходимо убедиться, что предельное состояние не возникает при наборах коэффициентов как A1, так и M2 или R2.

Таблица 1

Частные коэффициенты надежности по		Набор коэффициентов		
		A1	M2	R2
нагрузке γ_F		1,35	1,00	1,00
сопротивлению γ_R		1,00	1,00	1,40
грунту γ_M	углу внутреннего трения γ_ϕ^*	1,00	1,25	1,00
	сцеплению γ_c	1,00	1,25	1,00
	удельному весу γ_γ	1,00	1,00	1,00
*Коэффициент γ_ϕ применяется к значению $tg\phi$				

В наборе А1 запас вводится в нагрузки, а уравнение (2.7) в предельном состоянии принимает вид

$$F_{REP} = R \left\{ \frac{X_K}{\gamma_F} \right\}. \quad (2.8)$$

В наборе М2 запас вводится в параметры прочности грунта. В этом случае уравнение (2.7) конкретизируется как

$$F_{REP} = R \left\{ \frac{X_K}{\gamma_M} \right\}. \quad (2.9)$$

Значения активного и пассивного давлений грунта вычисляются по Кулону с углом трения о стенку $\delta \leq \frac{2\varphi}{3}$. Коэффициенты распора и отпора определяются по формулам Мюллера–Бреслау с коэффициентом надежности $\gamma_M = 1,05$. Активное давление грунта считается реализуемым, если перемещение шпунта $u > 0,0005H$. При $u \leq 0,0005H$ стена считается несмещаемой.

2.2. Проверка эксплуатационной надежности

Для проверки предельных состояний эксплуатационной надежности грунта и сооружения необходимо, чтобы

$$E_d \leq C_d, \quad (2.10)$$

где C_d — предельное значение горизонтального перемещения больверка.

В этих расчетах предполагается, что перемещение C_d может вызвать разрушение прилегающих конструкций и коммуникаций или спровоцировать недопустимую разность осадок подкрановых путей. Расчеты по (2.10) выполняются при коэффициентах надежности $\gamma = 1,0$ с характеристическими показателями грунтов, которые всегда меньше нормативных значений (см. п. 1).

3. Результаты расчетов

3.1. Исходные данные

Металлический больверк с одним ярусом анкеровки.

Лицевая стенка из шпунта типа Ларсен; свободная высота — 10 м. Отметки территории, точки крепления анкера к лицевой стенке, акватории и дна соответственно равны 3,0, 0,5, 0,0 и (–7,0) м. Эксплуатационных нагрузок на территории причала, а также волновых, ледовых и нагрузок от судов нет. Характеристики грунтов основания (песок мелкий) и засыпки (песок средней крупности) приведены в табл. 2 (K — коэффициент пропорциональности в контактной модели грунта). В числителе этой таблицы указаны значения удельного веса грунта над водой, а в знаменателе — под водой.

Таблица 2

Вид грунта	По СНиП 2.02.02-85						По ЕК7				
	$\varphi_{II} = \varphi_{II'}$ град.	$\varphi_{I'}$ град.	$C_{II} = C_I = C_{II'}$ кПа	$\gamma_{II'}$ кН/м ³	$\gamma_{I'}$ кН/м ³	$K_{II'}$ кН/м ⁴	φ_K град.	$\varphi_{d'}$ град.	$C_K = C_{d'}$ кПа	$\gamma_K = \gamma_{d'}$ кН/м ³	K_K кН/м ⁴
Песок средней крупности	35	30	0	$\frac{18,0}{10,2}$	$\frac{15,0}{8,5}$	5000	30	25	0	$\frac{15,0}{8,5}$	4170
Песок мелкий	30	26	0	$\frac{—}{9,96}$	$\frac{—}{8,3}$	5000	26	21	0	$\frac{—}{8,3}$	4170

Допустимые значения перемещений больверка составляют: на отметке 3,0 м — 8 см; на отметке 0,5 м — 7,2 см. Эти значения считаются предельными как в российских, так и в общеевропейских нормах. В странах ЕС для расчета больверков практикуется программа Msheet. Расчет по этой программе сравнивался с результатами расчетов по программе BOMAJN,

практикуемой в ОАО «Ленморниипроект» в течение почти 40 лет.

3.2. Сравнение результатов расчетов

Сопоставительные результаты расчетов изгибающих моментов и горизонтальных перемещений лицевой стенки по обеим программам представлены на рис. 1.

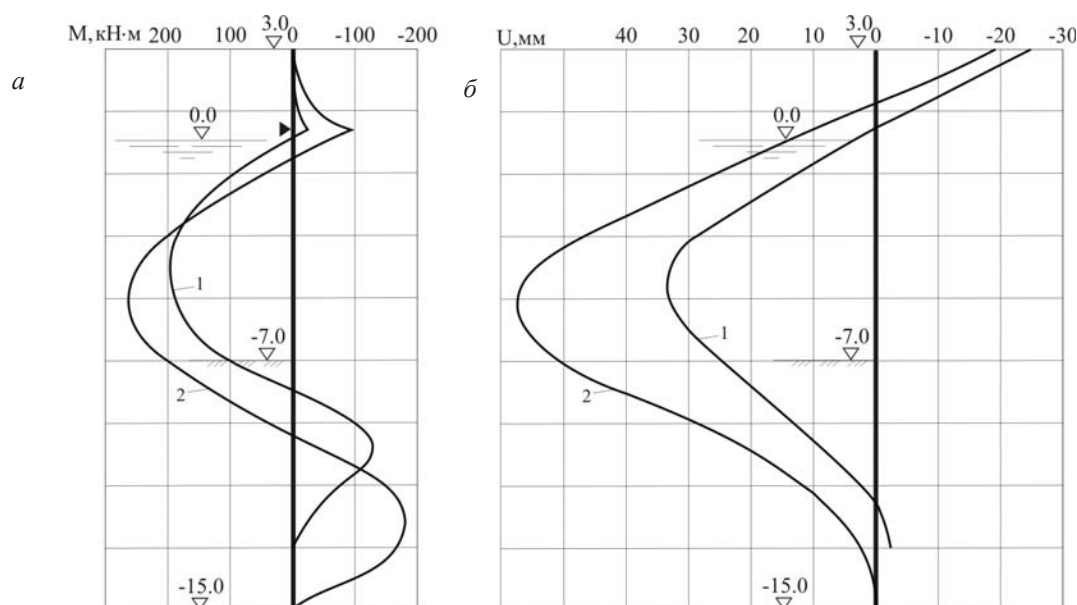


Рис. 1. Эпюры изгибающих моментов (а) и горизонтальных перемещений шпунтовой стенки (б) по результатам расчетов программы:
1 — BOMAJN; 2 — Msheet

Другие результаты сопоставительных расчетов указаны в табл. 3, из которой видно

преимущество проектирования по отечественным нормам и программе расчета.

