

Н. С. Знаменская

ДОННЫЕ НАНОСЫ И РУСЛОВЫЕ ПРОЦЕССЫ

Ленинградский
гидрометеорологический ин-т
БИБЛИОТЕКА
И-д 195196 Малоохтинский пр., 56



ГИДРОМЕТЕОИЗДАТ
Ленинград • 1976

217.712
287.712

Рассматривается современное состояние науки по зарубежным и отечественным работам в области грядового движения наносов, руслового процесса, их моделирования и гидравлических сопротивлений. Особо акцентируются существующие острые вопросы и противоречия в этой области. По каждому разделу делается попытка обобщить и взаимоувязать результаты различных исследований и высказываются суждения автора.

Книга предназначена для научных работников в области инженерной гидрологии, транспорта донных наносов и руслового процесса и инженеров гидрологов и гидротехников, а также для студентов и аспирантов этих специальностей.

The monograph deals with the up-to-date state of science in the field of sand dune motion, river bed evolution, its modeling and hydraulic resistance with a particular emphasis to different opinions, paradoxes and contradictions on these problems. An attempt is made to generalize and to interrelate the research results; certain conclusions are made by the author.

The book is intended for scientists engaged in the problems of bed-load transport, of river bed evolution, for hydraulic engineers, hydrologists and students of the same specialties.

ПРЕДИСЛОВИЕ

В настоящее время все большее число работ как в СССР, так и за рубежом посвящается исследованию русловых процессов и движению наносов. С одной стороны, это связано со все увеличивающимся хозяйственным использованием рек, с другой — с неудовлетворительным состоянием теоретических разработок, не способных пока в полной мере обеспечить растущие инженерные запросы практики. Расширение фронта исследований также связано с увеличением числа научно-исследовательских коллективов и ростом их технических возможностей. В этих условиях обмен информацией о результатах исследований, проводимых другими странами, представляет для советских ученых большое значение. Автор в предлагаемой читателю работе пытался рассмотреть главнейшие, с его точки зрения, успехи и неудачи в названной области и сделать некоторые обобщающие выводы.

Для решения тех или иных задач в области динамики русловых потоков ученые используют разные методы. Большинство из них считают, что развитие руслового процесса должно начинаться с изучения движения отдельной частицы. Вместе с тем за последние годы получают распространение взгляды на движение донных наносов как движение структур разной организации (микро- и мезоформ русла). Такой подход оказывается более эффективным и приводит к установлению мостика между движением наносов и русловыми процессами. Поскольку Н. С. Знаменская придерживается именно такой трактовки теории движения наносов, в монографии рассмотрены современные зарубежные исследования указанной ориентации.

Ежегодный поток информации в области транспорта наносов, русловых процессов, их моделирования и гидравлических потерь энергии весьма велик, понятно, что рассмотренные в монографии зарубежные исследования представлены выборочно, причем

выбор работ, конечно, является субъективным. Вместе с тем следует отметить, что наиболее крупные обобщающие зарубежные современные работы автором монографии не оставлены без внимания, использовано большое количество отдельных статей.

В монографии достаточно подробно освещено современное состояние гидравлической науки по ее четырем главнейшим разделам: движению донных наносов в виде гряд, русловым процессам, их моделированию и гидравлическим сопротивлениям русла. Принятая последовательность изложения логически увязана, так как каждая предыдущая часть является основой для последующей. Каждый раздел начинается с изложения, выявления и формулирования существующих противоречий. Далее приводятся имеющиеся в литературе попытки разрешить эти противоречия и излагаются основные достижения в этой области, характеризующие современное состояние вопроса.

Работа Н. С. Знаменской представляет интерес не только как обзор современного состояния науки по данной проблеме, но и как попытка поставить и решить наиболее острые ее вопросы. Дискуссионность ряда выводов автора, с нашей точки зрения, является скорее достоинством работы, чем ее недостатком, так как в вопросах, не имеющих однозначного решения, соображения, высказанные автором монографии, либо найдут своих сторонников, либо заставят разобраться в существе поставленных вопросов и явятся дальнейшим шагом по пути усовершенствования теории руслового процесса.

Заслуженный деятель науки и техники,
д-р геогр. наук проф. А. А. Соколов

В настоящее время успешное развитие науки не может происходить без своевременного обмена научными достижениями, без учета того, что выполнено учеными разных стран. Мировые исследования в области транспорта наносов и руслового процесса находят отражение в трудах Конгрессов Международной ассоциации гидравлических исследований, созывающихся раз в два года, в монографиях отдельных институтов, в обзорных статьях отдельных специалистов или специальных комитетов, призванных обобщать эти вопросы, в трудах и статьях отдельных исследователей разных стран.

За последнее время среди отдельных исследований наметилась тенденция к обобщению имеющегося материала, к выработке общих принципиальных положений в области транспорта донных наносов, руслового процесса и моделирования.

Рассмотрение существующей литературы по транспорту наносов в области руслового процесса свидетельствует о том, что эта проблема является одной из ведущих в гидравлике открытых потоков.

В монографии использованы в основном материалы трудов последних конгрессов МАГИ, книга Шена «Речная механика», представляющая собой сборник работ профессорско-преподавательского состава Государственного университета США в Колорадо в Форт Коллинзе, серия статей, опубликованных ТАСК-Комитетом (Специальной комиссией по разработке указаний по расчету гидравлики и движению наносов) в журнале «Хайдрोलик», книга С. Ялина о движении наносов, а также отдельные статьи специалистов из Англии, Америки, Японии, Нидерландов, Франции и других стран, опубликованные за последние 10—12 лет (1963—1974 гг.).

Автор отдает себе отчет в том, что, несмотря на попытку осветить как можно больше интересных работ, все же большое количество исследований осталось не рассмотренным. Некоторые аспекты оказались рассмотрены достаточно, и может показаться излишне подробно. Конечно, подбор работ и степень подробности их изложения определялись поставленной задачей — объяснить существующие в теории русловых процессов и их моделировании противоречия и неувязки. Сколь удалась эта задача — судить читателю.

Автор выражает глубокую благодарность Т. И. Яковлевой, взявшей на себя большой труд ознакомиться с работой во время ее написания и высказавшей ряд ценных замечаний и пожеланий, а также К. С. Голубевой, сделавшей первую редакционную правку рукописи.

1. ГРЯДОВОЕ ДВИЖЕНИЕ НАНОСОВ

1.1. Сущность основных противоречий

Известно, что движение донных наносов осуществляется преимущественно в виде гряд. Высота и скорость перемещения гряд определяют сопротивление потока и глубинные деформации русла. Движение наносов как движение отдельных частиц осталось вне круга рассматриваемых задач. Хотя применяемые формулы для расхода наносов получены на этой основе, но в то же время практически никто не сомневается в определяющей роли движения и переформирования гряд и на расход наносов, и на деформации русла, и на гидравлические сопротивления потоку. Поэтому получение надежных теоретических или эмпирических формул, связывающих параметры гряд с основными определяющими гидравлическими характеристиками является одной из основных задач в этой области. Известно, что первые формулы, в той или иной мере отвечающие на этот вопрос, были получены уже много лет назад. С течением времени появляются новые формулы, новые теоретические разработки. Это связано с тем, что как теоретические, так и эмпирические формулы, разработанные для расчета параметров гряд в зависимости от характеристик потока и наносов, оказываются малоприменимыми для практического использования. Это показала проверка этих формул натурными данными. Уточнение зависимостей путем более «тонкого» учета действующих факторов разнозернистости материала, изменения температуры воды, концентрации взвешенных наносов приводило к усложнению формул, но не меняло принципиального положения вещей — формулы не оказывались универсальными: если в одних условиях они приводили к удовлетворительному совпадению с натурными данными, то в других оказывались совершенно непригодными. Причем трудно предсказывать границы применимости этих формул.

В настоящее время в мире накоплен огромный фактический материал по движению гряд как в натуре, так и в лаборатории. Известны попытки обобщить этот материал, однако пока еще нет достаточно убедительных результатов. Поэтому продолжают появляться новые и новые предложения по усовершенствованию старых теоретических формул, разрабатываются новые, осно-

ванные на некоторых новых предпосылках, проводятся вновь и вновь экспериментальные исследования, мало чем отличающиеся по существу от прежних, делаются попытки увеличить точность измеряемых величин или измерить такие характеристики, которые до сих пор не измерялись, высказываются идеи о необходимости постановки «тонкого» физического эксперимента. Однако коренного перелома в положении вещей пока нет. При обсуждении этого вопроса один из генеральных докладчиков МАГИ Д. Кеннеди заявил, что в таком состоянии науки необходимы новые идеи.

По лабораторным исследованиям давно установлен факт существования двух классов донных форм: рифелей в виде шероховатости, покрывающих дно потока, и крупных донных гряд, занимающих всю ширину лотка. Одни исследователи эти донные формы называют рифелями и дюнами, другие — рифелями и барами, третьи — рифелями и грядами. Однако до сего времени нет четкого разделения этих форм по качественным признакам. В настоящее время их принято различать по количественным характеристикам, причем в этом отношении также не имеется единого стандарта. Для разделения донных форм часто применяют критерий Шильдса $\frac{v_* d}{\nu}$, значение которого, равное 100, считается границей раздела между рифелями и дюнами. Критическому значению числа Шильдса соответствует критическое значение диаметра донных наносов, равное 0,6 мм, означающее, что из наносов крупнее этой величины рифеля образоваться не могут.

Разделение донных форм на два класса имеет существенное значение в связи с тем, что, как было установлено рядом исследователей и как это будет показано ниже, для рифелей и баров характерны различные зависимости параметров донных форм от характеристик потока.

Таким образом, мы пришли к выводу, что, с одной стороны, грядовое движение наносов достаточно подробно исследовано как в теоретическом, так и в экспериментальном отношении. Разработано большое количество различных формул, по своему содержанию отвечающих поставленным практикой задачам. С другой стороны, оказывается, что использование разработанных формул для расчета деформаций русла и гидравлических сопротивлений приводит часто к неудовлетворительным результатам. В этом состоит одно из главных противоречий изученности движения донных наносов. Кроме того, следует сделать вывод также и о том, что хотя из экспериментальных исследований и натурных наблюдений известен факт существования двух классов гряд¹ и известно, что каждому классу свойственны различ-

¹ Здесь и далее, употребляя термин «гряды», мы будем иметь в виду собирательное значение этого термина, которое означает, что данная форма имеет грядовой профиль.

ные (иногда противоположные) зависимости характеристик донных форм от гидравлических характеристик потока, все же эти сведения практически не используются в расчетных формулах. Это происходит потому, что нет единых представлений о том, какие формы в природе и лаборатории относятся к данному классу гряд и каково различие в их происхождении. В этом — второе противоречие рассматриваемого вопроса.

К этому же противоречию примыкает и вопрос о том, какие лабораторные донные формы являются моделью, аналогом натуральных донных гряд. С ответом на этот вопрос, по-видимому, будет связано как применение расчетных формул, разработанных на основе анализа движения лабораторных гряд данного класса, к данному же классу натуральных гряд, так и разработка принципов моделирования грядового движения наносов.

Одним из основных затруднений в настоящее время является также отсутствие единого общепринятого представления о причинах возникновения гряд и отсутствие ответа на вопрос, един ли механизм образования разных классов гряд.

1.2. Терминология и классификация донных форм

Поскольку в специальной литературе по грядовому движению нет единой общепринятой терминологии и имеются разночтения одних и тех же терминов, необходимо специально остановиться на этом вопросе. Тем более, что отсутствие единых толкований распространенных терминов приводит, как мы увидим, к существенным недоразумениям. Приведем здесь все употребляемые в отечественной и зарубежной литературе термины, располагая их попарно в русской и английской транскрипции: рифеля — ripples, барханы — threedimensional ripples, гряды — dunes, sand waves, песчаные волны — sand waves, дюны, антидюны — antidunes, гладкая фаза движения наносов — smooth beds, flat bed микроформы — ripples, dunes, microforms; ленточные гряды — band bars; мезоформы — sand bars; плоские гряды — twodimensional dunes, transverse bars, перекошенные гряды, крутые гряды — threedimensional dunes, побочни — alternate bars, alternate shoals, prominent shoals, осередки — middle bars, shallows, transverse bars, пляжи — point bars, shallows, косы — sand bars, shallows, перекаты — crossovers, острова — islands.

Собирательный термин «гряды», означающий в данной монографии наличие у данной формы специфического продольного грядового профиля, принят С. Ялином [103] в виде термина „sand waves“. Таким собирательным термином удобно пользоваться в тех случаях, когда мы не хотим отнести рассматриваемые донные формы к какому-либо классу, а хотим рассмотреть

общие черты донных форм или говорим вообще о донных формах грядового профиля.

Существующие классификации гряд и соответствующие им графические интерпретации или критериальные зависимости, разработанные, как правило, на основе лабораторных экспериментальных исследований, не включают таких донных форм как бары (к этим классификациям относятся широко известные классификации Д. Саймонса—Е. Ричардсона, Д. Богарди, Д. Кеннеди и автора монографии). В настоящей работе не будем приводить эти графики, так как они уже известны в нашей литературе.

За последние годы появились еще две классификации: Х. Хилла и Б. Йена. Эти классификации, по мнению Д. Кеннеди

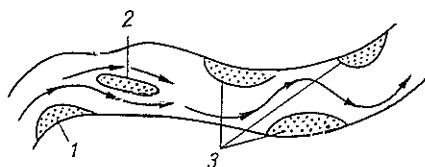


Рис. 1.1. Классификация мезоформ, по Саймонсу.

1 — точечный бар (пляж), 2 — осередок, 3 — чередующиеся бары.

при обсуждении на XV конгрессе МАГИ, не имеют преимуществ перед вышеупомянутыми, так как в них использованы критерии, не обеспечивающие однозначных связей. Поскольку во всех упомянутых классификациях отсутствуют донные формы, характерные для натуральных потоков, постольку ими сложно пользоваться при интерпретации натуральных гряд.

В то же время при распространении расчетных зависимостей, полученных по лабораторным данным или с помощью анализа физического процесса, наблюдаемого в лаборатории, на натурные условия необходимо «перевести мостик» от лабораторных донных гряд к натурным.

Натурные донные формы также имеют свои классификации. Наиболее полно представлена эта классификация в рамках гидролого-морфологической теории, развиваемой в ГГИ. При этом все натурные русловые формы делятся на два класса — микро- и мезоформы. Под микроформами понимаются такие гряды, которые представляют шероховатость дна (к этому классу форм Н. Е. Кондратьев и И. В. Попов относят и все лабораторные гряды), а под мезоформами — такие, которые создают основной рельеф русла, поскольку они соизмеримы с размерами потока. При этом мезоформы подразделяются на ленточные гряды, побочни и осередки. Первые представляют собой двухмерные пологие гряды, вторые — гряды, расположенные в шахматном порядке, примыкающие своими наиболее высокими гребневыми участками то к одному, то к другому берегу, а третьи — более короткие, чем побочни, но более крупные и более подвижные русловые формы, которых по ширине потока может наблюдаться более одной, и так же как первые два подтипа, они имеют грядовый профиль.

Следует упомянуть, что существование подобных гряд в русле было известно и много ранее. Так, К. И. Россинский и И. А. Кузьмин выделили аналогичные русловые гряды, которые только иначе назывались. Поскольку при классификации (типизации) донных русловых форм важно не только выделение названных подтипов, но главное значение имеет разделение форм на два класса, которые играют различную роль в русловой гидравлике и в русловом процессе, поэтому в дальнейшем мы будем пользоваться типизацией русловых форм, разработанной в ГГИ.

За последнее время за рубежом также появились типизации русловых форм. Так, Д. Саймонс, в книге [91] приводит графическое изображение донных русловых натуральных форм, снабженное соответствующими терминами (рис. 1.1), которое может рассматриваться как типизация мезоформ.

Первая попытка провести аналогию между донными грядами, наблюдающимися в лабораторных лотках, и русловыми формами, наблюдающимися в природе, пожалуй, принадлежит Н. С. Знаменской [15]. Так, в этой работе в лабораторных грядах до фазы их разрушения выделяются два класса гряд: рифеля и гряды, последние затем подразделяются на три подкласса: плоские, перекошенные и крутые. При рассмотрении натуральных русловых форм проводится аналогия между плоскими грядами в лаборатории и ленточными грядами в природе, перекошенными грядами и побочными в природе, крутыми грядами и осередками.

Переходная зона или смыв гряд, гладкая фаза движения наносов и антидюны не находят разночтения в разных работах, а потому не будем пока останавливаться на этих формах транспорта донных наносов, отнесенных Д. Саймонсом к «верхнему» режиму их транспорта.

Рассмотрим небезынтесную таблицу, представляющую классификацию донных форм в лаборатории и природе, опубликованную Д. Кеннеди [94]. В обобщающем докладе американского ТАСК комитета, на котором мы еще в дальнейшем остановимся подробнее, Кеннеди пишет, что неучет формы дна не позволяет подойти к решению основных задач русловой гидравлики, среди которых упомянуты взаимосвязь расходов и уровней и гидравлические сопротивления. Если вспомнить, что Кеннеди обратился к типизации донных форм после разработки теории движения гряд, то станет понятным, какое большое значение он придает этой классификации.

В табл. 1.1 перечислены три типа основных донных форм (не считая форм транспорта донных наносов при «верхнем» режиме). Обращает на себя внимание тот факт, что признаками разделения выделенных им трех типов гряд служат некоторые количественные характеристики. Особенно нечетко охарактеризованы им дюны, о которых говорится лишь, что они больше

Донные формы, по Кеннеди

Форма дна	Размеры	Форма гряд	Поведение
Рифеля	Длина меньше чем 30 см, высота меньше чем 3 см	Главным образом треугольная с единым слабо размываемым верхним уклоном и уклоном низовой грани, близким к углу откоса. Главным образом короткогребневые и 3-размерные	Двигутся вниз по течению со скоростью $c_r < v$. Вообще не встречаются в наносах крупнее чем 0,6 мм
Бары, мезоформы	Длина сравнима с шириной русла. Высота сравнима со средней глубиной потока	Профиль подобен рифелям. Плановые формы различны	Четыре типа баров: 1) точечные, 2) чередующиеся, 3) поперечные, 4) притоковые (конусы выноса). Рифеля могут быть на них
Дюны, гряды (вторичные гряды)	Длина и высота больше, чем у рифелей и меньше, чем у баров	Подобны рифелям	Верхний откос может быть покрыт рифелями. Смещаются вниз как рифеля
Переходная область	Изменяется в больших пределах	Дюны с низкими высотами как переход к гладкой фазе	Значительно изменяются
Гладкая фаза	—	—	Форм нет. Может отсутствовать для некоторого ряда H и v
Антидюны	Длина $2\pi v^2/g$, высота зависит от H и v	Почти синусоида в профиле, длина гребня соизмерима с длиной волны	В фазе с гребнем волны. Двигается вверх по течению или вниз или стоит на месте зависит от свойств потока

рифелей и меньше баров. Относительно их формы говорится коротко: подобны рифелям.

Итак, в классификации Кеннеди мы видим, что имеется принципиальная разница между рифелями и барами, поскольку последние сравнимы с размерами русла, а принципиальной разницы между рифелями и дюнами нет, о чем и говорит сам Кеннеди. Из этой классификации мы видим также, что бары подразделяются им на четыре подтипа, совпадающие по своему смыслу с подтипами мезоформ у Кондратьева и Попова, и подтипами баров у Саймонса, к которым только добавлен еще один специфический тип — конусы выноса у притоков.

