

УДК 556

## ФУНДАМЕНТАЛЬНАЯ МОНОГРАФИЯ ОБ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЯХ РУСЛОВЫХ ПОТОКОВ<sup>1</sup>

© 2012 г. В. К. Дебольский

*Институт водных проблем РАН*

*119333 Москва, ул. Губкина, 3*

*E-mail: debolsk@aqu.laser.ru*

Поступила в редакцию 25.10.2011 г.

А.Б. Клавен и З.Д. Копалиани – известные ученые в области динамики русловых потоков. В своей монографии они впервые обобщили более чем пятидесятилетний отечественный и зарубежный опыт экспериментальных, прежде всего лабораторных, но и натурных, исследований динамики течений в руслах, процессов трансформации речных русел и пойм, изменений их морфологии, транспорта наносов, русловых форм и вообще руслового процесса.

Следует отметить, что аналогов этой монографии нет ни в зарубежной, ни в отечественной библиографии.

В монографии приведены результаты оригинальных экспериментальных исследований турбулентной структуры руслового потока, впервые выполненных в широком диапазоне гидравлических характеристик и состояния граничной поверхности с помощью кинокамеры, движущейся вдоль потока со средней его скоростью, отслеживающей структуру турбулентности в некоторой его области. Это, безусловно, – фундаментальный результат, позволяющий судить о возможности применения известных теорий турбулентности к русловым потокам.

Не менее оригинальные эксперименты на лабораторных моделях позволили выявить закономерности взаимодействия водного потока с подстилающей граничной поверхностью и подрусловым потоком, механизм формирования и трансформации гранулометрического состава донных отложений в реках, гидравлических сопротивлений и пропускной способности речных русел с различным типом руслового процесса, закономерностей транспорта донных наносов и их заместителей в гидравлических лотках и на пространственных, деформируемых моделях.

Обобщен имеющийся опыт и разработаны новые методики гидравлического моделирования речных русел и руслового процесса на жестких и

деформируемых моделях равнинных и горно-предгорных рек, а также ледовых заторов и заторных наводнений, аварийных разливов нефти в реках. Рассмотрены вопросы взаимодействия речных русел и инженерных сооружений и их рационального проектирования и эксплуатации. Представлены примеры физического моделирования речных потоков и руслового процесса в виде жестких и деформируемых моделей речных русел, что составляет практическую значимость данной работы.

Монография содержит результаты многолетних экспериментальных исследований по различным проблемам теории руслового процесса и ее прикладных аспектов, выполненных авторами в русловой лаборатории Государственного гидрологического института (ГГИ) с целью развития теории руслового процесса, разработки методики гидравлического моделирования речных потоков и руслового процесса и решения разнообразных практических задач с использованием физических, гидравлических моделей речных русел. Авторами выполнена огромная работа по физическому моделированию с рассмотрением методических проблем речных русел.

Материал монографии основан на детальном анализе большого числа отечественных и зарубежных источников, посвященных гидравлическому моделированию речных потоков и русловых процессов на жестких и деформируемых моделях; в перечень литературы, используемой при написании монографии, вошло 504 литературных источника. Авторы справедливо отмечают, что имеющиеся наименования изданий по этой теме в настоящее время не полностью систематизированы, очень мало работ, где отражены все необходимые этапы разработки и примеры использования метода гидравлического моделирования: теории, методики расчета моделей и примеров их реализации для конкретных объектов и практических задач. Именно поэтому в данной монографии значительное внимание уделяется использованию лабораторного гидравлического моделирования руслового процесса в естественных и проектных условиях, при котором может быть

<sup>1</sup> Клавен А.Б., Копалиани З.Д. Экспериментальные исследования и гидравлическое моделирование речных потоков и руслового процесса. СПб.: Нестор-История, 2011. 543 с.

обеспечено подобие транспорта наносов, русловых форм и русловых деформаций.

Методом визуализации течения путем введения в него частиц нейтральной плавучести и последующего визуального наблюдения за их движением либо регистрации их движения фото- и киноаппаратурой, а также методом точечных измерений контактными средствами величины и направления модуля актуальной скорости течения в лабораторных лотках и в реках — получен большой экспериментальный материал, разносторонне характеризующий свойства макротурбулентной структуры руслового потока. На основе статистической обработки и анализа экспериментальных данных по характеристикам турбулентности, полученных авторами в русловой лаборатории ГГИ, и других исследований сделаны важные выводы о распределении по глубине осредненных по времени значений скорости, одно-, двух- и трехкомпонентной интенсивности турбулентности, получены простые соотношения для расчета характерных значений всех трех компонент актуальной скорости, а также формула для оценки периода крупномасштабной пульсации скорости.

Экспериментально исследованы механизм взаимодействия руслового и подруслового потоков и механизм выведения из состояния покоя и формы последующего перемещения в потоке частиц русловых наносов при разной кинетичности потока.

Разработан физически логичный подход к моделированию участков равнинных рек на деформируемых моделях, учитывающий свойства макротурбулентности руслового потока, особенности его взаимодействия с подрусловым потоком и русловыми наносами и включающий дополнительно к комплексу известных условий подобия два новых отражающих условия взаимодействия руслового и подруслового потоков.