Таблица 3

№ п/п	Показатель	Программа	
		MSheet	BOMAJN
1	Максимальный изгибающий момент в лицевой стенке, кН·м/м	262,6	201,1
2	Анкерное усилие, кН/м	200,2	140,6
3	Перемещение верха лицевой стенки, мм	19,0	25,1
4	Профиль шпунта лицевой стенки	L 604	L 703 10/10
5	Момент сопротивления шпунта, см ³ /м	1620	1340
6	Глубина погружения шпунта ниже дна, м	8,0	6,0
7	Вес 1 м ² лицевой стенки, кг/м ²	124,2	108

Наиболее показательным является сравнение веса 1 м² лицевой стенки как наиболее дорогого элемента больверка. Учитывая также разницу в длине шпунта на 2,0 м и в значениях анкерных усилий на 42 % (см. п. 2 в табл. 3), можно утверждать, что стоимость основных элементов набережной — лицевой стенки, анкерной опоры и анкерных тяг, безусловно, будет дешевле в России, чем в странах ЕС.

Выводы

1. В целом рассмотренное сопоставление расчетов показало заметное различие в подходах российских норм и ЕК7. Европейские нормы более осторожны при назначении свойств грунтов. Даже характеристические значения, в противовес нашим нормативным параметрам, определяются с обеспеченностью 95 % (то есть с коэффициентом

надежности 1,2). Частные коэффициенты надежности (по грунту, нагрузкам, напряжению) вводятся отдельно, что гарантирует значительный запас несущей способности основания.

2. ЕК7 разработан за 30 лет, но внедрен только в 2003 г. Будет ли способствовать внедрение ЕК7 долговечности сооружений и тем самым снижению их стоимости за весь период эксплуатации причалов? Это вопрос.

Список литературы

1. BS EN 1997-1:2004. Еврокод 7: Геотехническое проектирование. — Ч. 1: Общие правила. Лицензированный экземпляр: RRICTISQ, ISO / Обмен Россия, 3 августа 2005 г., внегосударственный экземпляр, (C) Bsi. — 171 с.
2. Фадеев А. Б., Лукин В. А. Сопоставление методик СНиП и ЕК7 при расчете оснований фундаментов мелкого заложения / ОФМГ. — 2006. — № 4. — С. 19–24.
3. СНиП 2.06.07-87. Подпорные стены, судоходные шлюзы, рыбопропускные и рыбозащитные сооружения / Госстрой СССР. — М.: Госстрой СССР, 1986. — 45 с.
4. РД 31.31.55-93. Инструкция по проектированию морских причальных и берегоукрепительных сооружений. — М.: Федеральная служба морского флота России, 1996. — 259 с.
5. Проектирование причальных набережных: пособие к СН-РФ 54.1-85. — М.: Гипроречтранс, 1991. — Кн. 2. — 108 с.

УДК.537

А. В. Котляков,
канд. географ. наук, ст. науч. сотр.,
Институт водных проблем РАН,
(Москва);

Е. М. Шумакова,
канд. техн. наук,
Институт водных проблем РАН
(Москва);

С. А. Артемьев,
Институт водных проблем РАН
(Москва)

МЕТОДИКА РАСЧЕТА БЕРЕГОВЫХ ДЕФОРМАЦИЙ В НИЖНЕМ БЬЕФЕ ГЭС С УЧЕТОМ ВИБРАЦИОННОЙ НАГРУЗКИ ГИДРОУЗЛА

THE ACCOUNT METHOD OF BANK DEFORMATIONS IN THE LOWER POOL OF THE POWER PLANT UNIT CONSIDERING OF VIBRATIONAL LOAD ON THE WATERWORKS FACILITY

Предлагается методика расчета береговых деформаций с учетом вибрационных колебаний, возникающих при пусках гидроузлов

The account method of bank deformations considering of onset of vibrations from downstream flow waves is proposed.

Ключевые слова: береговые деформации, гидроузел, волновые процессы, вибрация, усталость грунта.

Key words: bank deformations, waterworks facilities, wave processes, vibration, soil fatigue.

С ОСТОЯНИЕ берегов на реках с зарегулированным стоком, в том числе в пределах крупных городов, принимает местами катастрофический характер в связи с сильными размывами, которые наблюдаются там, где принятые в настоящее время методики позволяют оценивать деформации как незначительные. С другой стороны, показано, что в размыве берегов и разрушении прибрежной зоны к факторам, обычно считающимся основными при расчете береговых деформаций, добавляются другие, недостаточно исследованные процессы [2].

Вторая особенность волновых процессов, сопровождающих попуски, например в районе Жигулевской ГЭС, — интенсивные микросейсмические колебания грунтов. Интенсивность микросейсмического воздействия в районе Жигулевской ГЭС полностью определяется мощностью попусков. Особый случай — ежегодный пропуск половодья через водосливную плотину ГЭС и распространение длинноволновых возмущений на большие расстояния с возникновением микросейсмических колебаний грунтов. В [2] показано, что интенсивность вибраций практически полностью определяется мощностью попусков.

Для оценки воздействия вибрации на береговые откосы можно использовать понятие усталости грунта. Береговые деформации зависят от устойчивости откоса, которая определяется, с одной стороны, изменением нагрузки, вызванной интенсивностью попусков и выявленными колебаниями грунтовых массивов, а с другой — изменением размывающей способности потока, определяемой как скоростью течения, так и характеристиками размываемого грунта [1].

Ввиду динамического и циклического воздействия на агрегаты грунта они отрываются при значительно меньших усилиях, чем необходимо при статических нагрузках. Поэтому за нормативное сопротивление следует принимать предел прочности на разрыв при динамической нагрузке C_y . Этот показатель ус-

танавливается по опытным данным усталости связных грунтов. При отсутствии достоверных данных допускается определять эту характеристику по приближенной зависимости от статического значения сцепления грунта.