В монографии С. Ялина [103] раздел о движении гряд также начинается с классификации последних. При этом Ялин, оговаривая, что в рассматриваемые принимаются только двухмерные гряды, на которые не влияет ширина потока, считает необходимым разделить все гряды только на три класса: рифеля, дюны и антидюны. В обоснование этого утверждения он приводит соображение о том, что классифицировать донные гряды необходимо по физическим, а не по количественным признакам. К таким физическим признакам Ялин относит происхождение донных форм, отражающееся в функциональных связях характеристик гряд каждого выделенного класса с характеристиками потока. По мнению Ялина, «бары» — это просто крупномасштабные дюны, имеющие большую относительную длину L/H и меньшую крутизну Δ/H гряд. Поэтому, по его мнению, дополнительное подразделение баров на подтипы излишне, и может характеризовать лишь вторичные признаки, не отражая причины возникновения гряд.

Можно согласиться с С. Ялином в том, что приведенные классификации, в том числе и предложенная Ялином, не отражают причину возникновения донных форм разного класса. Исключение, пожалуй, составляет типизация русловых форм, разработанная Н. Е. Кондратьевым, который предположил, что возникновение микроформ связано с макротурбулентностью потока, а мезоформ — с осредненным полем неравномерного (автор монографии сказал бы «квазиравномерного») потока.

Происхождение донных форм будет рассмотрено ниже. Здесь главная цель остановить внимание на существовании различных точек зрения в области классификации донных форм. По мнению большинства исследователей, принципиальное различие имеется между двумя классами донных гряд (не рассматривая пока антидюны как наименее распространенные в натуре формы): между микро- и мезоформами по Кондратьеву и Попову, между рифелями и дюнами, по Ялину, между рифелями и барами, по Кеннеди, и между рифелями (микроформами) и грядами (мезоформами или барами), по Знаменской. Заметим еще, что хотя Кеннеди выделяет в своей классификации еще и дюны, но не видит в этом классе принципиальной разницы с ри-

фелями. Может быть, различие между главными классами донных форм вызвано чисто терминологическими неувязками.

Соглашаясь с Ялиным о необходимости использования физических, а не чисто количественных показателей в качестве классификационных признаков, скажем только, что и физический признак может иметь свое относительное количественное выражение.

До выбора рекомендуемой классификации гряд рассмотрим подробнее экспериментальные факты, свидетельствующие о наличии различных зависимостей для двух главных классов гряд. При этом будем пока пользоваться той терминологией, которую предлагают те исследователи, чьи данные мы рассматриваем.

1.3. Результаты некоторых экспериментальных и теоретических исследований

1.3.1. Изучение движения гряд при учете дополнительных характеристик потока и наносов

К этим исследованиям относятся опыты с движением гряд в жидкостях иной, чем вода, вязкости [92], или движение наносов другой, чем песок, плотности (Шабер—Шовин, С. М. Анцыферов и В. К. Дебольский [4] и др.). К этой же группе исследований мы отнесли изучение движения крупных галечных материалов (Галай [73], Ф. Сентюрк, З. Копалиани, А. Дейдо и др.), а также так называемые «точные эксперименты», где исследуется влияние на форму гряд или на подвижность наносов таких характеристик, как влияние температуры воды, вязкости и концентрации взвешенных наносов (Колби [69], Саймонс, А. Дейдо и др.). Эти исследования, безусловно, представляют большой интерес, так как расширяют наши знания о новых сторонах исследуемой проблемы. По-видимому, эти исследования заслуживают большего внимания, чем простое упоминание. Так, в работе А. Дейдо исследовалось критическое значение влекущей силы гравия и гальки в селевом потоке. Механизм влечения в чистой воде и мутном потоке, по мнению Дейдо, один и тот же, поэтому он предположил, что можно сопоставить мутные и чистые потоки. На основании эксперимента и измерения критической влекущей силы, по Шильдсу, А. Дейдо пришел к выводу о том, что критическая влекущая сила для гравия в мутном потоке выражается одним и тем же соотношением, что и в чистом, и это выражение хорошо подтверждается экспериментом.

Представляет интерес исследование, проведенное П. Сахглом и Б. Сингхом [92] с целью выяснения влияния удельного веса и вязкости жидкости на образование гряд разной формы и проверки некоторых гипотез образования гряд. Авторы использовали

в качестве рабочих жидкостей воду при разной динамической вязкости, смесь воды с глицерином, взятую в четырех разных пропорциях, и смесь керосина с подвижной нефтью. В своем исследовании авторы выделили только две формы дна: плоское и рифельное. В качестве подвижного материала авторы использовали песок четырех разных крупностей от мелкого 0,25 мм до крупного 1,0 мм.

В результате исследований Сахгал и Сингх пришли к следующим выводам.

1. Критериальный график появления гряд разной формы, разработанный Д. Кеннеди и построенный в координатах Fg и j , при условии замены j на $\frac{g^{1/2}d^{3/2}}{\nu}$ приводит к удовлетворитель-

ному разделению точек по областям, выделенным Кеннеди. Для малых размеров зерен песка число Fg играет большую роль на образование гряд той или иной формы, для более крупного песка большую роль играет вязкость жидкости.

2. В жидкостях, имеющих большую, чем вода вязкость, рифеля могут образоваться из большей крупности песка, чем в воде.

Исследования С. М. Анцыферова и В. К. Дебольского показали, что для движения гряд из заменителей песка характерны те же зависимости, что и при движении песчаных гряд. Эти исследования показали, что из заменителей также образуются два класса гряд: рифеля и длинные, занимающие всю ширину бары. Эти авторы показали, что при наличии грядовой формы дна расход донных наносов пропорционален третьей степени скорости, а при гладкой фазе движения наносов — четвертой.

Однако исследование всех перечисленных вопросов хотя и представляет существенный интерес и является вкладом в накопление данных, пока не привело к устранению всех противоречий изученности движения гряд, которые были сформулированы выше. Поэтому мы не будем здесь подробнее останавливаться на этих интересных исследованиях, отсылая заинтересованного читателя к первоисточникам.

1.3.2. Исследование двух классов гряд

1.3.2.1. Исследования, подтверждающие наличие двух классов гряд и различных зависимостей для их параметров. Из рис. 1.2, предложенного автором в качестве критериальной зависимости перехода одних донных форм в другие, следует, что для рифелей (зона 2) и гряд (зоны 1, 3 и 4) характерны различные семейства кривых крутизны донных форм Δ/λ_T и скорости их

перемещения c_T от числа $Fg = \frac{v}{\sqrt{gH}}$ и критерия подвижности

наносов v/w , что отражает факт наличия различных зависимостей для этих двух классов гряд.

Д. Пратт и К. Смит [90] получили зависимость (рис. 1.3) пологости донных форм λ_r от критерия подвижности наносов, по Г. Эйнштейну, $\frac{1}{\psi'} = \frac{\rho}{\rho_t - \rho} \frac{R'I}{d_{35}}$. Здесь R' — гидравлический радиус с учетом донных форм, I — уклон свободной по-

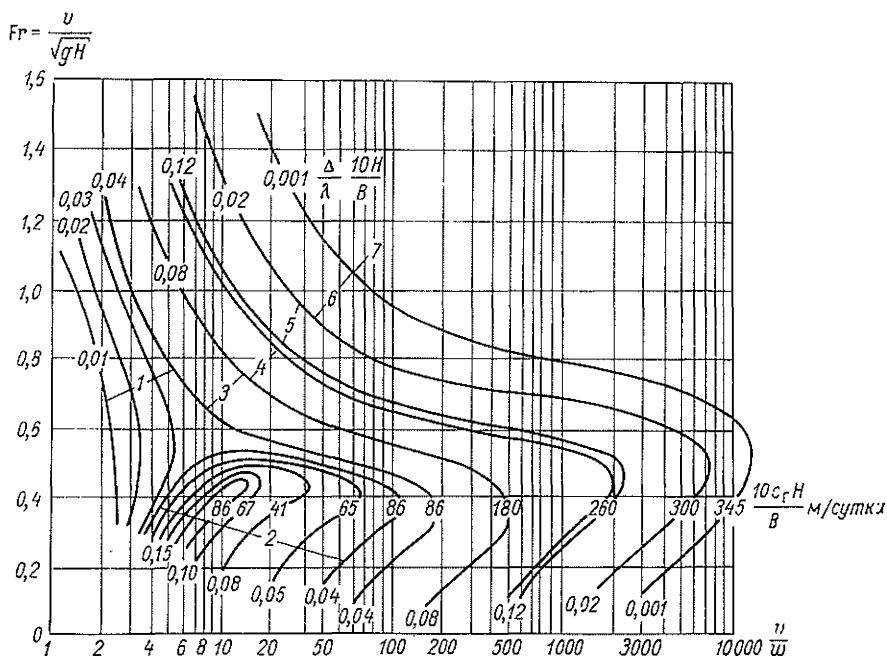


Рис. 1.2. Классификация гряд

1 — плоские гряды (бары) при начале движения наносов, 2 — рифеля (микроформы), 3 — перекошенные гряды (бары), 4 — крутые гряды (бары), 5 — срыв гряд (перекошенные гряды, плоские гряды), 6 — гладкая фаза, 7 — антидюны.

верхности, d_{35} — диаметр донных наносов фракции в смеси, мельче которой в общем составе донных отложений имеется 35% по весу.

Как видно на этом рисунке, пологость (величина обратная крутизне гряд) различно зависит от $1/\psi'$ для трех, выделенных авторами зон: I) рифелей, II) рифелей на дюнах и III) дюн. Участок распространения точек в зоне I мал, однако по данным этого графика все же можно говорить о противоположности зависимости λ_r/Δ от $1/\psi'$ для зон I, II и III, т. е. также можно говорить о наличии двух зависимостей, так как кривая зоны I параллельна кривой зоны III.

Ф. Сентюрк [95] показал, что гидравлические сопротивления потока (v''/v) имеют разную зависимость для рифелей и дюн от критерия подвижности наносов (рис. 1.4).

На основании спектрального анализа параметров донных форм К. Нордин и др. [87] показали, что безразмерные спектры песчаных гряд зависят от средних значений глубины и скорости потока. Характеристики спектральной плотности и автокорреляционных функций для разных форм гряд, а также кривые распределения высот и длин гряд приводят в своих работах Ашида

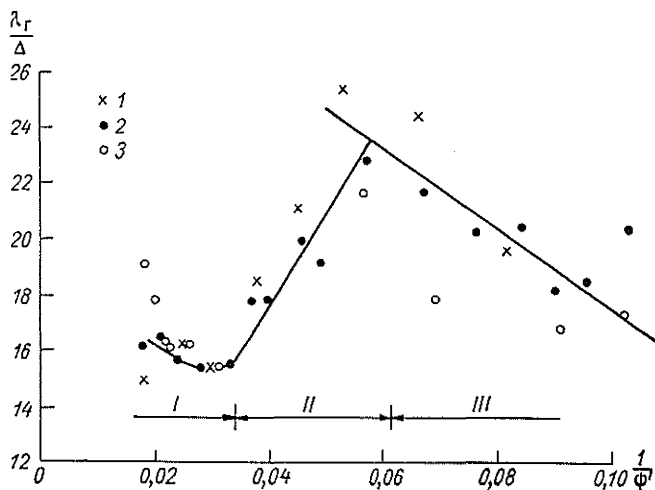


Рис. 1.3. Два типа зависимости пологости гряд $\frac{\lambda_r}{\Delta}$ от $\frac{1}{\psi_r}$ по Пратту и Смиту.

I — рифеля, II — рифеля на дюнах, III — дюны; 1 — $H=0,076$ м, 2 — $H=0,152$ м, 3 — $H=457$ м.

и Танака [62]. Статистический анализ показал необходимость отдельного исследования разных структурных форм гряд, но еще не намечены пути их разделения по форме.

1.3.2.2. Теоретическое и экспериментальное исследования рифелей по Аллену. Экспериментальные исследования движения гряд в лаборатории, как правило, охватывали исследования движения рифелей, и движение длинных гряд, занимающих всю ширину лотка, именуемых одними исследователями дюны, другими — грядами и третьими — бары.

При разработке расчетных формул для гряд обычно данные по рифелям отбрасывались. Известны специальные исследования движения движения в лотках баров. Что касается исследования движения и образования рифелей, то этим вопросам посвящалось сравнительно меньшее количество исследований. Поэтому особый интерес представляет теоретическое и экспериментальное

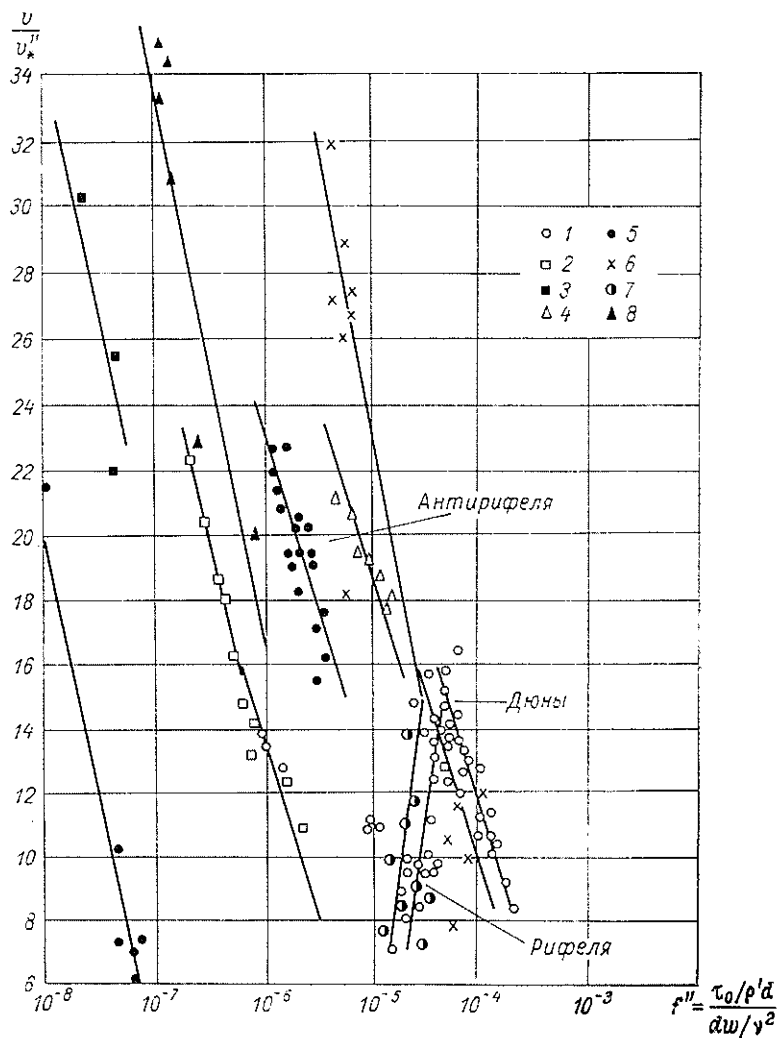


Рис. 1.4. Два типа зависимостей гидравлических сопротивлений

$\frac{v}{v_*}$ от $\frac{\tau_0}{\rho d} / \left(\frac{dw}{\gamma} \right)^2$, по Сентюрку, для разных материалов.

1 — песок № 2, 2 — песок № 3, 3 — песок № 4, 4 — песок № 22, 5 — пластик, 6 — окрашенный гравий, 7 — песок из р. Луары, 8 — бакелит.

исследование рифелей, выполненное Д. Алленом [61]. Автор позволяет себе остановиться на этой работе достаточно подробно.

При постановке эксперимента Аллен исходил из следующих теоретических предпосылок. Поскольку рифеля связаны главным образом с транспортом донных наносов, существенное значение приобретает рассмотрение линий токов непосредственно у дна. Но так как линии токов у дна не могут быть проведены, то Аллен предлагает рассмотреть изолинии трения у дна, проведенные по векторам касательных напряжений.

Если на каком-то участке дна наблюдаются две линии трения, направленные навстречу друг другу (рис. 1.5 *a—1*), то в точке *S* вследствие условия неразрывности возникает отрыв линий токов, и точка *S* будет точкой отрыва, а линия тока *S* — линией отрыва. В точке *S* касательные напряжения, параллельные дну, станут равными нулю, система линий токов будет сходящейся. Если от точки *A* (рис. 1.5 *a—2*) наблюдается расхождение линий трения, то точка *A* будет точкой удара потока о стенку или точкой касания, а система изолиний трения — расходящейся системой.

В отличие от Тейлора, рассматривавшего некоторые данные точки двухмерного потока, названные им цилиндрическими, где касательное напряжение равно нулю не только в точках, но вследствие параллельности потока дну оно равно нулю по всей донной линии трения, Аллен рассматривает те же точки для пространственного потока. В этом случае системы линий трения оказываются не параллельными друг другу и могут быть представлены ограниченным числом типовых схем, отражающих рассмотренное Алленом большое число разных случаев отрыва потока от стенки. На рис. 1.5 *б* и *в* представлены эти типовые схемы полей донного трения, которые не содержат

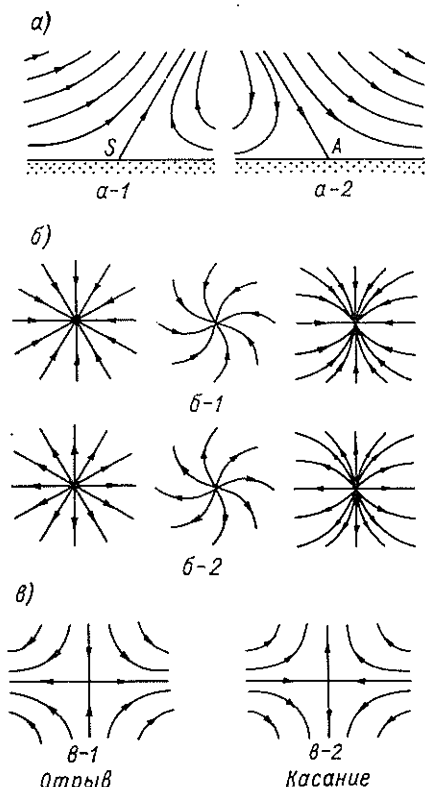


Рис. 1.5. Схемы полей донного трения и линий токов:

a — для плоского потока, *б*, *в* — для пространственного.
a—1 — схема отрыва линий токов, *a—2* — схема удара линий токов, *б—1* — «узлы отрыва», *б—2* — «узлы удара», *в—1* — седловины отрыва, *в—2* — седловины удара.

цилиндрических точек Тейлора и линий, где касательные напряжения равны нулю. Но каждая система содержит одну единственную точку, в которой касательные напряжения равны нулю. Можно считать, что цилиндрические точки Тейлора являются частным случаем точек Аллена.

На рис. 1.5 б изображена система расходящихся и сходящихся изолиний, которые относятся к узловым точкам.

Системы линий трения, относящиеся к седловинным точкам, изображены на рис. 1.5 в. Для седловины характерно, что часть изолиний направлена к точке (седловине), а часть — направлена от нее. Далее Аллен рассматривает линии трения при рифельном

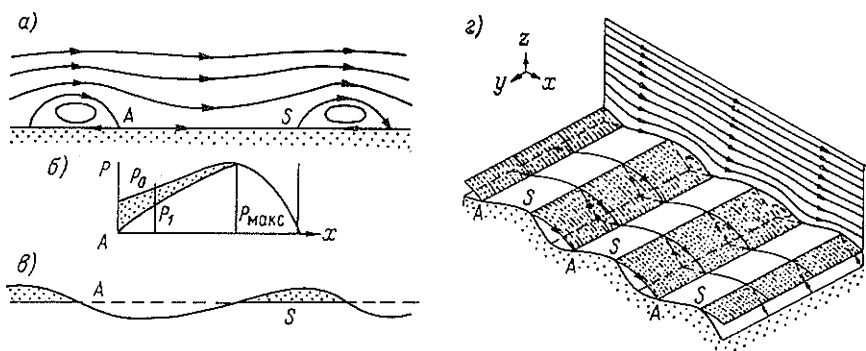


Рис. 1.6. Схема поля линий токов при рифельном дне.