Приведены полученные авторами результаты оригинальных лабораторных исследований гидравлических сопротивлений и пропускной способности русел с различным типом руслового процесса (по гидроморфологической теории Н.Е. Кондратьева и И.В. Попова, 1968 г.; эта типизация — развитие типизации, предложенной К.И. Россинским и И.А. Кузьминым в 1951 г. и далее развитой Н.А. Ржаницыным в 1962 г.) и формами транспорта донных наносов, в которых (в отличие от утвердившейся в речной гидравлике традиции оценивать гидравлические сопротивления интегрально, “подбором” коэффициента шероховатости на основе качественного описания условий обтекания потоком граничной поверхности) подробно изучались индивидуальный, групповой и суммарный вклады в гидравлические сопротивления речных и русловых форм: излучин, плесов и перекатов, микро- и мезоформ руслового релье-

фа. Это особенно важно в связи с тем, что “модельеры” подбирают коэффициенты шероховатости для того, чтобы работала модель.

Экспериментально авторами установлено, что при “руслоформирующих” расходах воды плесы и перекаты в меандрирующем русле не являются формами сопротивления и не вносят дополнительного вклада в гидравлические сопротивления потоку, что следует считать экспериментальным подтверждением принципа, предложенного М.А. Великановым: “русла наименьшего сопротивления — минимум диссипации энергии в русловом потоке”.

Конечно, остается нерешенным вопрос — не только к авторам монографии, но и ко всем специалистам в области динамики русловых потоков — что такое “руслоформирующий расход”? По мнению рецензента, даже отсутствие воды в русле влияет на его дальнейшее формирование. Однако это относится уже к определениям, принятым в динамике русловых потоков.

Экспериментами в 82-метровом (по длине) гидравлическом лотке, выполненными при различных состояниях дна (гладком безгрядовом; покрытом микроформами; с побочными, на поверхности которых движутся микроформы; с побочными без микроформ), установлено, что гидравлические сопротивления и пропускная способность русла меняются в широких пределах в зависимости от форм и режима транспорта донных наносов.

Гидравлические сопротивления увеличиваются в следующей последовательности: от гладкого (безгрядового) дна (наименьшие гидравлические сопротивления) к побочным без микроформ и далее к руслу, покрытому микроформами, и к побочным с микроформами на их поверхности (наибольшие гидравлические сопротивления).

Однако рецензент монографии имеет на этот счет несколько другую точку зрения, заключающуюся в том, что именно упорядоченный характер микроформ приводит к уменьшению гидравлических сопротивлений. Это экспериментальный факт, который теперь объяснен и теоретически. Правда, авторы монографии говорят о микроформах на уже сформированных русловых формах, что более верно.

В монографии представлен обстоятельный обзор литературы по использованию легких заменителей наносов при гидравлическом моделировании речных русел в зарубежных лабораториях и в России.

На основе комплекса лабораторных исследований в гидравлическом лотке с различными заменителями наносов плотностью  $1.20\text{--}1.85\text{ г/см}^3$  и крупностью  $0.35\text{--}1.82\text{ мм}$ , а также естественным песком получены зависимости, позволяющие при использовании легких заменителей дон-

ных наносов на деформируемых гидравлических моделях подбирать, количественно рассчитывать и пересчитывать с модели на натуру динамические характеристики рельефа дна и руслового процесса с учетом перемещения донных наносов в форме гряд.

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

Большой интерес представляет также информация, представленная в монографии в форме приложений 1–3, в которых дан полный перечень лабораторных исследований (58 работ) и гидравлического моделирования (103 моделей), выполненных в отделе русловых процессов ГГИ в 1957–2011 гг. с использованием речных моделей, а также модельных исследований гидродинамических процессов в водоемах (14 исследований). В этом смысле монография не имеет аналогов в отечественной и зарубежной литературе.

Авторами выполнена большая серия лабораторных и натурных экспериментов, раскрываю-

щих особенности распространения аварийных разливов нефти в открытых речных потоках в разных погодных условиях и под ледяным покровом при разной его структуре. С учетом типа руслового процесса, погодных условий и сезона года в монографии рекомендуются рациональные варианты перехвата, локализации и устранения нефтяных разливов (глава 12).

На примере р. Полонети показано существенное влияние неравновесных состояний участков реки на характер переформирования ее русла и поймы (в том числе на пропускную способность русла, тип руслового процесса, режим грунтовых вод и общее экологическое состояние участков реки).

Сравнивая эффективность физических и математических методов исследований, физического и математического моделирования в изучении проблем руслового процесса и решении практических задач в этой области, авторы отдают предпочтение методу физического моделирования и рекомендуют развивать метод гибридного моделирования, сочетающего преимущества этих методов.

В заключение следует отметить, что монография А.Б. Клавена и З.Д. Копалиани “Экспериментальные исследования и гидравлическое моделирование речных потоков и руслового процесса”, безусловно, станет настольной книгой всех исследователей в области динамики русловых потоков — научной дисциплины, разрабатывающей научные и методологические основы для решения актуальных проблем рационального использования и охраны водных ресурсов.