Предел прочности на разрыв при динамической нагрузке C_y при отсутствии достоверных данных можно принять [3]:

$$C_y = 0,035C.$$

Уравнение предельного состояния агрегата можно записать так:

$$\frac{\eta_H}{m} \bar{\tau}_{v\Delta} = \bar{R}_d,$$

где характеристика надежности η_H :

$$\eta_H = 1 + \frac{\sqrt{\sigma_{v\Delta}^2 + \sigma_{R_d}^2}}{\bar{\tau}_{v\Delta}} \sqrt{-2 \ln \left(\frac{-\ln P}{\sigma_{v\Delta}^2 T \gamma} \right)}$$

и

$$\gamma = \frac{\sigma_{v\Delta}}{\sqrt{\sigma_{v\Delta}^2 + \sigma_{R_d}^2}},$$

где: P — вероятность появления превышения уровня сопротивляемости отрыву R_d ;

T — время появления вероятности P ;

$\sigma_{v\Delta}$, σ_{R_d} — соответственно среднее квадратическое отклонение суммарного напряжения отрыва $\tau_{v\Delta}$ и сопротивляемости отрыву R_d ;

$v\tau_{v\Delta}$ — число выбросов напряжений отрыва;

m — коэффициент условий работы агрегата (на изгиб и растяжение);

d — характерный размер частиц наносов;

$\tau_{v\Delta}$ находится из уравнения относительно самого себя:

$$\tau_{v\Delta} = - \frac{R_d}{1 + \frac{\sqrt{\sigma_{v\Delta}^2 + \sigma_{R_d}^2}}{\bar{\tau}_{v\Delta}} \sqrt{-2 \ln \left(\frac{-\ln P}{v_{v\Delta} T \gamma} \right)}}$$

— суммарное напряжение отрыва.

Преобразовав уравнение предельного состояния грунта, получим зависимости для донных и средних скоростей:

$$v_{\Delta H_{дон}} = 1,25 \sqrt{\frac{2m}{2,6\rho_0\eta_H} ((\rho_z - \rho_0)gd + 1,25C_y^H)},$$

$$v_{H_{дон}} = \left(\lg \frac{8,8H}{d} \right) \sqrt{\frac{2m}{2,6\rho_0\eta_H} ((\rho_z - \rho_0)gd + 1,25C_y^H)}.$$

Аналогично можно вывести формулу для допускаемых скоростей для несвязных грунтов:

$$v_{\Delta H_{дон}} = 1,25 \sqrt{\frac{2m}{0,44\rho_0\eta_H} ((\rho_z - \rho_0)gd)}.$$

Повышение вероятности безотказной работы P приводит к снижению значения неразмывающей скорости. Если усталостная прочность уменьшается или исключается, то допустимые неразмывающие скорости возрастают. Следовательно, неучет динамической нагрузки неизбежно приведет к переформированию берегового массива за счет неправильного прогноза допустимых скоростей.

С помощью полученных формул, используя характеристику, являющуюся функцией надежности, можно установить допуска-

емые неразмывающие скорости течения водного потока, которые обеспечат безотказную работу размываемого основания с заданной надежностью с вероятностью P .

Как можно видеть, предложенные зависимости дают возможность определять допустимое время воздействия размывающего потока T . Чем меньше эта величина, тем более высокие значения скоростей течения можно допускать. Эти зависимости позволяют рассчитывать размываемое основание с экономически обоснованной неразмываемостью и обоснованным риском.

Усталость грунта, которой особенно способствует динамическая нагрузка, приводит к уменьшению неразмывающей скорости и снижает вероятность «безотказной» работы сооружения (время эксплуатации).

Таким образом, предлагаемая методика рекомендует на время отсутствия утвержденных норм учитывать вибрационную нагрузку от работы ГЭС в виде уменьшения неразмывающей скорости из-за усталости грунта под воздействием динамической нагрузки.

Список литературы

1. Гришанин К. В. Динамика русловых потоков. — Л.: Гидрометеорологическое изд-во, 1969. — 427 с.
2. Котляков А. В., Шумакова Е. М., Артемьев С. А. Деформации береговой зоны в районе г. Тольятти и их связь с режимом работы Жигулевской ГЭС // Водные ресурсы. — 2007. — Т. 34, № 6. — С. 539–547.
3. Мицхулава Ц. Е. О надежности крупных каналов. — М.: Колосс, 1981. — С. 63–78.

МЕТОДЫ РАСЧЕТНОЙ ОЦЕНКИ РУСЛОВЫХ ДЕФОРМАЦИЙ
НА УЧАСТКАХ РЕКTHE METHOD OF EVALUATION OF CHANNEL DEFORMATIONS
ON RIVER REACHES

В статье предпринята попытка оптимальной оценки существующих методов расчета русловых переформирований, в том числе расхода влекомых и взвешенных наносов. Представлено современное состояние задачи численного моделирования русловых деформаций.

The attempt of the optimal assessment of existing account methods of channel deformations including bed load and suspended sediment discharges is made in paper. The current state of channel deformations numeral modeling is presented.

Ключевые слова: русловые деформации, математическое моделирование, вязкость потока, транспорт наносов.

Key words: bed deformations, mathematical modeling, flow viscosity, sediment transport.

РЕШЕНИЕ задачи расчета русловых деформаций речных потоков является чрезвычайно сложной по своему физическому содержанию. Решение включает расчет скоростного поля потока и собственно русловых деформаций. Одним из перспективных направлений решения задачи русловых переформирований является численное моделирование этих процессов.

Анализ обширной литературы позволил выявить достаточное количество появившихся к 1990-м гг. численных методов решения исследуемой задачи. Однако проблемным для всех этих методов оставался вопрос о способе учета в исходных уравнениях наличия турбулентности потока. Существуют различные подходы при постановке задачи моделирования водных потоков [1].

Одномерная задача. Уравнения одномерного движения жидкости в гидравлике могут быть записаны в двух видах: в виде закона сохранения энергии и в виде закона изменения количества движения. Для замыкания системы уравнений одномерной модели используется дополнительное уравнение баланса массы наносов.

Двухмерная задача. Двухмерная модель описывает плановое движение воды в открытом русле. При этом средние характеристики

потока (скорости) рассматриваются в проекции на горизонтальную координатную плоскость, на которую проектируется по вертикальному направлению область течения.

Трехмерная задача. Исходными системами уравнений являются уравнения движения вязкой жидкости Навье–Стокса или Рейнольдса в трехмерной сетке в виде системы гидродинамических уравнений [1]:

$$\begin{aligned} \frac{dV_x}{dt} - \nu \cdot \left(\frac{\partial^2 V_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V_x}{\partial z^2} \right) &= -\frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial x}, \\ \frac{dV_y}{dt} - \nu \cdot \left(\frac{\partial^2 V_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V_y}{\partial z^2} \right) &= -\frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial y}, \\ \frac{dV_z}{dt} - \nu \cdot \left(\frac{\partial^2 V_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V_z}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V_z}{\partial z^2} \right) &= -\frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial z}, \\ \frac{\partial V_x}{\partial x} + \frac{\partial V_y}{\partial y} + \frac{\partial V_z}{\partial z} &= -\frac{1}{\rho} \cdot \frac{dp}{dt}. \end{aligned} \quad (1)$$

Важным этапом является задание плотностных характеристик речного потока и в первую очередь его вязкости. Согласно современным представлениям о природе турбулентных процессов эффективная вязкость ν является алгебраической суммой кинематической μ_k и турбулентной μ_t вязкости. Сложность заключается в определении турбулентной вязкости. Анализ имеющегося опыта моделиро-

вания по литературным источникам показал, что на практике чаще всего встречаются два пути ее определения:

— упрощенный — когда все турбулентные характеристики задаются исследователем и принимаются равными некоторой величине;

— путем замены турбулентной вязкости коэффициентом турбулентного обмена, который по величине должен быть значительно больше, чем вязкость потока.