а — система продольных водоворотов, б — изменение энергии вдоль потока на участке AS, в — деформации дна на участке AS, г — поле линий токов над двумерными рифелями с учетом а, б и в.

дне. Так как рифеля возникают на дне при малой или умеренной энергии потока, то взвешенные наносы практически отсутствуют в потоке. Аллен принимает также, что движение донных наносов совпадает с направлением линии донного трения. За расход наносов вдоль линии трения Аллен принимает произведение местного касательного напряжения и местной скорости потока. При этом учитывается, что хотя энергия не выражается количественным вектором, расход наносов является количественным вектором.

Чтобы перейти от систем линий трения к движению наносов и деформации дна, Аллен предлагает рассмотреть схему, изображенную на рис. 1.6. При этом для простоты изложения и наглядности он использует двухмерную схему, которая, однако, не является необходимым условием возникновения рифелей.

Далее Аллен рассматривает изменение энергии турбулентного потока над начальным плоским размываемым дном, над которым через равномерные интервалы между точками А и S имеются устойчивые «водовороты», образованные линиями трения. Общая энергия потока P на этом участке выполняет два вида

работы. Одна часть этой энергии расходуется на приведение в движение части донного материала, т. е. на размыв дна, а другая ее часть тратится на транспорт этих наносов и наносов, поступающих с верхнего участка. Резонно ожидать, что общая энергия P будет меняться вдоль AS , как изображено на рис. 1.6 б. Наименьшее значение этой энергии будет наблюдаться в точках A и S , а наибольшее значение $P_{\text{макс}}$ в некоторой промежуточной точке. Хотя осредненные по времени касательные напряжения в этих точках равны нулю, энергия в этих точках имеет конечное значение из-за турбулентных пульсаций. Как показали исследования Рауза, Тани, Шатурведи, Раудкиви и других¹, энергия в точке A весьма отличается от величины $P_{\text{макс}}$. В точке S значение энергии P еще меньше вследствие диссипации энергии вдоль линии AS . Так, в точке A энергия тратится только на преодоление силы трения при начале движения частиц и частиц, движущихся сверху. Вниз по линии трения от точки A часть энергии, идущая на транспорт донных наносов, увеличивается вплоть до $P_{\text{макс}}$, а далее снова убывает до точки S . На участке от $P_{\text{макс}}$ до S должно наблюдаться осаждение частиц. Итак, на участке от A до $P_{\text{макс}}$ должен наблюдаться размыв дна, а отложение наносов будет наблюдаться на участке от $P_{\text{макс}}$ до S , что ведет к совокупности обратных и прямых уклонов дна на участке, т. е. к совокупности «холмиков и впадин». Эти же рассуждения могут быть применены и к пространственному потоку. Аллен показывает, что мы вправе ожидать эрозии (размыва) у каждой узловой точки при ударе потока о дно и наибольшего расхода наносов в окрестности седловины.

Расход наносов должен увеличиваться вдоль каждой линии трения от узловой точки. Расход наносов будет наибольшим в широкой зоне, которая проходит через седловину (при ударе). Но скорость размыва на этом же участке дна должна быть малой или равной нулю. Отсюда выступы поверхности должны уменьшаться по высоте по сравнению с седловиной между ними, тогда как гребни будут распространяться вдоль линии отрыва.

Участок выше гребня и некоторая часть водоворотной зоны каждого рифеля характеризуется линиями тока выпуклостью вверх (рис. 1.6 г). Подвалье рифеля, наоборот, характеризуется вогнутыми линиями тока. Это обстоятельство чрезвычайно важно при анализе поперечной неустойчивости потока (по его ширине).

Для того, чтобы объяснить, как дно покрывается рифелями, необходимо рассмотреть пространственный поток. Если существует поперечная неустойчивость потока, то она должна сосуществовать с неустойчивостью продольной, т. е. с основным движением, а это значит, что мы будем иметь новую форму движения, сочетающую в себе неустойчивость и продольную,

¹ Библиография упоминаемых авторов приведена в работе [61].

и поперечную. Такая форма движения, по мнению Аллена, должна иметь единственную форму.

Д. Аллен показал, что предыдущие исследования Тейлора, Релея, Кармана и других не позволяют все же однозначно определить причину поперечной неустойчивости потока при возникновении рифелей. Неустойчивость вязкой жидкости, впервые обнаруженная Тейлором, показала, что вторичные течения между вращающимися цилиндрами принимают форму вращающихся в противоположном направлении спиральных водоворотов с осью, параллельной среднему направлению потока.

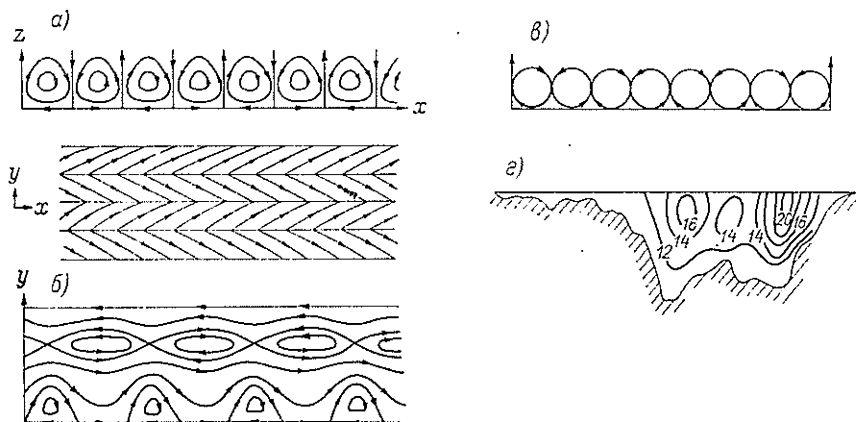


Рис. 1.7. Струйность течения.

а — по данным Тейлора—Гертлера, б — по данным Грегори—Уолкера, в — по данным Ныrkова, Лосиевского, Казея и др., г — по данным Н. С. Зубкова на р. Амударье.

Г. Гертлером и И. Тани было показано, что водовороты, полученные Тейлором, возникают также в плоском пограничном слое потока, имеющем вогнутую стенку. Модель движения, рассмотренная Гертлером, показана на рис. 1.7. а. Сведения о вихрях Тейлора—Гертлера были дополнены последующими работами других исследователей.

Наличие парных водоворотов на дне потока по его ширине было обнаружено и ранее, например, Н. Ныrkовым [40] (рис. 1.7 в), А. Н. Лосиевском, М. В. Потаповым и др. Исследованиями Н. С. Зубкова [18] на р. Амударье было показано, что в половодье по ширине потока наблюдается несколько струй. Хотя при этом не определялось, есть ли вращение жидкости в пределах струи, данные позволяют сделать предположение, свидетельствующее о наличии аналогичной поперечной неустойчивости потока при некоторых условиях и в реках с большой шириной русла.

В общем случае рифеля возникают в широком потоке. Кривизна дна возникает и в продольном, и в поперечном направлениях. Из опытов известно, что гребни рифелей имеют криво-

линейное очертание, поэтому Аллен полагает, что поверхность пограничного слоя тоже будет иметь свою пространственную форму, как бы повторяющую рельеф рифелей.

Для того чтобы объяснить, как появляется трехмерная пространственная форма пограничного слоя, Аллен обращается к исследованиям Грегори и Феллера. Эти исследователи получили трехмерный пограничный слой при протаскивании медленно вращающегося диска в жидкости. При этом в пограничном слое возникала неустойчивость, весьма похожая на водовороты Тейлора—Гертлера (рис. 1.7 б). Парные водовороты последних аналогичны логарифмическим спиральям на поверхности диска. Учитывая также данные Тани, показавшего, что водовороты Тейлора—Гертлера возникают в ламинарном и турбулентном пограничном слое на вогнутой твердой поверхности, можно ожидать, что водовороты Грегори проявляют себя при условиях наличия пространственного пограничного слоя потока.

Поэтому Аллен приходит к выводу, что имеется две причины поперечной неустойчивости потока: 1) возникновение центробежной неустойчивости, где линии тока вогнуты и 2) появление макровязкостной неустойчивости, где пограничный слой потока приобретает местную пространственность вследствие кривизны дна или вращения потока около квазивертикальной оси.

Таким образом, Аллен установил единственность формы неустойчивости потока в поперечном отношении. Такой формой, по Аллену, является движение, содержащее спиральные водовороты с противоположным вращением соседних водоворотов и с осями, параллельными друг другу и среднему направлению потока. Такая система может быть названа многоструйным потоком, если принять, что движение потока вдоль индивидуальной струи совершается по некоторой спиральной линии.

Теоретические предпосылки были проверены Алленом путем сопоставления измеренных в опыте систем линий трения, полученных путем измерения касательных напряжений на дне, с топографией рифельного дна. Этим экспериментом убедительно подтвердилась теория. Об этом свидетельствуют поля векторов напряжений и планы дна, приведенные на рис. 1.8.

Предложенная Алленом эмпирическая формула для лотковых рифелей, по его мнению, оказалась вполне пригодной и для речных дюн, и для эоловых барханов. Заметим при этом, что по общепринятым количественным критериям (по Шильдсу, например, или по абсолютным размерам) эти формы относятся к разным классам гряд.

1.3.2.3. Лабораторные исследования формирования гряд — баров. Лабораторные исследования баров либо проводились одновременно при общем исследовании движения и формирования гряд в лотке, как одна из форм гряд, либо ставились специальные исследования крупных гряд, занимающих всю ширину русла. На некоторых из них следует кратко остановиться.

a)

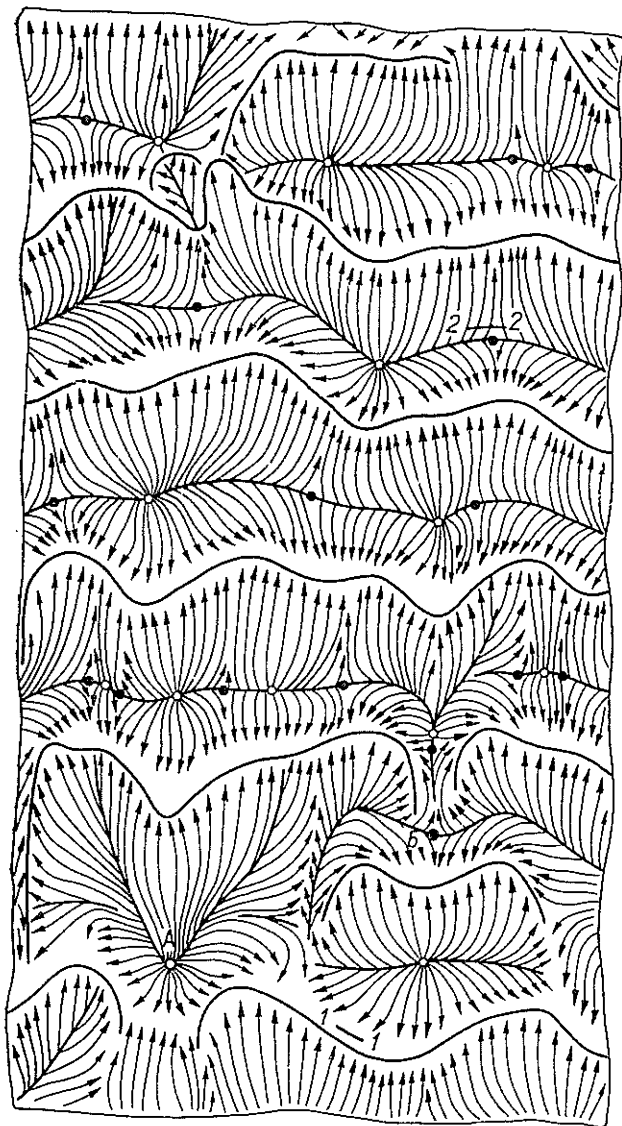
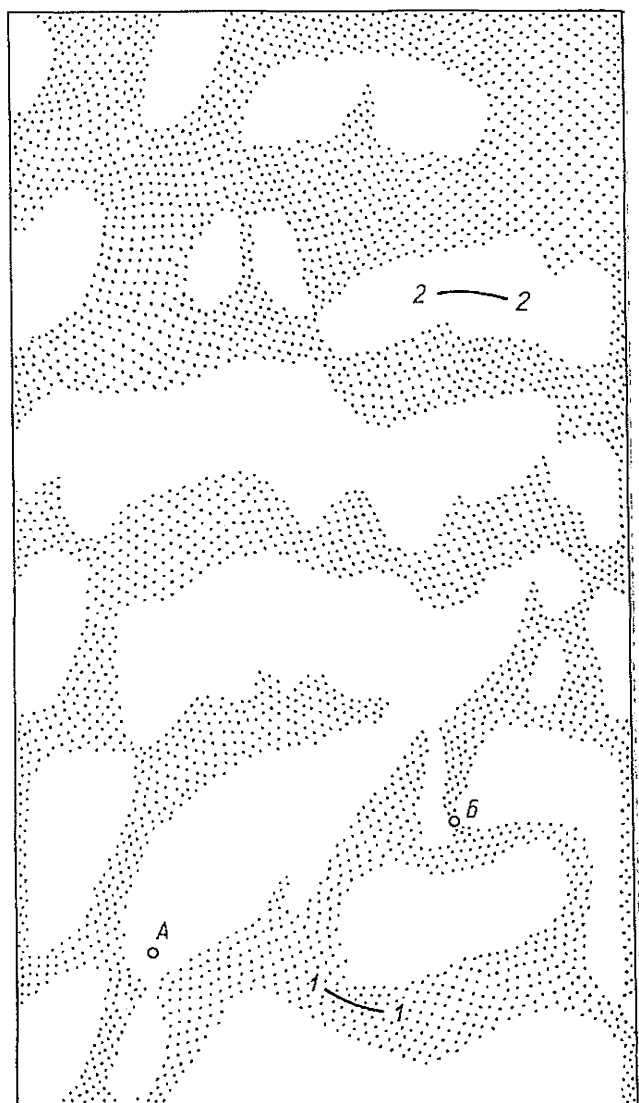


Рис. 1.8. Поля векторов касательных напряжений (а)
1—1 — зоны сходящихся векторов (отрыв); 2—2 — зоны расходя
наинизшей точке подвала,

б)



и соответствующие деформации дна (б), по Аллену.
 щихся векторов (удар); А — узел (источник), соответствующий
 Б — седловина гребня (сток).

В 1969 г. К. Ашида и С. Наран [63] опубликовали статью, посвященную исследованию структуры форм подвижного дна. Это исследование проводилось с целью выяснения влияния ширины русла на формы гряд. Опыты проводились в двух лотках, имеющих различную ширину: 60 и 20 см. Дно выложено песком крупностью 0,71 мм. Одновременно с конфигурацией дна исследовалась турбулентная структура потока и потери энергии.

В результате исследований авторы получили в лотках три характерные формы дна, которым соответствовали три различ-

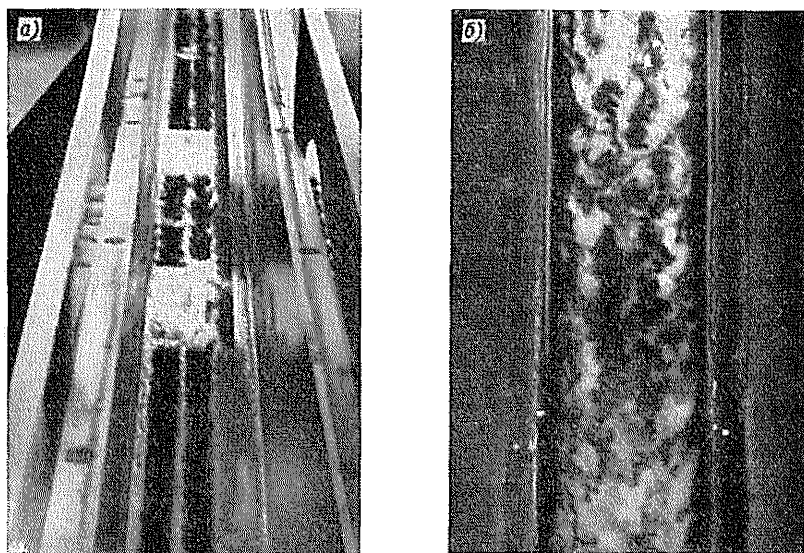


Рис. 1.9. Струйные течения, обнаруженные в экспериментах Ашида—Наран.
а — дно, б — поверхность потока.

ные формы турбулентности потока. В лотках при некоторых режимах потока образовались песчаные бары, имеющие форму перекошенных гряд, занимающих всю ширину потока. Длина этих баров оказалась достаточно устойчиво пропорциональна ширине лотка. Роль ширины лотка состояла в формировании шага этих гряд, пропорционального в среднем четырем ширинам потока.

Другой вид донных форм представляли гряды и рифеля, длина которых оказалась пропорциональной глубине потока.

Третий вид донной конфигурации был назван Ашидой и Наран продольными полосами-валиками. На рис. 1.9 представлены фотографии этой любопытной формы дна. (Вспомним, что аналогичные формы дна были получены и Лосиевским.) Продольными валиками на дне поток как бы делится на несколько изолированных микролотков, в пределах которых существовали по-

токи, формирующие на дне гряды, пропорциональные размерам микроротка.

Характер свободной поверхности такого лотка показан на рис. 1.9 б. Визуализированная алюминиевым порошком свободная поверхность потока как бы отражает наличие границ раздела между соседними микроротками.

Результаты опытов Ашида и Нараи подтверждают выводы, полученные Алленом. По-видимому, появление полос-валиков на дне потока есть результат продольной и поперечной его неустойчивости, аналогичной схеме, представленной Алленом на рис. 1.6 г. Во всяком случае эти формы убедительно свидетельствуют о наличии в потоке одинаковых продольных струй, разделенных между собой жидкими стенками. (Заметим, что рассматривая вторичные течения, С. А. Офицеров [41] приводит аналогичные структуры потока.)

Представляют интерес и выводы, полученные этими исследователями. К. Ашида и С. Нараи [61] доказали, что изменение турбулентной структуры потока находится в тесной зависимости с изменением формы дна. Они показали также, что полученные ими три вида формы дна могут сосуществовать при одном режиме. Поэтому этими авторами размеры донных форм связываются с разными масштабами турбулентности. По мнению Ашида и Нараи, возникновение и размер валиков связан с продольными масштабами турбулентности, размер гряд и рифелей — с вертикальным масштабом (глубиной), а размер баров зависит от ширины потока.

К. Ашида и Ю. Танака [62] провели схожее с описанным исследование, целью которого было выяснение влияния боковых стенок на формирование гряд. Авторы пришли к выводу, что влияние стенки сказывается на возникновении вторичных течений, приводящих к меандрированию оси потока.

В работах Леопольда и Вольмана, Розовского и Базилевича, Т. Хаяши, Инокути и Сукегава, Аккерса и Чарльтона, Шена и Комуры и др., которые будут рассмотрены ниже, длина гряд — баров связывается с шагом меандр, который, в свою очередь, зависит от ширины русла.

1.3.2.4. Выводы из экспериментальных исследований. Логично остановиться на основных выводах, касающихся определяющих факторов образования гряд, полученных разными исследователями.

Исследования Анцыферова [4], Пратта и Смита [90] показали, что длина рифелей не зависит от глубины и скорости течения, тогда как на длину гряд (дюн или баров?) эти характеристики влияют существенно. Авторы пришли также к выводу о том, что дюны есть периодическая форма дна, а рифели не являются таковой. По мнению Анцыферова, а также Пратта и Смита, длина рифелей может быть получена как функция только диаметра донных наносов. Этому же мнению придерживается и

С. Ялин. Этот вывод противоречит формуле Аллена и не согласуется с мнением Саймонса—Ричардсона [91]. Длина же дюн, по данным Пратта и Смита, в меньшей степени зависит от ширины потока, чем от его глубины, что опять-таки совпадает с мнением Ялина, но не согласуется с данными Танака.