Многочисленные исследования турбулентной структуры потока показывают, что наиболее доступным способом определения характеристик турбулентности является использование классической k – ε модели для высоких (турбулентных) чисел Рейнольдса, которая включает уравнения переноса для энергии турбулентности k и ее величины диссипации ε [1].

Другим важным моментом является необходимость учета пристеночных шероховатых областей, где молекулярные эффекты и эффекты турбулентности становятся соизмеримыми. В этом случае обязательным является дополнение имеющейся модели турбулентности специальным алгебраическим выражением, называемым пристеночной функцией. Последняя описывает изменение скорости и турбулентной энергии в пограничном пристеночном слое.

При решении задачи деформации русла, кроме решения системы гидродинамических уравнений, необходимо разработать модель размыва и транспорта наносов.

Для «отслеживания» частицы грунта, влекомой по дну реки, наиболее эффективен метод объемного слежения статической сетки VOF-скаляра [1]. Согласно ей отдельные частицы слежения используются в каждой ячейке расчетной области. Расчетная же область разбивается на некоторое число непересекающихся контрольных объемов таким образом, чтобы каждая узловая точка содержалась в одном контрольном объеме. Основным фактором поступления VOF-скаляра в расчетную область при решении задачи размыва русла может быть изменение размывающих и донных скоростей течения потока.

Другим путем определения расхода наносов и тем самым решения задачи транспор-

та наносов может быть аналитический метод. При этом на практике обычно применяются эмпирические зависимости различных авторов, различающихся либо составом допущений, либо исходными предпосылками.

Полный транспорт наносов многими исследователями рекомендуется определять путем суммирования расходов взвешенных и влекомых наносов. Расход взвешенных наносов в общем случае вычисляется путем умножения средней мутности потока, отвечающей его транспортирующей способности (S_{mp}), на расход воды в расчетном створе. Для определения расхода влекомых наносов известно более 10 формул, широко применяемых в практике. Однако расчеты по ним приводят во многих случаях к большим количественным расхождениям. На практике наиболее часто применяются:

— формула ЛИВТа

$$q_T = 0,015 \cdot \left(\frac{V_{cp}}{V_0} \right)^3 \cdot d \cdot (V_{cp} - V_0); \quad (2)$$

— формула В. Н. Гончарова

$$q_T = 0,00121 \cdot \left(\frac{V}{V_0} \right)^3 \cdot d \cdot (V - V_0) \cdot \left(\frac{d}{T} \right)^{0,1}; \quad (3)$$

— формула И. И. Леви

$$q_T = 755 \cdot 10^{-6} \cdot \left(\frac{V}{\sqrt{qg}} \right)^3 \cdot d \cdot (V - V_0) \cdot \left(\frac{d}{T} \right)^{0,25}; \quad (4)$$

— формула И. В. Егiazарова

$$q_T = c \cdot \frac{(\lambda_T \cdot \lambda^2)}{(\lambda_T - \lambda)^2} \cdot \left[\frac{1 - 0,012(\lambda_T - \lambda) \cdot d}{c \cdot \lambda \cdot R \cdot I} \right] \cdot \frac{R \cdot I^{3/2} \cdot q}{d}; \quad (5)$$

— первая формула Х. А. Эйнштейна

$$q_T = 2,15\omega \cdot d \cdot e^{\left(\frac{-0,391 \cdot d \cdot (\lambda_T - \lambda)}{T \cdot \lambda \cdot I} \right)}; \quad (6)$$

— вторая формула Х. А. Эйнштейна

$$q_T = \frac{2,15\omega \cdot d}{e^{\left(\frac{156,4 \cdot d^{2/3} T^{1/3}}{V^2} \right)} - 1}; \quad (7)$$

— формула Доу Го-Жень

$$q_T = 0,0081 \cdot \left(\frac{d}{T}\right)^{1/8} \cdot \left(1 + 1,33 \left(\frac{d}{T}\right)^{1/8}\right) \cdot d \cdot \left(\frac{V}{V_0}\right)^3 \cdot (V - V_0); \quad (8)$$

— формула Г. И. Шамова

$$q_T = 358,5 \cdot 10^{-6} \cdot \left(\frac{d^{3/4}}{T^{1/4}}\right) \cdot \left(\frac{V}{V_0}\right)^3 \cdot (V - V_0); \quad (9)$$

— первая формула НИИВТа

$$q_T = 37,73 \cdot 10^{-6} \cdot \left(\frac{d}{T}\right)^{3/4} \cdot \left(\frac{V}{\omega^{3/2}}\right) \cdot (V - V_0)^{2,5}; \quad (10)$$

— вторая формула НИИВТа

$$q_T = 354,7 \cdot 10^{-8} \cdot \left(\frac{d}{T}\right)^{3/4} \times$$

$$\times \left(\frac{V^{3,5}}{\omega^{3/2} \cdot V_0^2}\right) \cdot (V - V_0)^{1/2} \quad (11)$$

Исследование данных зависимостей было проведено на примере Ревякского и Георгиевского перекатов реки Волга. Сравнительный анализ показал значительное расхождение результатов расчетов при одних и тех же исходных данных. Фактические же расходы влекомых наносов были взяты из отчетов русловых партий за соответствующие годы. Результаты проведенной оценки дают возможность рассматривать формулы Леви и НИИВТа как наиболее полно отражающие качественную сторону явления движения влекомых наносов из крупнозернистого грунта.

Список литературы

1. *Липатов И. В.* Гидродинамика речных потоков и ее влияние на эксплуатационные параметры судоходных гидротехнических сооружений: методология исследований: моногр. — Н. Новгород: Изд-во ФГОУ ВПО ВГАВТ, 2006. — 96 с.
2. *Гришанин К. В.* Основы динамики русловых потоков. — М: Транспорт, 1990.
3. *Караушев А. В.* Теория и методы расчета речных наносов. — Л.: Гидрометеиздат, 1977. — 286 с.

УДК 627.422

В. П. Зимичев,

канд. географ. наук, ст. науч. сотр.,
Арктический и антарктический научно-исследовательский институт
(Санкт-Петербург);

Д. Ю. Большианов,

д-р географ. наук, ст. науч. сотр.,
Арктический и антарктический научно-исследовательский институт
(Санкт-Петербург)УСЛОВИЯ СУДОХОДСТВА ЧЕРЕЗ ЛИМИТИРУЮЩИЕ БАРЫ В УСТЬЯХ
АРКТИЧЕСКИХ РЕК (ОБЬ, ХАТАНГА, КОЛЫМА)THE CONDITION OF NAVIGATION THROUGH THE LIMITED BARS IN MOUTHS
OF ARCTIC RIVERS (THE OB, THE KHATANGA, THE KOLYMA)

Представлены результаты натурных исследований устьевых баров рек Оби, Хатанги и Колымы. Анализ количественных и качественных закономерностей руслового режима и различных синоптических ситуаций позволил выявить ряд особенностей динамики баров, влияющих на условия судоходства.

The results of natural investigations of the mouth bars of The Ob River, The Khatanga River and The Kolyma River are presented. The quantitative and qualitative analysis of the channel pattern and different synoptically situations reveal some distinctive features of bars dynamics which affect on conditions of navigation.

Ключевые слова: судоходство, бары, устья, приливно-отливные течения, деформации.

Key words: navigation, ledges, mouths, tides, deformations.

ВХОДЕ исследований устьевых областей рек российской Арктики за почти 30-летний период изучены процессы формирования баров рек Оби, Хатанги и Колымы. Все рассматриваемые устья находятся в областях платформенного неотектонического режима со слабыми положительными (Обь, Хатанга) или отрицательными (Колыма) новейшими движениями земной коры. В конце позднего плейстоцена (25–18 тыс. лет назад), во время значительного падения уровня океана дельты рек продвигались на север. С поднятием уровня океана примерно на рубеже 6–7 тыс. лет назад они заняли положение, близкое современному. Позже небольшие колебания уровня океана приводили к миграции дельт на десятки и сотни километров. В предлагаемой статье приводятся результаты исследований деформаций баровых участков в многолетнем (современном), сезонном и синоптическом масштабах времени.

Ямсальский бар. На выходе в Обскую губу сформировались два главных бара р. Оби: в Хаманельской Оби — это Ямсальский бар, в Надымской Оби — Надымский

бар. С точки зрения вопросов освещения транспортно-судоходных операций на Оби больше внимания уделено изучению Ямсальского бара [1], который представляет собой рассредоточенные отмели, формирующиеся при активном взаимодействии речных и морских факторов.

В этой части акватории губы баровая бороздина переуглублена на 1,5–2,0 м по отношению к крыльям бара. Скорости течения в ней при нормальной синоптической обстановке небольшие — около 20–30 см/с, расходы воды — порядка 2,5–3,0 тыс. м³/с, расходы наносов — около 100 кг/с. При выходе на морской край дельты скорости течения в бороздине снижаются до значений менее 10 см/с.

В условиях резкого падения уровня воды на 1–2 м за 1–2 сут на крыльях бара смывается слой грунта до нескольких десятков сантиметров. Обычно это наблюдается при сгонах воды, при этом наблюдаются и характерные плановые деформации. Так, в краевой части бороздины происходит отклонение изобат на 5–6° к западу при усилении скорости потока и активном промыве фарватера.

Влияние приливо-отливных течений на динамику речного потока различно в зависимости от его расположения в акватории. На мористом траверсе направление течения потока при приливах меняется на противоположное, а на речном траверсе в этих условиях скорости снижаются вдвое и поток при этом частично отклоняется в сторону. По данным анализа промеров, выполняемых с 1920 г., можно сделать вывод о достаточно высокой стабильности рельефа бара в многолетнем временном масштабе, причем это можно сказать как о высотных, так и о плановых деформациях.

Хатангский бар. Баровая отмель (рис. 1), вытянутая с юго-запада на северо-восток, образуется в результате постоянных оборотных течений, меняющих свое направление при смене фаз приливов и отливов.

Амплитуда уровневых колебаний и время добегания пиков не постоянны, а имеют определенный диапазон изменчивости. В начальной стадии прилива у западного побережья залива происходит рост уровня воды, на противоположном берегу уровень воды

продолжает падать на завершающей стадии предшествующего отлива. Денивелизации уровня на траверсе гребня бара в результате этого эффекта достигают 1,5 м. Течения потока, образующиеся при этом, имеют противоположные направления на протяжении нескольких часов. При смене приливного цикла ситуация меняется. Таким образом, на фазе прилива вокруг баровой отмели образуется круговое вращение потока, которое меняет направление при отливах.

По краям обширной баровой отмели формируются бороздины. В левобережной бороздине во время прилива векторы течений и у дна, и в поверхностных горизонтах направлены в сторону реки. В результате поток с моря формирует вытянутую вдоль берега приливную бороздину глубиной 8–10 м. На границе слияния двух встречных потоков — речного и морского — формируется узкая вытянутая банка с глубинами до 4–5 м. Восточная приливная бороздина имеет менее четкие очертания с глубинами около 4 м и не со столь выраженными приливными потоками.