Расхождение мнений в выделении определяющих факторов на основные характеристики донных форм может быть связано с тем, что разные исследователи одним и тем же термином называют разные гряды, принадлежащие к разным классам, которым свойственны разные, иногда противоположные зависимости от элементов потока и наносов.

Сказанное свидетельствует о том, что четкое определение рифелей, дюн и баров — есть первостепенная задача.

1.4. Разномасштабность песчаных гряд и русловых форм

Основные теоретические и эмпирические расчетные формулы грядового движения наносов разработаны на основе анализа лабораторных исследований. От того, применительно к какому классу гряд они разработаны и к какому классу гряд в натуре будут применены, зависит успех или неудача их использования. Поэтому особенно важно установить, есть ли или нет аналогии в лабораторных и натуральных классах гряд и если есть, то какими употребляемыми в настоящее время терминами определяются эти классы.

Мы установили, что разными исследователями используются разные термины при разделении донных гряд на два класса. Иностранными исследователями такое разделение делается либо применительно к лабораторным грядам, либо применительно к натурным. Сопоставление лабораторных классов гряд с натурными в целях создания единой классификации не приводится, хотя имеется ряд исследований, где авторы (например, Аллен) прямо указывают на сходство лабораторных рифелей и натуральных дюн и барханов в пустыне. Этот же вывод был сделан и Н. С. Знаменской совместно с В. М. Клавен при исследовании движения гряд в половодье 1963 г. на р. Поломети. Еще тогда эти гряды были отнесены к классу крупномасштабных рифелей.

При рассмотрении донных форм, исследованных Д. Галаем [73] на р. Северная Саскачеван, оказалось, что диаметр наносов натуральных рифелей существенно превышал критический диаметр донных наносов, по Шильдсу, соответствующий рифелям. Таким образом, оказалось, что по качественным признакам натурные донные формы следовало отнести к рифелям, а по критерию Шильдса и принятым количественным размерам форм — к дюнам.

Ф. Сентюрк [95] в лотке получил донные образования, имеющие форму лепестков розы, т. е. схожие с обычными рифелями. Размеры этих образований и крупность наносов, также существенно превысили принятые для рифелей критические величины. Гидравлические сопротивления потока при этих формах гряд оказались подчиненными тому же закону, что и для дюн. Поэтому Ф. Сентюрк, чтобы увязать идентичность зависимости для этих форм и условия Шильдса, предложил называть эти формы «антирифелями» и сдвинуть критическое значение критерия Шильдса в сторону увеличения диаметра до 1,6 мм.

Приведенные факты свидетельствуют о неспособности принятой за рубежом терминологии отобразить существование двух классов гряд, отличающихся не количественными, а качественными признаками. В принципе разделение русловых форм на два класса (два структурных уровня) — микро- и мезоформ, по Н. Е. Кондратьеву [25, 26, 47], а затем и по Д. Кеннеди [94] и Ашида [62, 63], должно применяться безотносительно к лабораторным или натурным грядам, поскольку в их определения заложены, в отличие от других определений, качественные признаки, отражающие как происхождение этих форм, так и их роль в русловом процессе. Однако практически Кондратьев отнес все лабораторные гряды к микроформам как раз по признаку их малости, т. е. по признаку, который никак не заложен в его определение микроформ, и тем самым лишил свое разделение на классы того преимущества, которым оно обладает.

Кроме того, если все лабораторные гряды, по мнению Н. Е. Кондратьева, есть микроформы, это значит, что все лабораторные гряды должны быть подчинены одному закону развития. Как видим из предыдущего, это мнение ошибочно.

Если же разным классам гряд отвечают разные функциональные связи их характеристик с гидравлическими характеристиками потока и наносов, а исследованиями ряда авторов показано, что лабораторным рифелям и натурным дюнам (микроформам) свойственна одна и та же зависимость их развития, то очевидно, что лабораторные рифеля и натурные дюны должны рассматриваться лишь как разномасштабные формы одного класса, и этот класс следовало бы называть одним термином.

В качестве такого термина нам кажется удобным использовать либо термин «микроформы», либо термин «рифеля». Что касается второго класса лотковых гряд, обычно называемых дюнами, грядами или барами, то качественные отличия их от рифелей заключается в том, что они определяют геометрию сечения потока. Длина этих гряд соизмерима с шириной лотка. Рассматривая эти формы, обнаруживаем качественное сходство с натурными мезоформами или барами.

Если вернуться к типизации русловых натуральных баров, разработанной Саймонсом (рис. 1.1), то можно также заметить

аналогию лотковых и натуральных мезоформ (баров). Выполненное Аккерсом и Чарльтоном исследование на крупномасштабной установке, соизмеримой с малыми естественными водотоками, свидетельствует о том, что и на этой установке возникали крупные гряды (бары), расположенные в шахматном порядке, которые имели прямую аналогию с натурными побочными.

В типизации баров, разработанной Кеннеди (табл. 1.1), также упоминаются подтипы баров, аналогичные подтипам лотковых гряд — баров, выделенных автором в своей классификации гряд.

Выше упоминались также исследования японских ученых, обнаруживших прямую связь между длиной лабораторных баров и шириной лотка. Из исследований И. В. Попова [42] известно, что шаг натуральных побочных также пропорционален ширине русла. По-видимому, можно отметить, что существование одинаковой зависимости длин лотковых баров и натуральных побочных от ширины потока свидетельствует о принадлежности тех и других к одному классу гряд.

Второй класс гряд следует определить как класс мезоформ (баров) применительно и к лабораторным, и к натурным потокам. Это позволяет также сделать вывод о том, что бары, как и рифеля, могут иметь разные масштабы, зависящие от размера потока.

В то же время существуют факты, свидетельствующие о том, что разномасштабность гряд каждого класса зависит не только от размеров потока. В этой связи еще раз обратимся к экспериментам Ф. Сентюрка. В одном и том же лотке им были получены рифеля, укладываемые в общепринятые рамки их количественных размеров, и «антирифеля», существенно превышающие эти размеры. Как мы уже показали, эти последние являются просто новым масштабом рифелей, размер которых определяется новой совокупностью гидравлично-гранулометрических условий. В связи со способностью мезоформ сохраняться в русле в виде унаследованных форм от некоторого предшествующего режима, мы можем наблюдать несколько порядков баров на одном и том же участке реки. Это обстоятельство было замечено многими исследователями. Особенно наглядны разномасштабные бары на горных реках, характеризующихся редкой изменчивостью стока. Все это говорит о том, что следует различать разномасштабность русловых форм каждого класса, связанную с размерами русла и разномасштабность, связанную с характеристиками руслового (лоткового) потока, которые могут меняться в связи с изменчивостью стока (или заданных гидравлических условий в лотке).

Под термином «дюны» или «гряды» обычно понимают и формы дна, являющиеся мелкомасштабными барами (в лотках) и крупномасштабными рифелями (в крупных лотках и в натуре). Это приводит к неопределенности как в терминологии, так

и в практическом использовании расчетных формул. В этом смысле очень важно рассмотреть существующие формулы для расчета параметров гряд.

1.5. Существующие формулы для параметров гряд

При теоретическом описании процесса формирования гряд Кеннеди использует метод «малых возмущений» — волн малой амплитуды¹, длина которых совпадает с длиной донных гряд.

Д. Кеннеди [81] показал, что фазовый сдвиг местного расхода донных наносов по отношению к местной средней скорости на вертикали, использованный им при получении искомых зависимостей, различен для разных форм гряд. Для рифелей и дюн² он не превышает их длины. В итоге Кеннеди получил формулу для длины гряд

$$\lambda_r = \frac{2\pi H \text{Fr}^2 \left(\text{sh} \frac{2\pi H}{\lambda_r} + \frac{2\pi H}{\lambda_r} \right)}{\text{ch}^2 \frac{2\pi H}{\lambda_r}} \quad (1.1)$$

и высоты

$$\Delta = h \left[1 - \frac{\text{th} 2\pi \frac{H}{\lambda_r}}{\text{Fr}^2 2\pi \frac{H}{\lambda_r}} \text{ch} \frac{2\pi H}{\lambda_r} \right], \quad (1.2)$$

где h — высота волн на поверхности потока; H — глубина потока, $\text{Fr} = \frac{v}{\sqrt{gH}}$.

Т. Хаяши [77], как и Кеннеди, принял модель потока с волнистым дном и волнами малой амплитуды на свободной поверхности. Используя также сдвиг фаз средней и донной скоростей потока, определяющий расход наносов, Хаяши получил выражение для сдвига фаз δ в упрощенном виде

$$\frac{\alpha}{\delta} = \frac{v^2}{g}, \quad (1.3)$$

где α — размерный коэффициент, зависящий от характеристик потока и наносов; v — скорость потока.

Выражение (1.3) с учетом полученного Кеннеди соотношения $\delta \approx \lambda_r$ может быть записано в виде

$$\lambda_r = \frac{\alpha}{H \text{Fr}^2} = \frac{k dB}{H \text{Fr}^2}. \quad (1.4)$$

¹ Подробно это исследование уже описано в советской литературе в монографиях [12, 15].

² «Дюны», по терминологии Д. Кеннеди, без учета их принадлежности к классу рифелей или баров.

А. Мерцер [85], развивая идеи, выдвинутые Кеннеди, получил несколько видоизмененное выражение для длины гряд по сравнению с формулой (1.1)

$$\lambda_r = \frac{2\pi H Fr^2}{\operatorname{th} 2\pi \frac{H}{\lambda_r}} \left[1 - \frac{2}{\operatorname{ch}^2 \frac{2\pi H}{\lambda_r}} \right] \quad (1.5)$$

и выражение для скорости перемещения гряд

$$c_r = -m \frac{2\pi H v \operatorname{ch} 2\pi \frac{H}{\lambda_r}}{\lambda_r^2}, \quad (1.6)$$

где m — опытный коэффициент.

Ю. Танака [99], так же как и предыдущие исследователи, полагал, что длина гряд идентична длине поверхностных волн и, принимая, в отличие от предыдущих исследователей, что эта длина совпадает с шагом меандр, который, в свою очередь, пропорционален ширине русла, получил следующую зависимость для длины гряд:

$$\lambda_r = \frac{a Fr^2 \sqrt{2\pi B H}}{\sqrt{\operatorname{th} \frac{2\pi H}{B}}}, \quad (1.7)$$

где a — опытный коэффициент; B — ширина русла. Для высоты гряд Танака предложил формулу

$$\Delta = \frac{2H}{2p + 1 - \frac{\tau_c}{\tau_0}} (1 - Fr^2) \left(1 - \frac{\tau_c}{\tau_0} \right) \left(1 - \frac{q}{\kappa} \right)^{0.5}, \quad (1.8)$$

где $p=2,1$ для баров и $p=6,9$ для рифелей; κ — параметр, равный

$$\kappa = (1 - Fr^2) \frac{2\pi H}{I \lambda_r}, \quad (1.9)$$

I — уклон потока; τ_0 — касательное напряжение у дна; τ_c — то же при начале трогания наносов; q — элементарный расход воды.

Как отмечает Танака, формула (1.8) приводит к большому разбросу точек, если она используется для расчета натуральных высот гряд.

Известна также формула длины гряд, полученная К. Ишизаки и А. Тсучия [102]

$$\lambda_r = \frac{2\pi H \left(2 \operatorname{th} \frac{4\pi H}{\lambda_r} + \operatorname{th} \frac{2\pi H}{\lambda_r} \right)}{Fr^2}, \quad (1.10)$$

которые учитывали комбинацию поверхностных волн разной длины, приводящую к системе гряд разной длины.

Б. А. Шуляк [52] для руслового потока конечной глубины на основании анализа размерностей получил формулу

$$\lambda_r = c_{\pi} \left[\frac{\rho_{\tau} - \rho}{\rho} \frac{gd^3}{\gamma^2} \right]^{0,1} (v + v_0) \frac{\sqrt{H}}{g}, \quad (1.11)$$

где c_{π} — опытный коэффициент; d — диаметр донных наносов; v_0 — неразмывающая скорость. Эта формула может быть для сравнимости с предыдущими представлена в следующем виде:

$$\lambda_r = c_{\pi} \left[\frac{\rho_{\tau} - \rho}{\rho} \frac{gd^3}{\gamma^2} \right]^{0,1} \frac{v'}{\sqrt{gH}} H, \quad (1.12)$$

где $v' = v + v_0$.

Здесь полезно также привести теоретическую формулу Буссинеска для длины гряд

$$\lambda_r = H \sqrt{2\pi} Fr, \quad (1.13)$$

а также формулу А. В. Караушева [22]

$$\lambda_r = 0,44 H \sqrt{N}, \quad (1.14)$$

где $N = \frac{MC}{g}$, а $M = 0,7C + 6$; C — коэффициент Шези.

На основании упоминавшихся выше экспериментальных исследований Аллен получил следующую формулу для зависимости характеристик рифелей от гидравлических характеристик потока:

$$\frac{\lambda_p}{b_p} = 6,4 \left(\frac{\Delta_p}{H} Fr \right)^{0,27}, \quad (1.15)$$

где b_p — ширина рифеля.

Формула (1.15) при условии замены показателя степени 0,27 на 0,25 может быть записана в виде

$$\frac{\Delta_p}{H} \approx \frac{\left(\frac{\lambda_p}{b_p} \right)^4 0,0006}{Fr}. \quad (1.16)$$

Из формулы (1.16) можно определить пределы изменения λ_p/b_p . Эти пределы регламентируются реально возможной наибольшей величиной отношения Δ/H , которое обычно не превышает 0,5, и наименьшим значением $\Delta/H \approx 0,05$. Тогда, если принять, согласно рис. 1.2, что предельное число Fr , при котором могут возникать рифеля, равно 0,5, а минимальное значение принять $Fr_{\min} = 0,05$, то отношение λ_p/b_p окажется в пределах 1,5—4,5. Д. Аллен приводит близкие к упомянутым пределам значения изменения λ/b .

Г. В. Железняков и В. К. Дебольский [14] предложили формулу для высоты гряд, включая гряды из заменителей песка

$$\Delta = 1,25H \left[\frac{v}{v_0} \frac{d}{H} \frac{w}{\sqrt{gH}} \right]^{0,2}, \quad (1.17)$$

а также для скорости перемещения гряд c_r

$$\frac{c_r}{\sqrt{gd}} = 0,001 \left[\frac{v}{v_0} \frac{H}{\Delta} \sqrt{\frac{w}{v_0}} \right]^2, \quad (1.18)$$

где w — гидравлическая крупность донных наносов.

Известны также формулы Ю. Т. Борщевского [49] для размеров гряд. Их длину он рекомендует определять по формуле

$$\lambda_r = \frac{10^7}{k} \frac{H \left(\frac{v}{w} \right)^{0,5} \left(\frac{d}{H} \right)^{0,75}}{\text{Fr}}, \quad (1.19)$$

а высоту

$$\Delta = 10^7 \frac{v}{w} \left(\frac{d}{H} \right)^{0,75} H. \quad (1.20)$$

Для крутизны гряд зависимость Борщевского имеет вид

$$\frac{\Delta}{\lambda} = k \text{Fr} \left(\frac{v}{w} \right)^{0,5}, \quad (1.21)$$

где k — коэффициент.

Высоту гряд Моххамед Жиль [75] определяет по следующему выражению:

$$\Delta = \frac{H(1 - \text{Fr}^2)}{2\pi\alpha_1} \left(1 - \frac{\tau_0}{\tau_c} \right), \quad (1.22)$$

где $2\pi\alpha_1 \approx 6$, по Ялину.

Как видно из приведенных формул, они различны по структуре и показывают зависимость параметров донных форм (как правило, без указания класса форм, к которым они относятся) либо в прямой, либо в обратной пропорциональности числу Фруда. В некоторых формулах учитывается влияние крупности донных наносов, в большинстве же формул это влияние не отражено, что, по-видимому, является их недостатком.

Н. А. Михайлова [37] и С. Ялин [103] длину гряд (также без отнесения этих форм к одному из названных классов) связывают с глубиной

$$\lambda_r = kH. \quad (1.23)$$

З. Д. Копалиани [28] при дополнительном учете крупности донных отложений получает зависимость

$$\lambda_r = k_1 H + ad. \quad (1.24)$$

В существующих формулах элементов гряд отражены противоречия, обусловленные отсутствием четкого деления русловых

образований на классы и определения класса форм, для которого справедлива каждая формула.

В этом смысле следует пересмотреть формы дна, полученные в опытах разных исследователей и определенные ими как «дюны». Многие из этих форм по предлагаемой классификации следовало бы считать крупномасштабными рифелями. В то же время гряды, полученные в узких лотках, занимающие всю его ширину, но по абсолютным размерам попадающие в количественные градации принятые для рифелей, следовало бы отнести к маломасштабным барам. Такое разделение соответствовало бы тем качественным признакам, которые установлены гидрометеорологической теорией руслового процесса для микро- и мезоформ и отражало бы различие в происхождении форм разного класса.

В связи со сказанным представляется важным исследовать существующие представления о причинах возникновения рифелей и баров. Для этого однако полезно было бы остановиться на существующих обобщениях в области грядового движения наносов.

1.6. Анализ некоторых обобщающих исследований в области грядового движения наносов

Современное состояние науки в области транспорта донных наносов характеризуется появлением ряда обобщающих исследований. К этим работам за рубежом следует отнести монографию Ялина [103] — сборник лекций профессорско-преподавательского состава Государственного университета США в Колорадо под редакцией Шена и серию статей и генеральных докладов Д. Кеннеди в рамках ТАСК комитета, МАГИ и других изданий. В СССР вопросам грядового движения наносов посвящены монографии [15, 37 и 52]. Рассмотрим кратко, к каким обобщающим выводам пришли иностранные коллеги, какие вопросы остались невыясненными и какие противоречия имеются в этих исследованиях.

1.6.1. Обобщение вопросов речной гидравлики в Государственном университете США в Колорадо

Государственный университет США в Колорадо в 1971 г. издал двухтомник «Речная механика», в котором помещены лекции по этой проблеме преподавателей университета. В этом сборнике рассматриваются вопросы гидравлики потока в жестких границах, геоморфологии русла и превращения рек, дается характеристика наносов, условий их трогания, рассматривается

течение в аллювиальных руслах, приводится анализ форм взвешенных наносов, общий расход наносов, дается описание приборов и методов измерений, приводится анализ устойчивости аллювиальных русел, рассматриваются вторичные течения и регулирование рек, рассматривается проблема моделирования речных процессов, инженерные аспекты русловой гидравлики, размыв у опор и у трубопроводов, деформации связанных грунтов, распространение солёности в эстуариях, проблемы эрозии почв и ее регулирование, занесение водохранилищ и моделирование плотностных потоков. Эта работа представляет собой разностороннее рассмотрение целого комплекса вопросов, входящих в проблему русловой гидравлики. Более или менее подробное рассмотрение этого сборника в рамках настоящей работы не представляется возможным, поскольку объем этого двухтомника составляет более тысячи страниц. При рассмотрении разных вопросов, поставленных в настоящей монографии, мы уже касались и впредь будем касаться отдельных вопросов, рассмотренных в этом издании. Здесь же ограничимся только вышеприведенным перечислением рассмотренных в этой книге вопросов с тем, чтобы ориентировать заинтересованного читателя. Упомянем только, что подробнее содержание этого двухтомника рассмотрено А. Б. Векслером и В. М. Доненбергом [5].

1.6.2. Обобщение вопросов, касающихся движения наносов, выполненное Ялиным («Механика транспорта наносов»)

В 1972 г. вышла в свет одна из крупнейших зарубежных монографий, посвященная транспорту донных наносов. В этой книге подробно освещаются вопросы, связанные с механикой двухфазного потока, с условиями трогания наносов и их устойчивости на дне, рассматриваются распределение взвеси по глубине потока и гидравлические сопротивления при грядовом дне. Целый раздел этой монографии посвящен грядовому движению наносов. Ялин в предисловии к книге сформулировал свою задачу — попытаться ответить на вопрос «почему» возникают гряды, а не повторять вслед за большинством исследователей «как» они возникают. Мы уже рассматривали классификацию Ялина. Отметим здесь, что Ялин выступает против детализации классификации гряд. Термины: плоские, трехмерные гряды, бары, по его мнению, не отражают причины возникновения гряд, а лишь освещают некоторые вторичные признаки донных форм. По Ялину, термин „sand bars“ означает только крупномасштабные дюны, имеющие большую относительную длину и меньшую крутизну. И рифеля, и дюны, по Ялину, могут быть и плоскими, и трехмерными, что зависит только от B/H и H/d .

Остановимся на основных выводах Ялина.

1. Возникновение гряд определяется сочетанием местных нарушений геометрии дна и макромасштабной турбулентности по-

тока. В результате, если появляются изгибы донной и поверхностной линий тока, шаг которых равен $1000d$, то шаг этот равен длине рифеля. Когда же появляются макротурбулентные структуры, продольный размер которых соизмерим с глубиной, то развиваются дюны, шаг которых и совпадает с продольными размерами упомянутых турбулентных структур.

2. В процессе образования окончательной формы гряд не происходит существенного изменения их длины, растет только их высота.

3. Дюны образуются только в турбулентном потоке, чего нельзя твердо сказать о рифелях, так как они возникают на первоначально гладком дне, когда зерна утоплены в ламинарном подслое.

4. Длина рифелей пропорциональна критерию Шильдса или диаметру зерен

$$\lambda_p = f(\text{Re}_{*d}), \quad (1.25)$$

а длина дюн пропорциональна, кроме того, еще и относительной гладкости, т. е. глубине потока

$$\lambda_d = f\left(\text{Re}_{*d}, \frac{H}{d}\right). \quad (1.26)$$

Длина же антидюн определяется числом Фруда

$$\lambda_a = f(\text{Fr}). \quad (1.27)$$

В итоге, анализируя роль каждого критерия, Ялин получает подтверждение ранее полученных им зависимостей, что длина рифеля пропорциональна $1000d$, длина дюн пропорциональна $2\pi H = 6,28H$, а длина антидюн пропорциональна числу Фруда, как это следует из выражения Кеннеди.

С. Ялин получил очень интересные графики, построенные в координатах $\frac{\lambda}{d} = f\left(\frac{H}{d}\right)$ при разных значениях Re_{*d} . Для построения этих графиков Ялин использовал обширный экспериментальный материал разных авторов. В итоге эти графики совмещены в один (рис. 1.10), из которого следует, что длина рифелей и дюн подчиняется найденному Ялиным закону. Автор монографии нанес на этот график четыре точки, взятые наугад из неиспользованных данных по широкому лоткам Тсубаки, Кавасуми и др. [101]. Три из этих точек (рис. 1.10) не попали в диапазон кривых Ялина, а четвертая не совпала по параметру Re_{*d} .

С. Ялин также получил зависимости для крутизны гряд, построенные на разных графиках в зависимости от критерия подвижности, по Эйнштейну, $y = \frac{\rho' g H I}{\gamma_\tau d}$, взятого по отношению к критическому значению y_0 и для разных сочетаний значения других критериев: H/d и Re_{*d} . Эти графики позволили Ялину

сделать вывод о том, что крутизна гряд вообще не может быть построена на одном графике, поскольку она есть функция трех переменных.

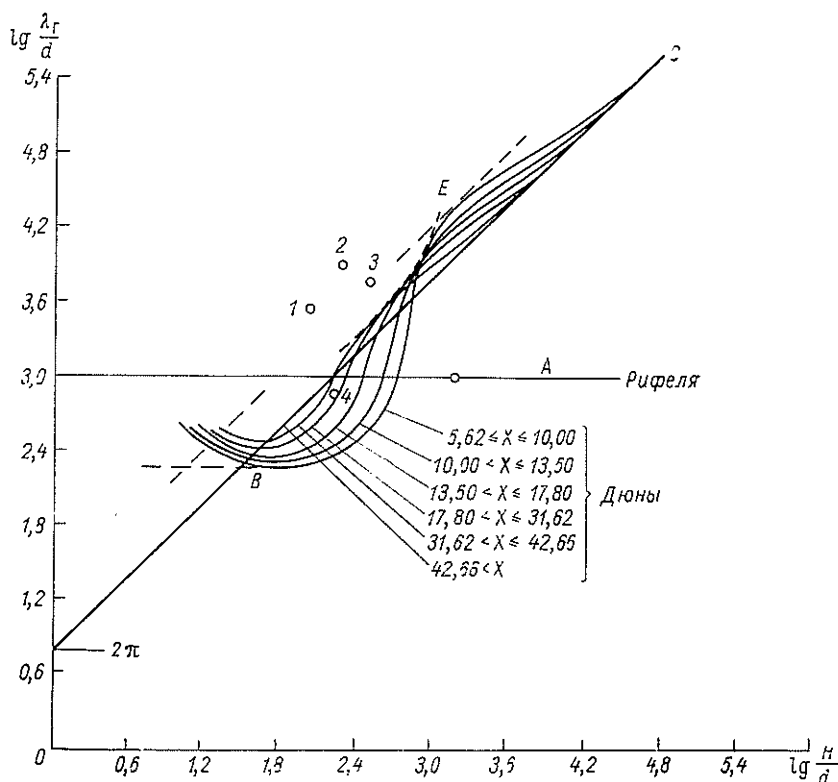


Рис. 1.10. Обобщенная зависимость длины гряд для рифелей и дюн $\left(\frac{\lambda_r}{d}\right)$ от $\frac{H}{d}$ и $X=Re_d$, по С. Ялину.

А — линия, где $\lambda_r \approx d$ и не зависит от H , В — линия, где $\frac{\lambda_r}{d} = 200$, С — линия, где $\lambda_r = 2\pi H$, Е — линия, где $\lambda_r = 20H$; 1, 2, 3, 4 — точки, нанесенные автором монографии.

Все сказанное свидетельствует о том, что требуется еще дальнейшее исследование графиков Ялина, предложенных им критериев и его рекомендаций.

1.6.3. Критика некоторых выводов Ялина

При рассмотрении движения гряд Ялин исходил из двухмерной постановки задачи. Он не рассматривает влияние ширины потока на донные формы.

По мнению Ялина, роль ширины потока проявляется только в регулярности песчаных гряд в третьем измерении. Ее влияние на свойства гряд либо пренебрежимо мало, либо не существует. Главное доказательство этого положения Ялин находит в том, что в большинство (он пишет: «ни в одну») формул для параметров гряд не входит ширина потока.

В своих рассуждениях Ялин иногда обращается к масштабным соотношениям песчаных гряд в лотках и в натуре. При этом им не учитывается, что при переходе от более крупной реки к реке меньшего размера наблюдается как бы искажение размеров баров (уменьшается их крутизна).

Отсутствие четкого понятия о микро- и мезоформах или о рифелях и барах, приводит Ялина к тому, что рассматриваемые им дюны в одних случаях, по-видимому, являются просто крупномасштабными рифелями, а в других — мелкомасштабными барами. Если первые действительно не зависят от ширины потока, то шаг вторых существенно определяется ею.

Поэтому при рассмотрении донных форм следует различать именно названные категории, которые в свою очередь могут быть подразделены на подтипы, не рассматриваемые в работе Ялина, но имеющие существенное значение, как мы увидим ниже, в теории русловых процессов и ее практических применениях.

Использование же числа Фруда как одного из аргументов при разделении донных форм на основные группы, с точки зрения автора, вполне правомерно. Это видно и на рисунке Кеннеди, приведенном в монографии Ялина в качестве опровержения применимости числа Фруда для вышеупомянутой цели. На этом рисунке область, соответствующая рифелям и дюнам, показывает слабое влияние числа Фруда на длину донных форм и сильное влияние параметра j . Однако как раз этот график, так же как рис. 1.2, позволяет выявить область сильного и слабого влияния числа Фруда на длину гряд и установить граничные условия между этими формами. Подобное рассмотрение вполне правомерно. Анализ, например рис. 1.2, позволил установить, что в области рифелей большее влияние оказывает число Фруда, взятое по гидравлической крупности, которое как аргумент, функция или параметр даже не использовалось при построении рис. 1.2. Хотя Ялин отрицает влияние числа Фруда на длину гряд, иногда материалы, используемые им для других целей, все же свидетельствуют о том, что влияние это существует. С. Ялин, например, приводит в своей книге график, заимствованный у Бинье и Вильямса¹ (рис. 1.11), дополненный собственными данными. Этот рисунок свидетельствует о том, что при числах Фруда, больших чем 0,5, в потоке появляются поверхностные волны, размер которых совпадает с шагом гряд. Этот график опровергает

¹ Ссылка на первоисточники приводится в книге Ялина [103].

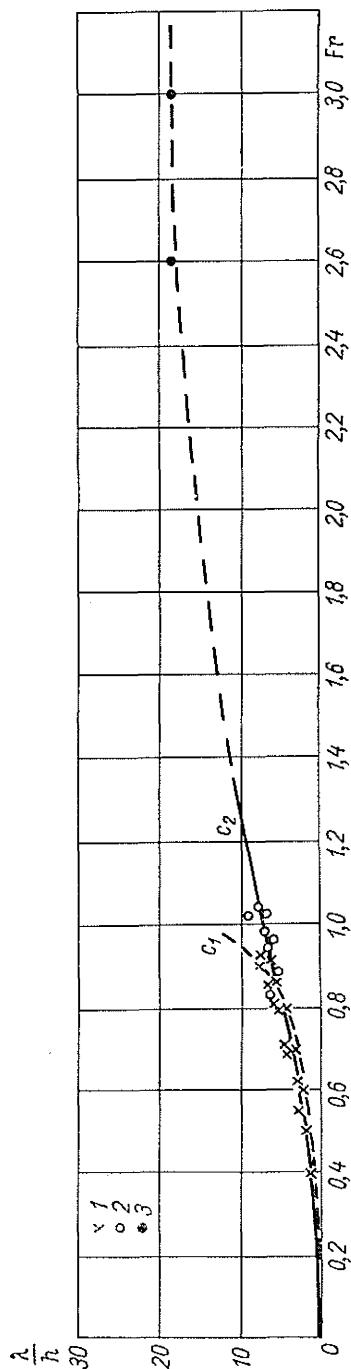


Рис. 1.11. График связи форм гряд и антидюн, по Банье—Вильямсу.

1, 2, 3 — точки, нанесенные соответственно по данным Бинье—Вильямса, Ялина и по данным экспериментов, проведенных автором совместно с Н. А. Котловой; C_1 — кривая, отвечающая формуле Лямба, C_2 — кривая, отвечающая формуле Д. Кеннеди.

категорическое суждение Ялина об отсутствии связи между числом Фруда и характеристиками дюн (баров). На этот график автором нанесено несколько точек по антидюнам из крупного песка, полученным при совместных экспериментах с Н. А. Котловой. Как видно на рис. 1.11, точки легли на продолжение кривой Кеннеди, проведенной Ялиным на этом графике.

Как мы уже отмечали, Ялин рассматривает двухмерный поток. Однако им делается заключение о том, что гряды бывают и трехмерные, и это связано с неустойчивостью потока. Как видим, эта точка зрения близка к мнению Аллена и других авторов. Однако Ялин считает, что увеличение V/H и H/d приводит к большей свободе потока отклоняться от прямолинейного движения, направляемого бровками русла, что приводит к возникновению трехмерных гряд.

Здесь пространственность потока смешивается с пространственностью форм. По мнению Ялина, большая свобода связана с возникновением пространственности донных форм, а не с появлением большего числа струй, в пределах которых дюна (крупномасштабный рифель) будет плоской или пространственной в зависимости от гидравлики потока и наносов.

Так или иначе, несмотря на различие мнений по некоторым вопросам, монография Ялина является крупным достижением в рассматриваемой области.

1.6.4. Обобщение вопросов, касающихся движения наносов, выполненное Д. Богарди («Транспорт наносов в аллювиальных руслах»)

В то время, когда настоящая монография была готова к сдаче в печать, автор получил любезно присланную ему монографию Д. Богарди [64], посвященную транспорту наносов в естественных руслах. Поскольку ее объем превышает 800 с, ознакомление с этой работой потребует известного времени. Предварительный просмотр книги позволяет сообщить читателю, что эта книга состоит из трех частей. В первую часть включены вопросы формирования донных и взвешенных наносов и условий их движения. Рассматриваются характеристики донных отложений (размеры, форма, удельный вес частиц, их гранулометрия). Исследуются существующие зависимости для определения гидравлической крупности шаров и частиц, отличающихся от формы шара. Рассматриваются условия трогания частиц и силы, действующие на частицу. Анализируются условия образования рифелей и гряд, между которыми Богарди не видит принципиальной разницы. В отличие от Пратта и Смита, а также Ялина и др., Богарди считает, что развитие гряд зависит от глубины потока, от числа Фруда и величины сдвига фаз, расхода донных наносов и скорости течения.

Богарди анализирует существующие способы, методы, а также критериальные зависимости, позволяющие разделить всю область транспорта донных наносов на области разных режимов движения, характеризующихся разной формой дна. При этом исследуются и усовершенствуются также существующие зависимости для гидравлических сопротивлений, а также формулы расхода донных наносов. Отмечается, что влияние глубины на транспорт донных наносов может быть учтено относительной гладкостью H/d . Богарди также широко использует критериальный комплекс $\frac{d}{\sqrt[3]{\tau_0} g^{-1/3}}$. Все рассматриваемые зависимости сравниваются с данными по венгерским рекам. Делаются также попытки усовершенствовать расчетные формулы и зависимости с учетом влияния гряд.

В монографии Богарди уделено большое внимание общим вопросам: принципам разделения наносов на донные и взвешенные, обобщению теорий движения наносов, рассмотрению «режимной теории», принципам моделирования и др. Большая часть монографии отведена практическим аспектам проблемы и анализу натурных данных, изложению которых посвящены две другие части книги. Для более глубокого анализа материалов,

обобщений и практических рекомендаций, изложенных в фундаментальной монографии Богарди, потребуется, конечно, значительно большее время, чем смог уделить автор при подготовке данной рукописи к печати.

1.6.5. Обобщение грядового движения наносов, выполненное Д. Кеннеди

Д. Кеннеди, который в 1963 г. предложил новую теорию образования гряд, все больше и больше обращается к общим вопросам русловой гидравлики, определяя роль и место донных форм в речном русле и общем русловом процессе. После исследования механизма возникновения гряд Кеннеди интересуется инженерными аспектами аллювиальных потоков. Д. Кеннеди различает влияние на гидравлические соотношения крупномасштабных форм (макроформ) и мелкомасштабных форм (микроформ). К первому типу русловых форм Кеннеди относит тип русла, влияющий на $Q = f(H)$ и форму поперечного сечения.

К мелкомасштабным формам (микроформам) Кеннеди относит рифеля и дюны, которые возникают при малых расходах воды и определяют шероховатость русла. Как видим, в этом вопросе Д. Кеннеди почти полностью следует типизации руслового процесса и выделению структурных уровней Н. Е. Кондратьевым, И. В. Поповым и позднее Н. С. Знаменской [15].

Однако Кеннеди интересуется, как мы уже говорили, инженерная сторона вопроса. Поэтому вспоминая полученные еще Бруксом выводы о том, что для нескольких расходов воды одна и та же шероховатость дна может наблюдаться при том же самом соотношении глубина—уклон, Кеннеди считает установление условий однозначности одной из важнейших задач, связанных с грядами.

По мнению Кеннеди, существенное влияние на форму гряд оказывает температура воды, влияние которой еще не достаточно изучено. Влияние взвешенных наносов на форму гряд проявляется через уменьшение коэффициента гидравлического трения (до 25%) и изменение эпюры скорости и приводит к увеличению расхода наносов при данных H и I .

Формулируя условия однозначности, Д. Кеннеди прежде предлагает различать долговременные периоды поведения рек и кратковременные периоды, так же как условия, соответствующие коротким или длинным участкам рек. По его мнению, также имеется существенное различие в поведении рек и лабораторных потоков в лотках. Характер однозначных и многозначных связей для этих условий должен быть различным.

По мнению Кеннеди, прежде чем рассматривать какие-либо вопросы, относящиеся к рекам или лабораторным потокам, следует рассмотреть условия однозначности связей. Считается, что зависимая переменная является однозначной функцией группы

независимых переменных, если каждому сочетанию независимых переменных соответствует только одно значение функции.

Рассматривая связи скорости, уклона и гидравлических переменных, Кеннеди показывает, что скорость v есть однозначная функция гидравлических сопротивлений λ , λ есть однозначная функция v . В то же время уклон I есть однозначная функция v , но v есть многозначная функция I , так как одному уклону, как следует из приводимого Кеннеди рисунка, соответствует три значения v . Соответственно v_* — есть однозначная функция v , но v — многозначная функция v_* .

Независимыми переменными являются те величины, которые вводятся в систему, а зависимыми — те, величина которых определяется величиной независимых переменных. При назначении независимых переменных следует помнить, что число их определяется данной ситуацией. Это означает, что назначение меньшего числа независимых переменных не определяет однозначно данную ситуацию, а выбор большего числа независимых может привести к нереальной, невыполнимой ситуации.

Для удобства выбора независимых переменных Кеннеди рекомендует исследовать ситуации, наблюдающиеся в натуральных условиях, и предлагает для этой цели составленную им совместно с Бруксом табл. 1.2.

Из данных табл. 1.2 следует, что при выборе независимых переменных следует различать систему, для которой они определяются. Так, для коротких участков русла или для кратких периодов, за которые исследуются деформации, выбор в качестве независимых переменных расхода воды и глубины потока ведет к получению единственных связей, однозначных решений, так как твердый расход, ширина русла, скорость, уклоны и сопротивления будут зависимыми переменными. При этом заданными являются свойства воды и наносов, включая диаметр частиц. Для длинных участков рек независимыми переменными уже являются расходы воды и наносов, которыми и определяется однозначность ситуации, включая крупность донных отложений.

Ограничивающие факторы учтены у Кеннеди для лотков в виде заданной ширины. Если учесть, что в русловых потоках тоже могут встречаться такие ограничения (скажем, участки сужения долин, за счет выхода коренных пород), то безусловно в этом случае в число независимых переменных следует внести (для этого случая) и ширину долины. Эта таблица безусловно должна служить вспомогательным средством при сопоставлении лотковых и натуральных данных.

Из анализа данных табл. 1.2 можно сделать вывод о том, что средние глубины и скорость потока при исследовании гряд в лотках являются теми независимыми переменными, которые однозначно определяют искомые связи. Вспомним, что к аналогичному мнению пришел и К. Нордин в результате статистического анализа форм гряд.