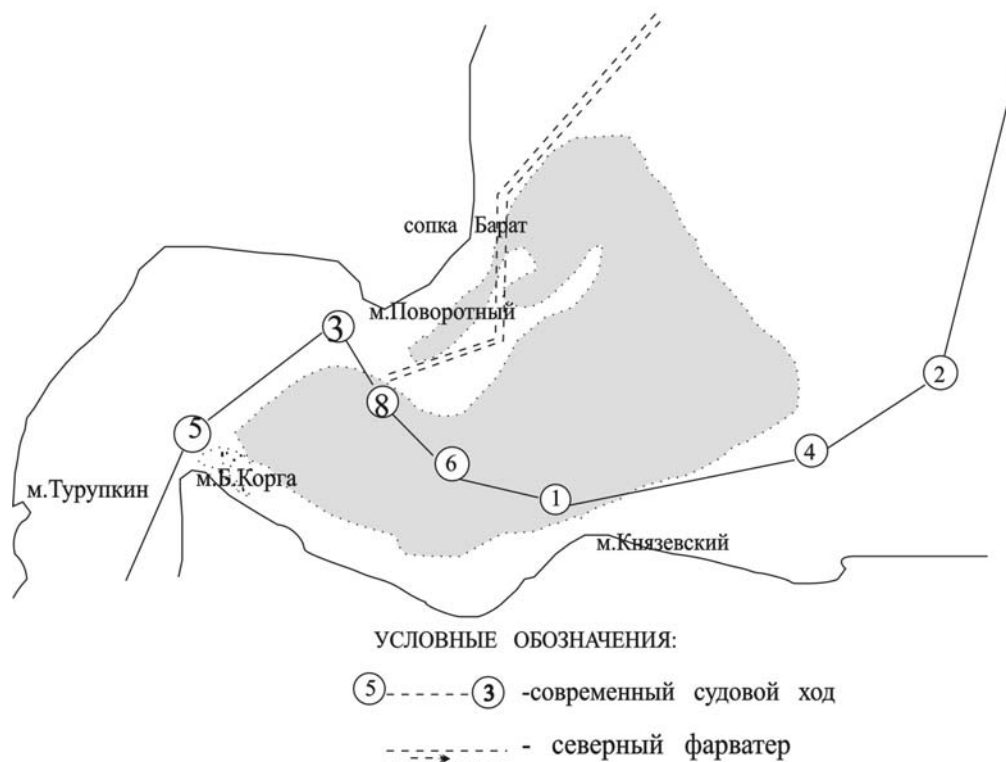


Рис. 1. Схема Хатангского бара и судовых ходов

Высотные деформации гребня бара в течение летнего сезона находятся в пределах 20–50 см. При преобладании сгонных или нагонных ситуаций происходит размыв баровой отмели и аккумуляция наносов в приустьевой яме. В подобных ситуациях колебания отметок дна на баре могут достигать 1 м. Сравнивая современные отметки глубин на гребне бара, приведенные к наименьшему теоретическому уровню, можно обнаружить тенденцию уменьшения лимитирующих судоходство глубин за последние десятилетия с 3,5 до 3,2 м. При такой тенденции судоводителям рекомендуется обратить внимание на судоходные глубины в районе западной приливной борозды, где лимитирующая глубина на 0,5 м больше, чем на гребне бара (рис. 1). Кроме того, «северный фарватер» имеет также преимущества по запасу глубин за счет большей амплитуды уровенных колебаний в этой части залива примерно на 0,4–0,6 м по сравнению с гребнем бара [2]. Следует также отметить, что раньше «северный фарватер» считался непроходимым [3].

Бар Каменной Колымы. Бар протоки Каменной — наиболее многоводной протоки дельты р. Колымы представляет собой аккумулятивную форму рельефа, слагаемую наносами реки и прорезанную извилистой

русловой бороздиной. В результате влияния руслового фактора здесь образовалась система устьевых перекатов с лимитирующими судоходство глубинами. С 1985 г. основным лимитирующим судоходство перекатом является перекат, сформированный в створе «Амбарчик». В половодье 1985 г. на этом перекате отложилось значительное количество наносов, уменьшивших судоходные глубины с 5,5 до 3,5 м (рис. 2). Последующие наблюдения показали, что данный перекат довольно стабилен и подвержен лишь незначительным (до 0,5–0,7 м) сезонным и синоптическим деформациям. Небольшие уклоны водной поверхности на акватории бара и в дельте обуславливают редкую повторяемость критических скоростей потока, способных размывать гребни баровых отмелей.

Таким образом, отмечая обусловленность процесса дельтоформирования взаимодействием морских и речных факторов, следует учитывать, что конкретные процессы формирования рельефа устьевых баров значительно отличаются даже в схожих устьевых областях. На баре р. Колымы процессы, лимитирующие судоходство, определяются речными факторами. На барах рек Хатанги и Оби морские факторы являются более значимыми.

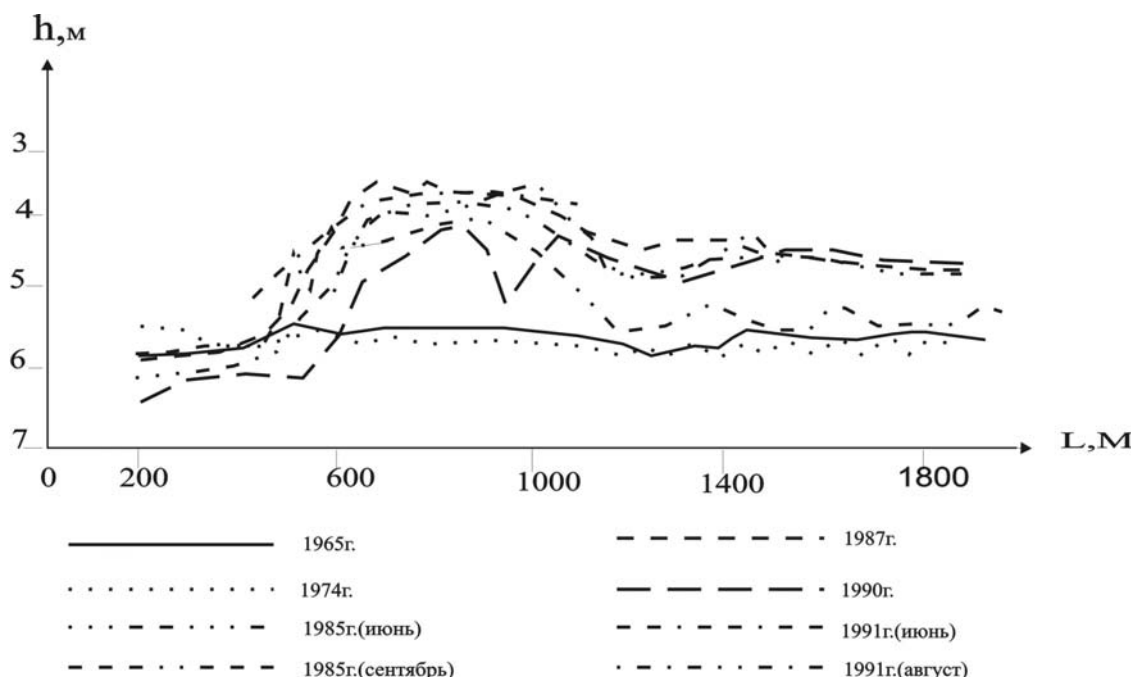


Рис. 2. Многолетние деформации в створе «Амбарчик»

Список литературы

1. Региональные особенности формирования эстуарно-дельтовых систем Арктического побережья Сибири / авт. кол. — М.: ГЕОС, 2007. — С. 112–240.
2. *Большаинов Д. Ю., Зимичев В. П.* Гидрологические и геоморфологические особенности динамики бара р. Хатанги // Геоморфология. — 1995. — № 2. — С. 89–99.
3. *Кухарский А. А.* Хатангский залив и устье р. Хатанги. — Л.: Изд-во Главсевморпути, 1937. — С. 47–65.

УДК 627.8.034.7

Б. Кхарел,
канд. техн. наук, доцент,
СПГУВК

ЗАИЛЕНИЕ ОРОСИТЕЛЬНЫХ КАНАЛОВ И ИСТИРАНИЕ ГИДРОАГРЕГАТОВ ГИДРОЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ В ГОРНЫХ РЕГИОНАХ

IRRIGATION CANALS SILTING AND HYDROPOWER UNITS ABRASION IN MOUNTAIN REGIONS

В статье приводятся характеристики рек Китая и Непала с учетом их мутности, а также указываются конкретные примеры негативных воздействий наносов на эксплуатацию различных гидротехнических сооружений и их элементов. Даются рекомендации для минимизации ущерба от влияния наносов.