Определение независимых переменных для разных систем потока, приводящих к однозначности, по Кеннеди—Бруксу

Система	Независимые переменные		Однозначные связи	Зависимые переменные
	свойства жидкости, наносов и ускорение силы тяжести	характеристика потока		
Лотки	$\nu, \rho, \rho_T, d, \sigma, \omega, g$	Q, H, B	+	Q_T, ν, I, λ
		Q, Q_T, B	+	H, ν, I, λ
		ν, H, B	+	Q, Q_T, I, λ
		H, I, B	—	Q, Q_T, ν, λ
		Q, I, B	—	Q_T, H, ν, λ
Короткие участки естественного потока	$\nu, \rho, \rho_T, g, d, \sigma, \omega$	Q, H	+	Q_T, B, ν, I, λ
		H, I	—	Q, Q_T, B, ν, λ
		Q, I	—	Q_T, B, H, ν, λ
Длинные участки рек	ν, ρ, ρ_T, g	Q, Q_T	+	$B, H, \nu, I, \lambda, d, \sigma, \omega$
Очень длинные участки	ν, ρ, ρ_T, g геология	Факторы, определяющие формирование речного стока, в том числе хозяйственная деятельность человека	+	$Q, Q_T, B, H, \nu, I, \lambda, d, \sigma, \omega$

Примечание. σ — стандартное отклонение диаметра наносов по гранулометрической кривой наносов от среднего диаметра; λ — гидравлические сопротивления.

Известна интересная попытка А. Рейнольдса разделить русловые формы по масштабу времени их развития от геологического времени до времени, необходимого на формирование рифеля, которая косвенно отражает существование разных структурных уровней.

Из всего сказанного следует, что разные авторы, изучая русловые формы (гряды) на разном структурном уровне (рифеля и бары или микро- и мезоформы) в то же время сталкиваются с разными масштабами русловых форм одного структурного уровня. Отсутствие единых представлений и четких разделений этих форм приводит как к нечеткости в терминологии, так и к неверному построению и применению расчетных зависимостей. В связи со сказанным необходимо остановиться на происхождении гряд каждого класса.

1.7. О происхождении песчаных гряд

1.7.1. Краткий обзор ранних исследований, посвященных происхождению гряд

При разделении гряд на два класса нельзя обойти молчанием причину их возникновения. Поскольку каждому классу гряд, как было установлено выше, соответствуют разные функциональные зависимости, можно предполагать, что и причины, вызывающие возникновение рифелей и баров различны.

В отечественной и зарубежной литературе этому вопросу уделяется большое внимание. Попытки объяснить причину образования гряд были связаны с теоретическими исследованиями грядового движения наносов и с поисками уравнения движения влекомых наносов в форме гряд и аналитического выражения для размеров и скорости их перемещения.

Решая эту задачу, Экснер вынужден был в качестве одного из исходных условий принять начальную синусоидальность дна. Используя выражение для баланса наносов и пропорциональность твердого расхода скорости потока, Экснер получил выражение, приводящее к изменяющимся во времени формам дна, напоминающую гряды.

И. И. Леви усовершенствовал решение Экснера путем учета транспортирующей способности потока.

М. А. Великанов и Е. М. Минский связали происхождение гряд с наличием макромасштабной турбулентности. По этой теории плоское дно в силу наличия низкочастотных пульсаций скорости должно принять грядовую форму. Идея Великанова впоследствии была использована К. В. Гришаниным для решения этой же задачи и многими другими.

В. М. Маккавеев использует уравнение движения потока с учетом коэффициента турбулентного обмена, по А. В. Караушеву. При этом в качестве основной идеи принимается периодичность гидродинамических процессов. Эта идея была использована также А. Н. Ляпиным, который принял в качестве постулата наличие автоколебательности потока и получил выражение для изменяющихся во времени профилей гряд.

Р. Бэгнольд считает, что возникновение рифелей на первоначально гладком размываемом дне зависит главным образом от неустойчивости линий тока над выступающими зернами дна.

А. Раудкиви показал, что генерация турбулентности в придонном слое и диссипация у стенки между зонами отрыва потока является важным фактором в установлении периодической структуры вторичной неустойчивости потока.

Д. Кеннеди [81], Ю. Танака [99], Т. Хаяши [77], А. Мерцер [85] и другие, формулы которых приведены выше, по сути дела, используют идею В. М. Маккавеева о наличии периодичности гидродинамических процессов. Используя теорию волн малой амплитуды и связывая происхождение гряд с существованием таких волн на свободной поверхности потока, а также вводя условие отставания по фазе твердого расхода от местной скорости, эти исследователи получают аналитические выражения для параметров гряд. Как видно из сказанного, до сего времени нет единых представлений о причинах возникновения гряд. Так, идея Великанова об определяющей роли макромасштабной турбулентности оспаривается Д. Кеннеди, Б. А. Шуляком [52] и С. М. Анцыферовым [4]. Последний опровергает идею Великанова постановкой эксперимента в сосуде со стоячей водой, где по дну медленно протаскивалась платформа с песком, на которой возникали рифеля при заведомом отсутствии макромасштабной турбулентности в толще водной массы. Причиной возникновения гряд Шуляк считает наличие микровыступов на дне потока, связанных с крупностью частиц и с увеличением скорости потока, превышающей скорость трогания частиц. Как мы увидим далее, эта точка зрения соответствует мнению и других исследователей. (Рыжиков)

1.7.2. Исследование происхождения разных классов гряд

Остановимся здесь на некоторых аспектах происхождения гряд, касающихся разного механизма образования рифелей и баров. Возникновение микроформ Н. Е. Кондратьев связывает с макротурбулентностью руслового потока. Возникновение же мезоформ им связывается с наличием неравномерного установившегося потока. При этом механизм воздействия потока на дно не рассматривается им ни в том, ни в другом случае. Однако отметим, что для разного класса форм констатируются разные причины их образования.

Ж. Шабер и Ж. Шовин [67], исследуя образование рифелей в лотке, подчеркивают, что, в отличие от длинных гряд, рифеля возникают на всем участке дна внезапно, сразу повышая шероховатость дна. Этими исследователями описывается также случай возникновения рифелей от местного препятствия в виде искусственной бороздки и валика. При таком нарушении дна также возникают рифеля, но не одновременно на всей площади дна, а постепенно, путем передачи возмущения вниз по течению от источника возмущения. Ж. Шабер и Ж. Шавин исследовали режим устойчивости возникновения рифелей от местного возмущения и привели некоторые рекомендации, которых мы не будем касаться, а отошлем заинтересованного читателя к первоисточнику.

С. Ялин [103], говоря о происхождении гряд, также считает, что происхождение рифелей, дюн (баров?) и антидюн различно и что основными признаками разделения донных форм должны служить физические, качественные признаки, а не количественные характеристики.

В качестве общей причины возникновения донных форм Ялин принимает наличие некоторого возмущения в потоке, возникшего от некоторого «препятствия». Эта идея, как мы видим, повторяет идею И. М. Коновалова, Б. А. Шуляка и др. Однако эта причина не объясняет вышеупомянутого факта возникновения рифелей на дне потока одновременно по всему дну. С. М. Анцыферов [4] полагает, что при некоторых значениях скорости и диаметра частиц возмущающее действие выступа в две-три песчинки может явиться причиной одновременного появления рифелей по всей длине потока. Однако экспериментаторам известно, что когда рифеля возникают одновременно по длине потока, они имеют правильный шаг. Чтобы объяснить этот факт названной причиной, следует допустить, что возмущающие выступы размещены по дну через равные расстояния. В противном случае при случайном размещении выступов на дне возникали бы лишь серии очагов зарождения рифелей, а не строгая их цепочка. Ни Анцыферов, ни Ялин не объясняют этого факта. При этом Ялин разделяет также идею М. А. Великанова о влиянии на возникновение всех классов гряд крупномасштабных вихрей в потоке. Полагая, что длина возмущений в потоке определяет длину донных форм, Ялин считает, что эта длина в дальнейшем не меняется (что противоречит фактам). Выступая против теории Д. Кеннеди, считающего, что возникновение донных форм связано с наличием поверхностных волн малой амплитуды, С. Ялин полагает, что этот постулат не может быть принят, так как известно возникновение рифелей и гряд в закрытых напорных трубопроводах. Поскольку в этом случае отсутствует свободная поверхность, то не могут существовать и поверхностные волны, а значит число Фруда, являющееся определяющим критерием у Д. Кеннеди, не может характеризовать возникновение

гряд. Как мы уже показали, это мнение противоречиво. Приведем еще один факт. С. Ялин, говоря о возникновении рифелей, приводит схему, заимствованную у Вильямса и Кемпа, показывающую (рис. 1.12), что наличие выступа на дне в две-три песчинки ведет к появлению водоворотной зоны за выступом, которая отжимает линии тока так, что длина поверхностной волны составляет две-три длины водоворотной зоны, что примерно пропорционально тысяче диаметрам частиц. Как видно из сказанного, в этом заключении имеется противоречие. С одной стороны, Ялин отрицает роль поверхностной волны в образовании гряд, а с другой, поясняя причину возникновения рифелей, Ялин не обходится без этой волны. Кроме того, еще никем не показано, что в напорных потоках возникают бары, форма которых, в от-

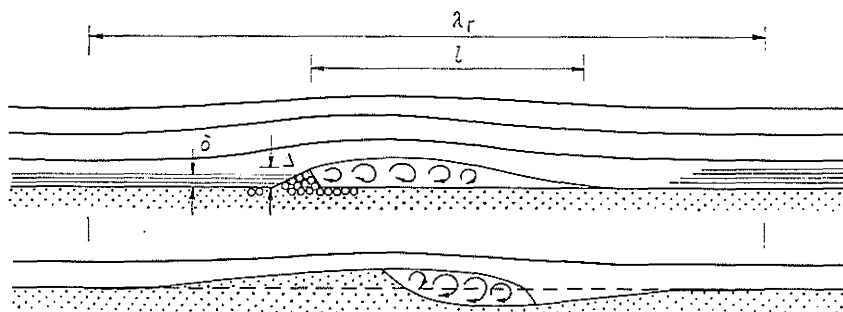


Рис. 1.12. Схема происхождения рифелей, по Вильямсу—Кемпу.

личие от рифелей, связана со свободной поверхностью потока. По Ялину, вслед за Вильямсом и Кемпом, длина поверхностной волны, как и у Д. Кеннеди, совпадает с длиной рифеля.

Схема возникновения рифелей на рис. 1.12 предполагает увеличение длины водоворота, а значит поверхностной волны с увеличением высоты выступа. Экспериментальное же исследование кинематики потока, проведенное А. Б. Клавен и З. Д. Копалиани [9], показало, что продольный масштаб тех самых турбулентных структурных образований, с которыми Ялин связывает возникновение рифелей с увеличением относительной высоты выступов шероховатости не возрастает, а убывает (рис. 1.13). Эти экспериментальные данные не подтверждают схему Вильямса, Кемпа, Ялина. В схеме на рис. 1.12 не учтена также роль гидравлических характеристик потока. На рис. 1.13 б приведены данные автора об изменении эксцентриситета придонных водоворотов с изменением гидравлических характеристик потока (с грядовым дном), а также зависимости изменения продольного (a) и вертикального размера (δ) этих водоворотов с увеличением u/v_0 . Поэтому, по-видимому, нельзя считать наличие препятствий необходимой и достаточной причиной возникнове-

ния гряд, тем более в той роли, которую приписывает препятствию Ялин.

Казалось бы близкое по предпосылкам мнение Шуляка должно привести к одинаковому объяснению причин возникновения рифелей. Однако толкование происхождения гряд у Ялина и Шуляка различны. Наличие препятствия на дне, по мнению Шуляка, приводит к изменению местной скорости по эффекту

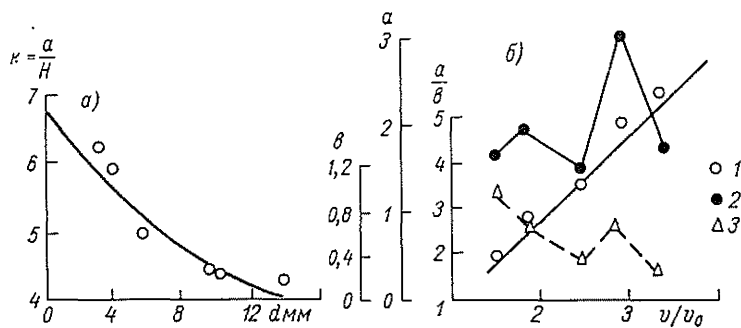


Рис. 1.13. Зависимость размеров продольных водоворотов.

а — от диаметра наносов, по Клавену—Копалнани; б — от относительной скорости потока, по Знаменской; 1 — эксцентриситет водоворотов, 2 — продольный размер водоворотов, 3 — поперечный размер водоворотов.

Бернулли. И именно эта местная скорость, взаимодействуя с местными характеристиками частиц подвижного дна, приводит к их группировке.

Длина рифелей или периодических структур, как их называет Шуляк, не делая различий между грядами, не связана с масштабом турбулентности. Отсутствие этой связи Шуляк доказывает экспериментальными данными, полученными С. М. Анцыферовым для песка и полистирола при одних и тех же значениях глубины и скорости потока, т. е. при одних и тех же масштабах турбулентности. Полученное в этих опытах различие длины гряд на порядок не может быть объяснено связью макромасштабной турбулентности с длиной гряд.

1.7.3. Исследование происхождения рифелей, по Аллену [61]

Как следует из теории и экспериментов Аллена, достаточно подробно описанных в одном из предыдущих параграфов, наличие зернистого дна в потоке ведет к появлению устойчивых равноудаленных друг от друга замкнутых структур в поле изолиний донного трения. Существование названных структур, по Аллену, означает появление продольной неустойчивости потока при малой его энергии. Возникновение продольной неустойчивости ведет к появлению двухмерных рифелей, которые вызывают пространственность поверхности пограничного подслоя. Это в свою

очередь вызывает поперечную неустойчивость потока, выражающуюся в образовании спиралевидных водоворотов. Поток становится многоструйным со сложным строением струй.

Следует иметь в виду, что водовороты Аллена не являются теми макромасштабными турбулентными образованиями, о которых говорит М. А. Великанов. На рис. 1.7 видно, что эти водовороты расположены в непосредственной близости от дна и появление их не обязательно приводит к нарушению свободной поверхности потока. В этом различие представления Аллена и Ялина. Кроме того, структуры Аллена являются квазистойчными структурами, в отличие от движущихся структур Великанова—Ялина. Нам представляется, что рассмотрение пространственной картины поля линий трения, а значит линий токов, позволило Аллену рассмотреть природу появления именно класса рифелей. Д. Аллен показал, что появление рифелей связано с наличием многоструйности потока, т. е. с таким упорядочением его турбулентности, которая ведет к образованию в непосредственной близости от дна систем векторов касательных напряжений, как бы изолированно существующих рядом друг с другом. Если вспомнить при этом струи, изолированно существующие в потоке, полученные Лосиевским, Офицеровым, а также Ашидой и Нараи, то представления Аллена становятся еще более убедительными.

1.7.4. О происхождении баров

Специальных исследований происхождения баров, насколько нам известно, не проводилось. В 1968 г. нами было высказано предположение о том, что мезоформы в натуральных условиях возникают тогда, когда русловой поток на рассматриваемом участке характеризуется одинаковыми гидравлическими параметрами, т. е. тогда, когда наступает выравнивание гидравлических характеристик по ширине потока и по длине участка. Было отмечено, что такие условия наблюдаются при высоких расходах воды, да и то не в каждый год. По сути дела выравнивание гидравлических характеристик в пределах руслового потока означает наличие единой русловой струи. Тогда можно связать происхождение баров (мезоформ) с одноструйностью руслового потока.

Разрушение, перестройка баров происходит в том случае, если наступают гидравлические условия большей интенсивности, соответствующие возникновению баров более крупных размеров. Если же интенсивность процесса, характеризуемая отношением твердого и жидкого расходов, уменьшается, то бары, возникающие при предыдущем режиме, сохраняются в русле в виде неуследованных форм. Передвигаясь за счет вторичных гряд, бары подвергаются местной перестройке — сработке гребня и занесению подваля.

Поскольку условия, при которых бары перемещаются подобно микроформам (рифелям), при квазиравномерном режиме слишком кратки (вследствие недолговременности существования условий одноструйности потока), постольку основная форма существования баров — мезоформ — есть косвенное перемещение за счет вторичных гряд и соответственно их жизни сопутствует неравномерный режим. Это обстоятельство уязвляется с определением мезоформ по Кондратьеву, который связывает их существование с неравномерным режимом. Следует уточнить только, что происхождение их связано с квазиравномерным одноструйным течением, а не с неравномерным режимом.

По-видимому, в дальнейшем представляет интерес исследование формирования одно- и многоструйности потока и нахождения специальных критериев, характеризующих это явление. Пока же на основании анализа рассмотренной литературы можно высказать лишь общие соображения о происхождении двух классов гряд и существующих теориях возникновения гряд. Ширина струи (или число струй, на которое распадается поток данной ширины B), по-видимому, будет зависеть от расхода воды, уклона дна и донных сопротивлений. Вместо расхода воды, очевидно, можно рассматривать отдельно влияние скорости течения и глубины потока.

По-видимому, чем медленнее течение воды при прочих равных условиях, тем менее устойчив поток (понимая под устойчивостью здесь способность потока существовать в виде единой струи). Увеличение глубины потока должно вести к увеличению его устойчивости, поскольку отношение B/H при этом уменьшается (при той же ширине потока) и можно ожидать меньшего числа струй, так как ширина струи, по данным Аллена, пропорциональна глубине потока и, как правило, не превышает при начале движения двух глубин потока. Увеличение уклона дна должно приводить к увеличению устойчивости потока, т. е. к уменьшению количества струй. В то же время на количество струй в русле должна влиять и шероховатость русла — диаметр частиц, слагающих русла. Можно полагать, что увеличение диаметра частиц должно приводить к уменьшению устойчивости потока и к увеличению количества струй по его ширине при прочих равных характеристиках (конечно, при этом критическая величина начала образования гряд будет иной, чем при мелких частицах).

Думается также, что для образования единой струи в пределах всей ширины русла необходимо определенное сочетание вышеперечисленных гидравлических характеристик.

Высказанные соображения требуют экспериментальной проверки и специального исследования для нахождения как критериев перехода одноструйного движения в многоструйное, так и определения их критической величины. Простейшим способом определения ширин струй, по-видимому, является определение

ширины гряд. Однако этот способ не всегда применим, поскольку в натуральных потоках могут присутствовать и унаследованные от предыдущего режима гряды. Границу струй, очевидно, можно также обнаружить по анализу скоростного поля сечения потока, поскольку на границах струй следует ожидать появления так называемого кинематического эффекта.

1.7.5. Заключение

Рассмотрение существующих теорий возникновения гряд позволяет подвести некоторые итоги.

1. Существует два мнения по вопросу о единстве или различии причин возникновения донных форм. Некоторые исследователи считают, что природа возникновения рифелей и баров различна; другие же придерживаются как раз обратного мнения.

2. Существуют четыре главные точки зрения на причину возникновения гряд: 1) макротурбулентность потока, 2) возмущающее действие микропрепятствий на дне, 3) существование периодических колебательных процессов жидкости, 4) струйность течения, вызываемая касательными напряжениями у дна.

Попытаемся увязать существующие противоположные точки зрения.

Можно ли считать, что природа возникновения гряд разного класса различна? Да, можно, если учесть, что различия в одноструйном и многоструйном течениях подобны различиям плоского и пространственного потоков. Если размеры донных гряд пропорциональны размерам струи, то для одноструйного потока они будут определяться параметрами русла или лотка, а для многоструйного потока они не будут прямо связаны с этими параметрами, так как будут зависеть от диаметра струи.

Можно ли считать, что природа возникновения рифелей и баров одна и та же? Да, можно, если рассматривать механизм взаимодействия размываемого дна и гидравлических характеристик в пределах одной струи в многоструйном потоке и в пределах единой русловой струи. Это мнение подтверждается сходством форм рифелей и баров, приведенных Кеннеди в табл. 1.1. По-видимому, можно ожидать и существования одинаковых зависимостей параметров баров и рифелей, рассматриваемых не по отношению ко всему потоку, а применительно к той струе, в которой существует данный рифель. Однако эта точка зрения требует еще специальной проверки.

Однако поскольку в инженерной практике и в практике исследований размеры рифелей рассматриваются лишь применительно к данному потоку, а не к отдельной струе, следует говорить о существовании разных причин их возникновения и о существовании разных зависимостей для описания двух классов гряд. По-видимому, в сказанном проявляется диалектический закон единства противоположностей.

Можно ли увязать разные причины возникновения гряд, высказываемые разными исследователями? Думается, что можно.

Если, по Аллену, причиной возникновения рифелей является определенное поле донных касательных напряжений, то, по-видимому, этому полю и соответствующей ему системе винтовых струй будет отвечать и определенная структура макротурбулентности потока. Должен ли масштаб этой макротурбулентности обязательно быть пропорционален глубине потока или его ширине? Очевидно нет. Алленом было показано, что замкнутая структура в полях донного трения может быть такой, при которой не нарушается свободная поверхность потока, т. е. масштабы турбулентных образований при этом, очевидно, будут также меньше глубины потока. Это вполне увязывает точку зрения Аллена и Шуляка—Анцыферова. Это, по мнению автора, также не противоречит и существованию турбулентной гипотезы, если отвлечься от ее утверждения о самих масштабах турбулентных структур. Разве отрицается Шуляком или Анцыферовым возникновение турбулентных структур в придонном слое при протаскивании платформы с песком в сосуде со стоячей водой?

Другое же опровержение турбулентной теории, приведенное Шуляком при сравнении длин гряд в потоке одинаковой глубины и скорости, но при разном донном материале, может быть отклонено по следующим соображениям. Различные размеры частиц песка и полистирола, по теории Аллена, должны привести к разным полям трения на дне, а значит к разным масштабам структур в полях трения и, как следствие,— к разным масштабам турбулентных образований.

Этот же пример позволяет увязать и представления, связанные с ролью выступов на дне потока, с теорией струйности.

Если шероховатость, как таковая, ведет к установлению определенных полей трения, то в принципе нельзя отрицать роль выступов на дне как источников возмущения. Пока еще не установлено, каким именно путем возникает та или иная структура полей трения, но факт связи ее с выступами шероховатости очевиден.

В то же время показанные Алленом структуры касательных напряжений периодичны по длине и ширине потока, что также не противоречит теориям, связывающим появление гряд с тем или иным законом периодичности явления.

Конечно непротиворечивость основных теорий возникновения гряд рассмотрена здесь с самых общих позиций.

Более или менее разобравшись с происхождением донных гряд следует дать определение грядам каждого класса.

Микроформы, или рифеля, это такие русловые или лотковые формы, которые возникают в результате многоструйности потока и размеры которых несоизмеримы с размерами руслового потока, а потому они определяют шероховатость дна, потери энергии по длине и расход донных наносов.

Мезоформы, или *бары*, это такие русловые или лотковые формы, которые возникают в результате одноструйности потока, при относительно выравненных гидравлических характеристиках в пределах струи, размер которых соизмерим с размерами потока, определяет его морфометрию, деформацию дна и местные потери энергии.

В результате изменчивости режима, приводящей к появлению разного числа струй по ширине потока, русловые формы могут иметь разные масштабы, связанные с размерами струи, их определяющей. Вследствие инерционности донных форм с изменением режима более крупные формы могут оставаться унаследованными от предыдущего более активного режима.

Мезоформы, или *бары*, обладают наибольшей инерционностью, что определяет их существование в виде унаследованных реликтовых форм как основной формы существования, тем более что режимы, их создавшие, относящиеся к высоким паводкам, наблюдаются сравнительно редко.

Микроформы вследствие их малой инерционности подвергаются перестройке в сравнительно короткое время и можно считать, что практически они существуют при установившемся режиме. Исключение могут составлять более крупные масштабы микроформ, которые могут оставаться унаследованными в течение сезона до наступления новых более высоких расходов.

Рассмотренные закономерности происхождения гряд разных классов и установление определения микро- и мезоформ позволяют перейти к рассмотрению разных формул для характеристик гряд с точки зрения принадлежности этих формул для гряд данного класса.

1.8. Формулы для расчета параметров гряд каждого класса

Рассмотрим сначала зависимости, относительно которых доподлинно известно, что они разработаны для данного класса гряд.

Эмпирическая зависимость, изображенная на рис. 1.2, объективно отображает существование двух классов донных форм и наличие для них разных зависимостей. Существование различных зависимостей отображено наличием двух семейств кривых. На этом графике класс баров (мезоформ) подразделен на три подкласса, совпадающие по типам мезоформ, выделенным Поповым и Кондратьевым [25, 26, 42], а также Кеннеди [94], Саймонсом [91]. Однако эта зависимость, полученная преимущественно по лабораторным данным, не учитывает разномасштабности донных форм разного класса. Разномасштабность русловых

форм, как было установлено выше, определяется размерами потока или размерами струй. Можно предположить, что разномасштабность форм одного класса следует учесть с помощью использования коэффициента φ , представляющего отношение $(B/H)_{\text{граф}}$, полученного по лабораторным данным, к $(B/H)_{\text{н}}$, полученному в натуре,

$$\varphi = \frac{10}{(B/H)_{\text{н}}}.$$

Учет соотношения $(B/H)_{\text{граф}}$ и $(B/H)_{\text{расч}}$ привел автора к получению уточненных выражений для крутизны гряд и скорости их перемещения c_{Γ} .

Каждому классу (и подклассу) соответствуют следующие зависимости для крутизны Δ/λ_{Γ} и скорости перемещения c_{Γ} донных форм, с учетом влияния относительной ширины лабораторного и натурального потоков.

Для крутизны плоских баров (ленточных гряд) в начале движения наносов

$$\frac{\Delta}{\lambda_{\Gamma}} = \frac{0,068 \text{ Fr} \left(\frac{v}{w} \right)^{1,33} H}{B}. \quad (1.28)$$

Скорость перемещения этих баров выразится формулой

$$c_{\Gamma} = c_{\Gamma \text{ макс}} \frac{H}{B} \left[1,6 \text{ Fr} \left(\frac{v}{w} \right)^{1,33} - 1 \right], \quad (1.29)$$

где $c_{\Gamma \text{ макс}} = 350$ м/сут.

Крутизну перекошенных и крутых баров (побочней и осередков) можно определять по формуле

$$\frac{\Delta}{\lambda_{\Gamma}} = \frac{1,25 \text{ Fr} \left(\frac{v}{w} \right)^{0,2} H}{B} - \frac{H}{B}, \quad (1.30)$$

а скорость перемещения этих баров по выражению

$$c_{\Gamma} = c_{\Gamma \text{ макс}} \frac{H}{B} \left[1,6 \text{ Fr} \left(\frac{v}{w} \right)^{0,2} - 1 \right]. \quad (1.31)$$

Для класса рифелей семейство кривых Δ/λ_{Γ} характеризуется тем, что кривые имеют максимум, а значит две ветви, что приводит к двум формулам, справедливым для левой части семейства кривых на рис. 1.2 и для правой части этого семейства. Граница между этими частями проходит по $v/w \approx 6$ и соответствует максимальной крутизне рифелей $\Delta/\lambda_{\Gamma} = 0,15$.

Крутизна рифелей (микроформ) при $2 < \frac{v}{w} < 6$ (левая часть семейства кривых) без учета разномасштабности определяется зависимостью

$$\frac{\Delta}{\lambda_p} = \frac{0,0001 \left(\frac{v}{w} \right)^2}{Fr^2} = \frac{0,0001}{\frac{w^2}{gH}}, \quad (1.32)$$

а скорость перемещения этих же рифелей выразится как

$$c_p = 28c_{p \text{ макс}} \left(\frac{Fr}{v/w} \right)^{2,5}. \quad (1.33)$$

Крутизна рифелей (микроформ) без учета разномасштабности при $v/w > 6$ определяется формулой

$$\frac{\Delta_p}{\lambda_p} = \frac{0,62 Fr^{0,5}}{\left(\frac{v}{w} \right)^{0,5}} = 0,62 \left(\frac{w}{\sqrt{gH}} \right)^{0,5}. \quad (1.34)$$

Учет разномасштабности рифелей требует введения в формулы (1.32)—(1.34) коэффициента, учитывающего отношение b/H , использованного для построения $(b/H)_{\text{граф}}$ и $(b/H)_n$,

$$\xi = \frac{(b/H)_{\text{граф}}}{(b/H)_n},$$

поскольку, как было установлено выше, определяет длину рифелей не ширина русла B , а ширина струи b . Если принять, что

$$b = nB, \quad (1.35)$$

а число струй n , в свою очередь, как было установлено выше, зависит от v , H и w , то число струй будет зависеть и от Fr и v/w

$$n = f \left(Fr, \frac{v}{w} \right). \quad (1.36)$$

Как говорилось выше, различие формул для рифелей и баров определяется тем, что размеры донных форм в первом случае зависят от ширины струи и определяются в зависимости от ширины всего потока. При сравнении формул для рифелей и баров с использованием характеристик всего потока оказы-

вается различная зависимость длины форм от Fr и $\frac{v}{w}$. В то

же время было отмечено, что если бы мы сравнивали рифель и бар, каждый применительно к размерам струи, то можно было бы ожидать одинаковых зависимостей. Сказанное позволяет предположить, что в формулы (1.32)—(1.34) следует ввести не коэффициент ξ , а коэффициент φ , который учитывает соотношение размеров всего потока.

Коэффициент n , определяющий число струй в потоке, являясь функцией F_r и v/w , окажется учтенным в выражениях (1.32)—(1.34), которые отличаются от выражений (1.28)—(1.31) лишь показателями степени при F_r и v/w . Различие в функциях F_r и v/w для рифелей и баров подтверждает предположение о том, что при учете разномасштабности рифелей следует учитывать ее по отношению ко всему потоку.

Тогда выражение (1.32) для случая разномасштабных рифелей будет иметь вид

$$\frac{\Delta}{\lambda_p} = \frac{0,001 \left(\frac{v}{w} \right)^2 H}{F_r^2 B} = \frac{0,001 H}{\frac{v^2}{gH} B}, \quad (1.37)$$

а выражение (1.33) с учетом разномасштабности примет вид

$$c_p = 280 c_{p \text{ макс}} \frac{H}{B} \left(\frac{F_r}{\frac{v}{w}} \right)^{2,5}. \quad (1.38)$$

Крутизна рифелей (микроформ) при $v/w > 6$ для тех же условий разномасштабности может быть определена как

$$\frac{\Delta}{\lambda_p} = \frac{6,2 F_r^{0,5} H}{\left(\frac{v}{w} \right)^{0,5} B} = \frac{6,2 \left(\frac{w}{\sqrt{gH}} \right)^{0,5} H}{B}. \quad (1.39)$$

Для скорости рифелей (в м/сут) при $v/w > 6$ справедлива формула

$$c_p = 0,057 c_{p \text{ макс}} \frac{H}{B} \frac{\left(\frac{v}{w} \right)^{0,67}}{F_r^{0,67}}. \quad (1.40)$$

Факт наличия двух зависимостей в области рифелей вносит дополнительные сложности в определение класса донных форм. Этот факт подтверждается и экспериментами Пратта и Смита (см. рис. 1.3, зоны I и II). Если на рис. 1.3 провести прямую через точки, лежащие в зоне I, то можно увидеть, что пологость рифелей в этой зоне имеет одинаковую зависимость с крутизной дон от принятой этими авторами величины $\frac{1}{\psi'}$. Сравним те-

перь зависимости для рифелей и баров. Из сопоставления формул (1.37) и (1.39) с формулами (1.28) и (1.30) видно, что рифеля в области $v/w < 6$ показывают одинаковую с барами зависимость от критерия подвижности (но в разной степени) и противоположную зависимость от числа Фруда, тогда как для зоны $v/w > 6$ наблюдается одинаковая зависимость от числа F_r , но разная от подвижности наносов. Правые же части формул (1.37) и (1.39) свидетельствуют о том, что на крутизну

рифелей главное влияние оказывает число Фруда, взятое по гидравлической крупности наносов (которое, кстати, и используется в формуле Железнякова и Дебольского), тогда как на крутизну баров существенно влияет скорость потока, т. е. обычное число Fr . Это обстоятельство подтверждает точку зрения тех авторов, которые отрицают влияние свободной поверхности потока на формирование рифелей. Однако это, в свою очередь, показывает, что использование числа Фруда при разграничении донных форм правомерно и целесообразно.

По-видимому, в частном случае это учитывалось ранее критерием Шильдса Re_{*d} . Однако учет непосредственно крупности частиц без учета соотношения скорости потока и его глубины привел Шильдса к неправильному назначению критического диаметра. По-видимому, при разделении рифелей и баров следует иметь в виду критическое значение числа Fr , а при разделении двух типов рифелей — критическое значение v/w , или критическое значение Fr_{wd} .

1.9. Анализ формул для параметров гряд по их принадлежности к тому или иному классу донных форм

В большинстве теоретических формул используются некоторые периодические функции th , sh , ch . В качестве аргумента в эти функции входит, как правило, искомая величина λ_r . Лишь в формуле (1.7) Танака вместо λ_r включает ширину русла B . Эта формула имеет большое сходство с формулами для баров Н. С. Знаменской. П. Аккерс [60] показал, что гиперболические функции для руслового потока с барами могут быть выражены через соотношение B/H как

$$\frac{B}{H} = \frac{\pi^2}{2 \operatorname{th} \Phi}, \quad (1.41)$$

где Φ — некоторый аргумент, зависящий от размеров русла и выражаемый через угол естественного откоса. Используя (1.41), можно преобразовать некоторые функции. Тогда упрощенная формула Мерцера примет вид

$$\lambda_r = 1,27 B Fr^2, \quad (1.42)$$

а упрощенная формула Кеннеди [81]

$$\lambda_r = \frac{\pi^5}{2} \frac{H^3}{b^2} Fr^2. \quad (1.43)$$

Упрощенная формула Ишизаки и Тсучия [102] имеет вид

$$\lambda_r = \frac{2\pi^3 H^3}{B Fr^2}, \quad (1.44)$$

и если $b_p \approx \lambda_p$,

$$\lambda_p^2 = \frac{2a\pi^3 H^3}{Fr^2}. \quad (1.45)$$

Попытаемся рассмотреть, каково влияние ширины потока на длину донных форм. Из принятого определения баров следует, что ширина их соизмерима с шириной потока. Отсюда следует, что длина баров λ_r должна быть прямо пропорциональна ширине B . С этой точки зрения формулы (1.7), (1.28), (1.30), (1.37), (1.39), (1.42) должны относиться к барам. Из анализа формул (1.28), (1.30), (1.37), (1.39) можно сделать вывод, что если крутизна донных форм обратно пропорциональна числу Fr или v/ω , то эти формулы построены для расчета рифелей. Поэтому, если длина гряд в формуле прямо пропорциональна Fr или v/ω , то эти формулы относятся к классу рифелей (микрорформ). По этому признаку к классу рифелей необходимо отнести формулы (1.1), (1.2), (1.5), (1.11)—(1.15), (1.21), (1.32) и (1.43). К классу баров (мезоформ) по названному признаку следует отнести формулы (1.4), (1.8), (1.10), (1.17)—(1.21), (1.44). Формула (1.7) представляет исключение из правил. По признаку прямой пропорциональности числу Fr эту формулу следовало бы отнести к классу рифелей, но авторы исследовали такие гряды, которые вызывали меандрирование русловой оси, т. е. мезоформы—бары. Эта формула требует дополнительной проверки.

Сравнение формул для высоты гряд не столь определенно, сколь сравнение формул для крутизны и длины гряд. Разделение этих формул по классам будет выполнено надежно в том случае, если класс донных форм определен по длине гряд, поскольку каждый автор использовал для получения своих зависимостей одни и те же модели явления и одни и те же данные. В том случае, если имеются только формулы для высоты гряд, разделение может быть выполнено из анализа данных и условий получения формул.

Эмпирическая зависимость, предложенная Н. С. Знаменской,

$$\frac{\Delta}{H} = \frac{e + \left(\frac{v}{v_0}\right) 0,8}{\sqrt[3]{\frac{H}{d}}}, \quad (1.46)$$

где e изменяется от $-0,5$ до $0,8$, полученная на основании исследования лабораторных баров и с использованием данных о натуральных рифелях, может использоваться как для расчета рифелей, так и баров. Наличие такой зависимости требует специальной проверки существования принципиальной разницы в зависимостях для высоты рифелей и баров.

1.10. Исследование зависимости для определения числа струй, определяющей класс гряд

Формулу (1.34) можно сравнить с формулой Аллена, поскольку последняя также разработана для класса рифелей. Формулу Аллена (1.16) можно представить в виде

$$\frac{\Delta}{\lambda_p} = \frac{0,0006 \left(\frac{\lambda_p}{b_p} \right)^3 H}{Fr b_p} \approx \frac{kH}{Fr b_p}, \quad (1.47)$$

из чего видно, что она близка к формуле (1.34).

Рассмотрение формулы Аллена свидетельствует о том, что длина рифеля пропорциональна не ширине потока, а ширине рифеля b_p или ширине струи b . Если положить, что $B = b_p n$, где n — число струй, и сопоставить формулы (1.34) и (1.38), приравняв их правые части, получим

$$n = \frac{B}{b} = \frac{1,65 \left(\frac{v}{w} \right)^2 \left(\frac{b_p}{\lambda_p} \right)^3}{Fr}. \quad (1.48)$$

Если принять пределы отношения λ_p/b_p , как было установлено выше, равными 1,5—4,5, то формула (1.39) запишется в виде

$$n = a \frac{\left(\frac{v}{w} \right)^2}{Fr} = \frac{B}{b} \approx \frac{B}{\lambda_p}, \quad (1.49)$$

где $a = 0,018 \div 1,5$.

Выражение (1.49) позволяет использовать экспериментальные данные для получения величины n .