The article gives characteristics of rivers in China and Nepal taking into account their turbidity, examples of negative influence of silts on maintenance of different hydraulic structures and their components. Recommendations to minimize the losses due to silts are given.

Ключевые слова: каналы, гидроэлектростанции, турбины, лопадки, наносы, кавитация.

Key words: canals, hydropower units, turbines, blades, silt, cavitation.

В СВЯЗИ с бурным ростом населения и экономики стран Азии этот регион сильно нуждается в энергоресурсах и продовольствии. Кроме водных ресурсов, газа и нефти в регионе очень мало. Регион активно использует водные ресурсы, строятся крупные комплексные гидроузлы. Самый большой в мире гидроузел Санься («Три ущелья») строится на реке Янцзы в Китае. При

строительстве гидроузлов различных назначений большое внимание приходится уделять удалению наносов.

Наличие больших скоростей течения потока в реках приводит к интенсивному размыву русел, и они транспортируют огромное количество взвешенных и донных наносов. Данные твердого стока на основных мутных реках мира приведены в табл. 1.

Таблица 1

Твердый сток на основных мутных реках мира

Государство	Река	Бассейн реки, (10 ³ км ²)	Годовой сток, (10 ⁹ м ³)	Твердый сток, (10 ⁹ Т)	Годовая концентрация наносов (мутность), (kg/м ³)	Твердый сток/площадь бассейна реки, (Т/км ²)
Китай	Хуанхэ	752,4	47,4	1,63	35,0	2126
США	Колорадо	637	4,9	0,135	27,5	211,9

Таблица 1
(Окончание)

Индия- Бангладеш	Ганг	955	371,0	1,541	3,92	1519
Египет- Судан	Нил	2978	89,	0,111	1,25	37,3
США	Миссисипи	3230	564,5	0,312	0,55	96,6

Все реки Непала несут с водой большой объем наносов, что обусловлено мягкими горными породами, слагающими русло рек (рис. 1). Установлено, что общие потери

грунтов от речной эрозии составляют более 250 млн т в год. Некоторое представление об объеме наносов в речных потоках Непала дает табл. 2.



Рис. 1. Река Кали Гандаки (приток р. Ганг) на отметке 2540 м надуровнем моря

Таблица 2

Площадь водосбора и мутности основных рек Непала

Река	Площадь водосбора, м ²	$\frac{\text{наносы}}{\text{вода}}, \frac{\text{м}^3}{\text{с}}$
Коши	50 000	1/420
Карнали	43 000	1/440
Гандаки	36 000	1/460
Рапти	3650	1/800

Крупные наносы, попадая в водохозяйственные сооружения (оросительные каналы, водоприемники, деривационные каналы гидроэлектростанций и т. д.), существенно влияют на их эффективную эксплуатацию. На рис. 2

проиллюстрировано заиливание оросительного канала после 3-летней эксплуатации.

Взвешенные наносы истирают облицовки деривационных и станционных водоводов, а также рабочие элементы гидротурбин.

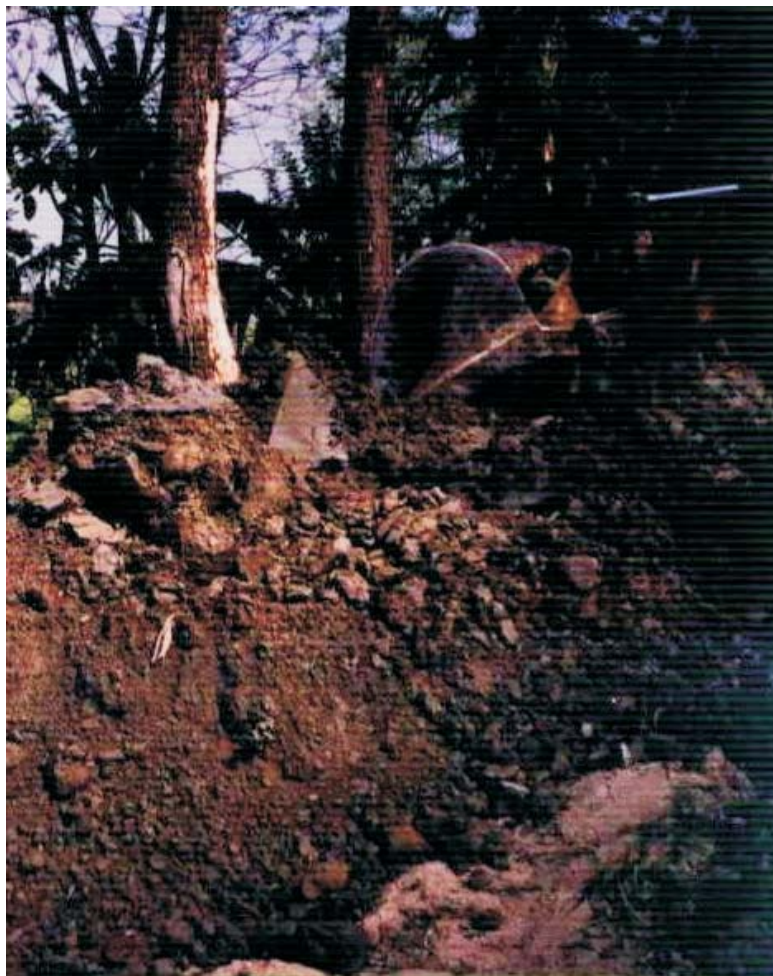


Рис. 2. Очистка канала от наносов в оросительной системе (г. Читван, Непал)



Рис. 3. Истирание и изнашивание лопастей турбины от наносов

Абразивный износ турбин приводит к значительному падению их КПД, а следовательно, снижению мощности и выработки энергии гидроэлектростанции, сокращению срока службы гидротурбинного оборудования, фрагмент износа показан на рис. 3. С целью уменьшения ущерба, вызываемого наносами, при проектировании ГЭС предусматриваются меры по защите сооружений и оборудования от проникновения в них опасных фракций наносов.

В связи с большим количеством наносов в потоке все непальские гидроэлектростанции оборудуются отстойниками. Для примера рассмотрим Гидроэлектростанцию Кхимти-I на горной реке Кхимти с установленной мощностью 60 Мвт (5×12 Мвт). Мутность реки

во время паводка составляет 10–11 кг/м³. Для осаждения 85 % наносов размером до 0,13 мм и 95 % размером 0,20 мм в составе гидроузла имеется двухкамерный отстойник с непрерывным промывом. Однако его работа оказалась недостаточно эффективной: после 6 тыс. ч эксплуатации ГЭС на элементах турбин появился эрозийный износ (рис. 4).

Выполненные лабораторные исследования движения наносов в реке Кхимти и в других реках Непала показали, что в них содержится большое количество кварцевых частиц размером меньше 0,13 мм, которые вызывали интенсивный износ оборудования ГЭС. Связь между содержанием кварцевых частиц и скоростью износа элементов гидротурбины приведена на рис. 5.

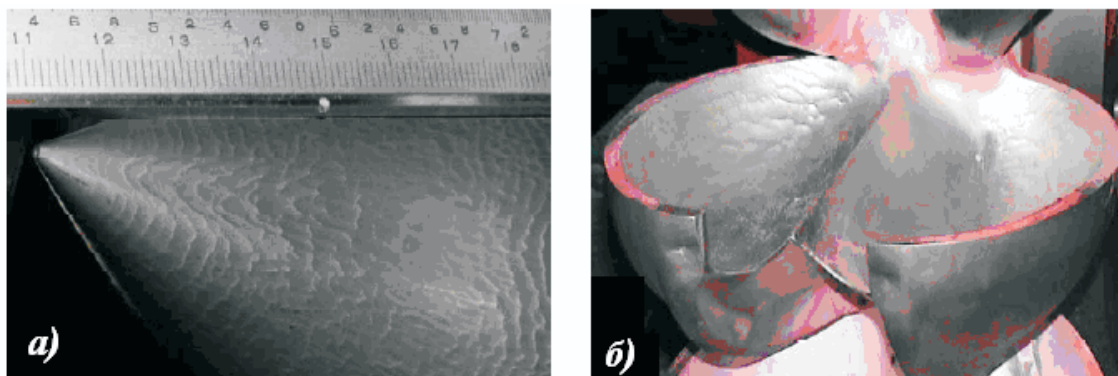


Рис. 4. Эрозийный износ элементов активной турбины ГЭС Кхимти-I:

a — конус; *б* — ковш

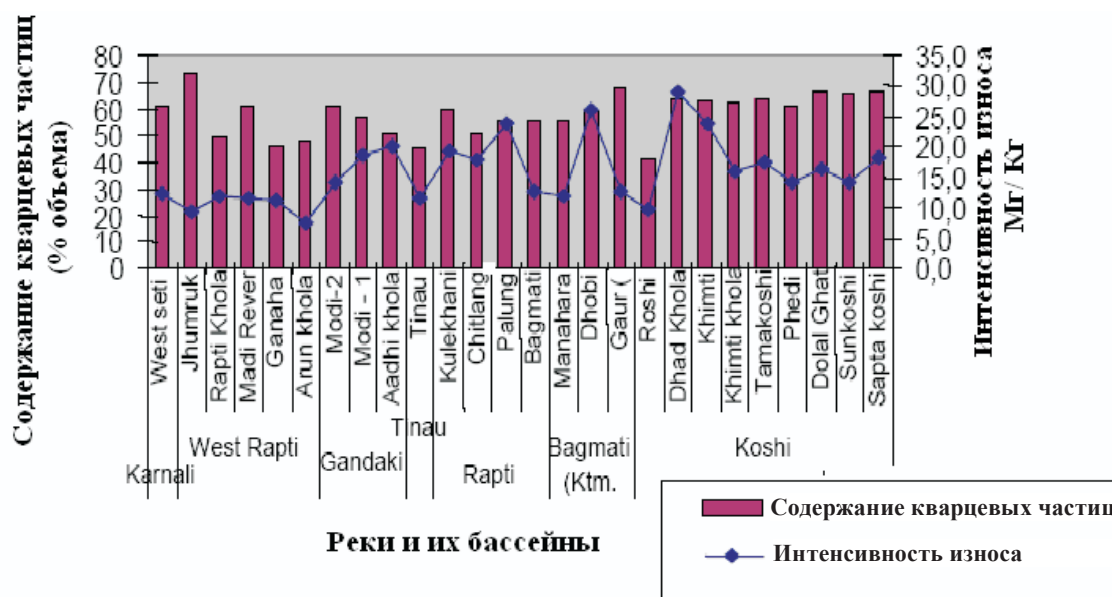


Рис. 5. Анализ содержания кварцевых частиц в наносах из образцов разных речных бассейнов Непала

Для предотвращения износа элементов турбин было предложено использовать напыление на элементы агрегатов твердого керамического покрытия. Стоимость такого покрытия в 2003 г. составила 25 тыс. долларов США, но идея оказалась недостаточно эффективной, так как через год произошло его разрушение.

В этих регионах, специалистам в сфере гидротехнического строительства сле-

дует глубоко изучать влияние наносов на эксплуатацию различных гидротехнических сооружений. В условиях сложной топографии Непала рекомендуется проектировать современные отстойники с вертикальной промывкой, которые более эффективно удаляют наносы, сохраняя благоприятную экологическую обстановку в нижнем бьефе гидроузла [7].

Список литературы

1. Канцуров В. Н., Кумскова Н. Г. Занесение–заиление головных отстойников мелиоративных систем. — Благовещенск, 1990.
2. Проектная документация гидроузла на реке Маршянгни, Катманду. — Непал, 1991.
3. Данелия Н. Ф. Водозаборные сооружения на реках с обильными донными наносами. — М.: Колос, 1964.
4. Использование водной энергии: учебник для вузов / под ред. Ю. С. Васильева. — 4-е изд., перераб. и доп. — М.: Энергоатомиздат, 1995. — 608 с.
5. *Bhola Thapa, Raju Shrestha, Projjowal Dhakal*. Sediment in Nepalese hydropower projects / Norwegian University of science and Technology and Kathmandu University. — Nepal, 2004.
6. *Yangui Wang, Cheng Liu, Hongling Shi*. Sediment yield and sediment budget of the yellow river. / International Research and Training Centre on erosion and Sedimentation. — Beijing, China 2007.
7. Кхарел Б. Истечение водогрунтовой смеси через днищевые люки бункеров-отстойников: автореф. дис. ... канд. техн. наук. — СПб., 1999.

Научное издание

Журнал университета водных коммуникаций
Выпуск 2 (6)

2010 год

Материалы публикуются в авторской редакции

Выпускающий редактор *Е. А. Монахова*

Дизайнер *С. В. Курбатов*

Технический редактор *М. Н. Евсюткина*

Набор *Ю. А. Курицына*

Корректор *Т. А. Кошелева*

Подписано в печать с оригинал-макета 30.06.10. Формат 60х90/8
Гарнитура Times New Roman Усл. печ. л. 24,36. Тираж 500 экз. Заказ № 86
Отпечатано в типографии ФГОУ ВПО СПГУВК
198035, Санкт-Петербург, Межевой канал, 2