На рис. 1.14 представлен график связи $(v/w)^2/Fr$, B/λ_p и $a = B/d$. Анализ этого графика показывает, что данные, относящиеся к рифелям, грядам, а также переходной области и даже антидюнам для одного значения B/d ложатся на одну кривую. Причем точки, соответствующие рифелям, а также дюнам (крупномасштабным рифелям), попадают на ветви кривых, идущие в направлении оси Y , а точки, относящиеся к барам, соответствующие переходной области, т. е. смыву гряд, располагаются в направлении оси X . По-видимому, такое расположение точек свидетельствует о меньшем влиянии ширины русла на величину рифелей для данного B/d и о слабом влиянии $\frac{(v/w)^2}{Fr}$ на длину баров. В то же время наличие единой

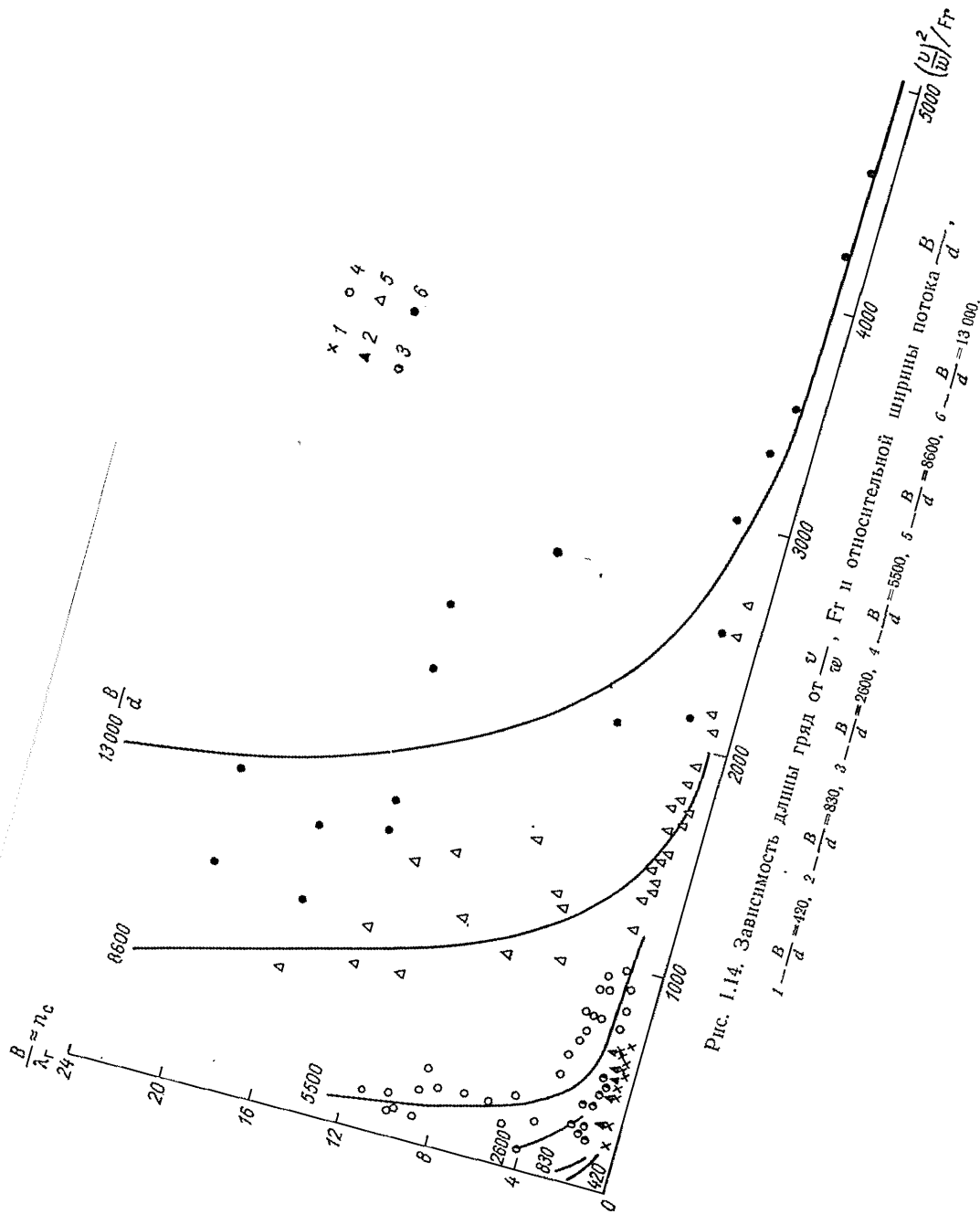


Рис. 1.14. Зависимость длины град от $\frac{u}{w}$, Fr и относительной ширины потока $\frac{B}{d}$.

зависимости для обоих классов форм весьма примечательно и позволяет получить единую формулу в виде

$$n_c = \frac{B}{\lambda_r} = \frac{l \left(\frac{B}{d} \right)^2 Fr^2}{\left(\frac{v}{w} \right)^4}, \quad (1.50)$$

где l по использованным данным может быть принято равным 0,02.

Формула (1.50) может быть использована для определения класса гряд; при $n_c \leq 1$ русловые формы следует рассматривать как бары, а при $n_c > 1$ — как рифеля.

Применение формулы (1.50) для расчета длин гряд (как рифелей, так и баров) может быть допущено только при уточнении величины коэффициента l по более обширным материалам, где l может оказаться функцией дополнительных факторов. Учитывая разброс точек на рис. 1.14, следует ожидать и аналогичного разброса точек при использовании формулы (1.50) в качестве расчетной зависимости для длины русловых форм.

Формула (1.50) получилась при объединении формул (1.47) и (1.35). Если объединить формулы (1.47) и (1.39), мы получим зависимость

$$n_c = \frac{B}{b_p} = p \frac{\left(\frac{v}{w} \right)^2}{\left(\frac{B}{d} \right)^{0,5} Fr^3} \approx \frac{B}{\lambda_p}. \quad (1.51)$$

Формулы (1.50) — (1.51) требуют дополнительной проверки.

Заканчивая главу о грядах, следует сказать также, что перемещение гряд наблюдается не только в реках, но и при вдольбереговом перемещении наносов, а также в зонах морских течений. Можно предположить, что общие соображения, касающиеся образования и поведения гряд, являются справедливыми и для песчаных гряд моря. Такого же мнения придерживаются и другие исследователи (В. Лонгинов, Б. А. Шуляк и др.), занимающиеся морскими наносами. Однако проведение более детальной аналогии и выявление специфики возникновения и поведения речных и морских гряд является особой задачей, которая не входит в число задач, решаемых в данной монографии.

2. РУСЛОВЫЕ ПРОЦЕССЫ

2.1. Изученность руслового процесса. Сущность основных противоречий. Основные задачи дальнейших исследований

2.1.1. Актуальность проблемы

Использование рек для народного хозяйства требует знания русловых процессов. Какое бы строительство ни велось на реке или в ее непосредственной близости, оно должно учитывать те процессы, которые связаны с жизнью реки, с изменением формы русла, его перемещением или переформированием — в противном случае возможны, а подчас и неизбежны печальные последствия: река в процессе своего развития может уйти от водозабора или подойти к сооружению, если она меандрирует; оставить один рукав и сконцентрироваться в других, если русло много рукавное, завалить огромной толщей наносов сооружения, размещаемые в реке, если в реке перемещаются побочни и крупные гряды. Могут наблюдаться и другие неожиданности, связанные с русловыми процессами — река в сравнительно короткое время может разработать один или несколько пойменных рукавов, а старое русло прекратит свое существование. Все это требует знания русловых процессов, учета закономерностей их развития. Поэтому вполне понятно то внимание, которое уделяется изучению русловых процессов во всем мире.

Несмотря на то что история исследования этого вопроса не так коротка, в области изучения русловых процессов еще много белых пятен. На первых порах после общих наблюдений и умозаключений развивалось гидродинамическое направление исследований руслового процесса. При этом для решения русловых задач использовались общие законы гидромеханики. В результате получили распространение методы инженерной гидравлики, когда сложное изменчивое русло заменялось упрощенными схемами, а оценка деформаций русла проводилась методами гидравлики жестких каналов.

Известно, что основное различие между течением потока в жестких границах и в размываемом ложе заключается в русловых процессах, свойственных каждому аллювиальному потоку. Взаимодействие потока и русла выражается в том, что при некоторых режимах течения поток формирует себе русло, а при других условиях унаследованное от прежнего режима русло служит границами потоку и оказывает на него управляющее влияние.

В настоящее время, когда использование рек стало нормой хозяйственной жизни, когда на повестку дня поставлено преобразование природы с помощью перебросок стока, знание русловых процессов стало совершенно необходимым.

2.1.2. Основные постулаты гидроморфологической теории руслового процесса

Гидроморфологическая теория руслового процесса начала развиваться в 50-х годах XX в. Именно тогда были сформулированы основные постулаты и выработаны основные исходные позиции этой науки, подытожившие основные достижения предшествующих исследователей руслового процесса: Лохтина, Великанова, Гончарова, Россинского и многих других.

Эта отрасль науки получила название гидроморфологической теории руслового процесса и сформировалась в Государственном гидрологическом институте под руководством Кондратьева. Не излагая всей теории подробно, поскольку она достаточно хорошо известна и широко представлена в отечественной и зарубежной литературе, перечислим только те главнейшие позиции, на которых она основана.

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

2. Все деформации русла и поймы делятся на обратимые и необратимые. Под первыми понимается переоткладывание наносов в процессе их движения, а под вторым — приспособление реки к коренным изменениям, вносимым вековым процессом развития реки хозяйственной деятельностью человека.

3. По форме движения отдельной частицы наносы разделяются на донные и взвешенные.

4. Обратимые деформации являются признаком динамически устойчивого равновесия естественных рек.

5. За определяющие независимые факторы руслового процесса принимаются жидкий и твердый сток реки, а также геологические и геоморфологические условия, ограничивающие свободное развитие руслового процесса.

6. Констатируется дискретная структура руслового процесса и морфологии русла.

7. В связи с дискретностью руслового процесса выделяются несколько структурных уровней, на которых может рассматриваться транспорт наносов и русловой процесс: частицы, микроформы, мезоформы, макроформы и морфологически однородные участки. Выделение структурных уровней определяет методы и цели исследования в границах каждого уровня. Каждому уровню присущи и свои законы развития. Типизация макроформ является, по мнению Кондратьева, типизацией руслового про-

цесса, поскольку под макроформами понимается полный комплекс русловых и пойменных морфологических элементов данной реки, который и определяет тип руслового процесса. Типизация руслового процесса объединена Кондратьевым и Поповым единым принципом однонаправленного изменения транспортирующей способности реки, которое является результатом появления в каждом новом типе качественно новых форм транспорта наносов.

Основные положения теории руслового процесса разделяются ведущими исследователями этой проблемы в СССР и за рубежом. Однако не все положения одновременно принимаются одними и теми же исследователями.

Так, на лекции, прочитанной на XIV конгрессе МАГИ, Х. Эйнштейн продемонстрировал многообразие проявления русловых форм и поставил вопрос о правомерности замены этих форм принятыми гидравлическими схемами. Доклад Эйнштейна является подтверждением необходимости учета морфологического строения русла, т. е. подтверждает правильность «крена» теории руслового процесса в сторону морфологии. На XII конгрессе МАГИ Кеннеди в генеральном докладе подчеркнул, что в русле имеются три рода форм: микро, мезо и макро. К такому же заключению пришли и Ашида—Танака [62] и К. Нейлл [88]. Это означает, что названные авторы по существу принимают постулат о структурных уровнях руслового процесса.

Ряд других исследователей руслового процесса за рубежом, например П. Бондурант [93], считают, что большинство рек находится в «режиме», т. е. в состоянии динамического равновесия. Это означает принятие постулата обратимости деформаций. П. Бондурант в числе определяющих факторов русловых процессов называет расходы воды и наносов, геометрию русла и характеристику наносов, а также гидравлические сопротивления. Тем самым к определяющим факторам руслового процесса, названным Кондратьевым, добавляются только гидравлические сопротивления.

Как мы видели, точка зрения Кеннеди [94] по вопросу о зависимых и независимых переменных означает разделение им постулата гидроморфологической теории об определяющих факторах руслового процесса, хотя и расширяет эти представления.

2.1.3. Основные противоречия и недостатки изученности руслового процесса

Слабым местом современной теории руслового процесса, по мнению Кондратьева, является недостаточная изученность самого процесса и отсутствие основных формулировок, отображающих его сущность. Отсюда, по его мнению, вытекают противо-

речия в разработке деталей, дискуссии по форме, при потере интереса к строгости исходных позиций, отсюда же преувеличенный интерес к математическому аппарату, которым подменяется теория.

В настоящее время в области исследования русловых процессов накоплен обширный материал. Обнаружены некоторые факты, которые пока не нашли должного объяснения. Отдельные вопросы руслового процесса изучены с разной степенью подробности, но, как правило, не увязаны между собой.

Разрабатываемая в ГГИ под руководством Кондратьева гидроморфологическая теория руслового процесса является теорией, в которой разработаны основные положения и постулаты, но в которой сегодня, к сожалению, не делается еще попыток увязать в стройную систему накопленные, подчас противоречивые факты, относящиеся как к происхождению типов процесса, так и к превращению их из одного в другой. Такие попытки предпринимаются иногда отдельными авторами, однако эти попытки, к сожалению, не основаны на системе постулатов, которые были бы столь четко выражены, чтобы представлять собой основы теории.

Основы гидроморфологической теории руслового процесса были впервые разработаны и опубликованы в 1959 г. [47]. Достигнутые успехи этой теории позволили решать многие инженерные задачи с помощью сопоставления съемок русла за разные годы и прогнозирования последующих деформаций на основе установления типа процесса и темпов этих деформаций. По данным сопоставления морфологических съемок разных лет хорошо устанавливается развитие руслового процесса на участке реки за старые годы. Прогноз дальнейшего хода руслового процесса предполагает сохранение средних гидрологических и гидравлических условий и на последующий расчетный период времени. При хозяйственном использовании рек это условие далеко не всегда может сохраняться. Кроме того, хорошо известно, что средние темпы не характеризуют реальных скоростей развития, конкретных морфологических образований, зависящих от конкретных гидравлических и гидрологических условий. Так, описанные И. В. Поповым [9] деформации р. Оби у д. Ересной в среднем характеризовались умеренными темпами развития (27 м/год). Наибольшие размывы берега превысили средние почти в 10 раз и не были связаны с наиболее полноводными годами. При прогнозировании темпов развития руслового процесса необходимо уметь предусматривать подобные случаи. Кроме того, при хозяйственном вмешательстве человека в жизнь реки может произойти смена типов руслового процесса. Поэтому важно располагать зависимостями, вскрывающими взаимосвязь гидравлических условий и типов руслового процесса, а также их темпов развития. В последние годы в этом направлении выпол-

нял разработки Антроповский [9, 10], который дальше развил работы Леопольда и Вольмана [84] и Ромашина [9]. Работы этих авторов показали, что один и тот же тип руслового процесса в зависимости от абсолютных размеров (ширины B и глубины H) русла может наблюдаться в широком диапазоне изменения уклонов долины и чисел Фруда. Однако и это совершенствование теории еще не дает ответа на ряд вопросов, связанных с представлениями о развитии руслового процесса, таких как влияние основных факторов на развитие руслового процесса того или иного типа, взаимосвязь побочного процесса и ограниченного меандрирования, переход немеандрирующих типов руслового процесса в меандрирующие, взаимосвязь микро-, мезо- и макроформ, различие или сходство русловой и пойменной многорукавности, происхождение рукавов и осередков, единство и различие в законах транспорта донных наносов на разных структурных уровнях, подобие лабораторных и натуральных русловых форм, одновременное существование разных типов руслового процесса на одном участке реки и др.

Расширяющееся использование и освоение рек способствует большему накоплению сведений о разных формах проявления руслового процесса как в естественных, так и в зарегулированных условиях. Широкое распространение исследований на гидравлических моделях как у нас, так и за рубежом позволило получить более детальные сведения о кинематике потока и деформациях русла в различных конкретных ситуациях. Увеличивается также объем экспериментальных исследований в области транспорта донных наносов, деформаций русла и условий его самоморфирования. Все это привело к тому, что в настоящее время накоплены многочисленные материалы, относящиеся к русловому процессу в натуральных и лабораторных условиях. Однако среди этой обширной и подчас разноречивой информации нет единства в толковании происходящих явлений и их взаимосвязи.

В связи со сказанным в области изучения руслового процесса создалось положение, когда одни исследователи, занятые созданием и укреплением теоретической основы теории, т. е. ее логического фундамента, оставляют вне своего внимания те факты и те выводы, которые получены вне данной школы и которые иногда противоречат ее выводам; другие исследователи детально изучают тот или иной вопрос или аспект теории, однако не находят ему места в общей цепи явлений и не используют разработанную логическую основу теории руслового процесса. Известно, однако, что именно те факты и те явления, которые противоречат принятым концепциям или теориям, сулят раскрытие новых закономерностей и связей, которые и продвигают наши знания. Поэтому в обобщении существующих знаний, увязке фактов автор видит современную задачу исследования.

2.2. Основные направления изучения русловых процессов

В настоящее время исследование русловых процессов идет различными путями. Изучаются отдельные проявления руслового процесса в разных конкретных ситуациях с целью прогноза русловых деформаций для гидротехнического проектирования.

Лабораторные исследования руслового процесса, предпринимаемые как в СССР, так и за рубежом имеют различные цели. Продолжается интенсивное исследование процессов меандрирования. При этом изучают как причины меандрирования русел, так и связь этого процесса с транспортом наносов и гидравлическими сопротивлениями.

Эти исследования как бы продолжают хорошо известные экспериментальные исследования Фридкина, Шарашкиной, Андреева и Ярославцева, Леопольда и Вольмана. По мнению автора, эти исследования незаслуженно мало используются в разработке теории руслового процесса. В настоящее время подобные исследования, к сожалению, не проводятся на базе того института, который занимается развитием теории руслового процесса. Думается, что объединение выводов, полученных на базе этих экспериментов, и осмысливание фактов позволило бы продвинуть теорию.

За рубежом большое развитие получила также режимная теория руслового процесса, разработанная еще Ласеем и развивающаяся в наши дни. Соотношения, полученные в этой теории, близки к морфометрическим зависимостям советских авторов. Этим зависимостям также не найдено место в общей теории руслового процесса. Большое распространение за рубежом получили также исследования гидравлики пойменных русел. Разные аспекты этих исследований развиты и в Советском Союзе.

Проводятся также исследования скоростного поля потока и деформаций русла в отдельных излучинах в лабораторных и полевых условиях.

Выводы, полученные разными авторами в этих исследованиях, также не нашли должного отображения в общей теории руслового процесса.

Попутные же исследования руслового процесса на конкретных моделях рек, в том числе на размываемых моделях, ведутся во многих странах мира. Следует упомянуть, что и эти исследования не в полной мере увязаны с теорией руслового процесса.

Русловые процессы и деформации русла изучаются также при исследовании гидрометрических связей $Q=f(H)$. В этом смысле увязка гидравлических сопротивлений с расходом-уровневой связью оказывается зависящей от типа руслового процесса и его сезонных проявлений. Обобщению этих вопросов посвящена статья Кеннеди. Однако это интересное обобщение не увязано

с основными положениями гидроморфологической теории руслового процесса.

Все сказанное еще раз убеждает нас в своевременности обобщения накопленных в разных школах фактов и сведений на базе теории руслового процесса.

2.3. Типизация руслового процесса

2.3.1. Существующие типизации руслового процесса

Одним из важных звеньев теории руслового процесса является его типизация. Поскольку в настоящее время система основных постулатов, относящихся к русловому процессу, изложена главным образом в рамках гидроморфологической теории, постольку наибольшее внимание мы уделим типизации руслового процесса, разработанной в этой теории Н. Е. Кондратьевым и И. В. Поповым, и примем терминологию, предложенную в этой типизации. Следует упомянуть, что разработанная этими исследователями типизация опиралась в известной степени на типизацию И. А. Кузьмина и К. И. Россинского [43]. Типизация ГГИ (Кондратьев — Попов) представляет собой более полное и последовательное отображение существующих типов руслового процесса. Эта типизация представлена на рис. 2.1.

На рис. 2.1 стрелкой показано увеличение транспортирующей способности от многорукавных русел к ленточнорядовым. В этом случае имеется в виду, что увеличение транспортирующей способности происходит за счет увеличения уклона свободной поверхности. Дальнейшее увеличение транспортирующей способности при переходе к осередковому типу процессов Кондратьев связывает с увеличением ширины русла. Такая попытка связать типизацию руслового процесса с одним из определяющих его факторов является дальнейшим развитием теории. Однако приведенный порядок изменения транспортирующей способности от одного типа процесса к другому не является вполне убедительным. Непонятно, почему при незавершенном меандрировании транспортирующая способность меньше, чем при свободном. Кроме того, эта типизация не показывает пути перехода одного типа в другой и не связана с основными факторами, определяющими русловую процесс, кроме транспортирующей способности потока.

За рубежом имеются другие типизации руслового процесса. За рубежом получила распространение типизация Леопольда и Вольмана, которые разделили все русла на три главных типа: прямолинейные, меандрирующие и разбросанные (многорукавные). По существу эта типизация совпадает с типизацией Кузьмина и Россинского. П. Бондурант [93] дал уже более подробную

типизацию руслового процесса (рис. 2.2), весьма близко совпадающую с типизацией ГГИ.

Эта типизация, как и типизация ГГИ, используется для решения различных инженерных задач. При этом, как и в СССР,

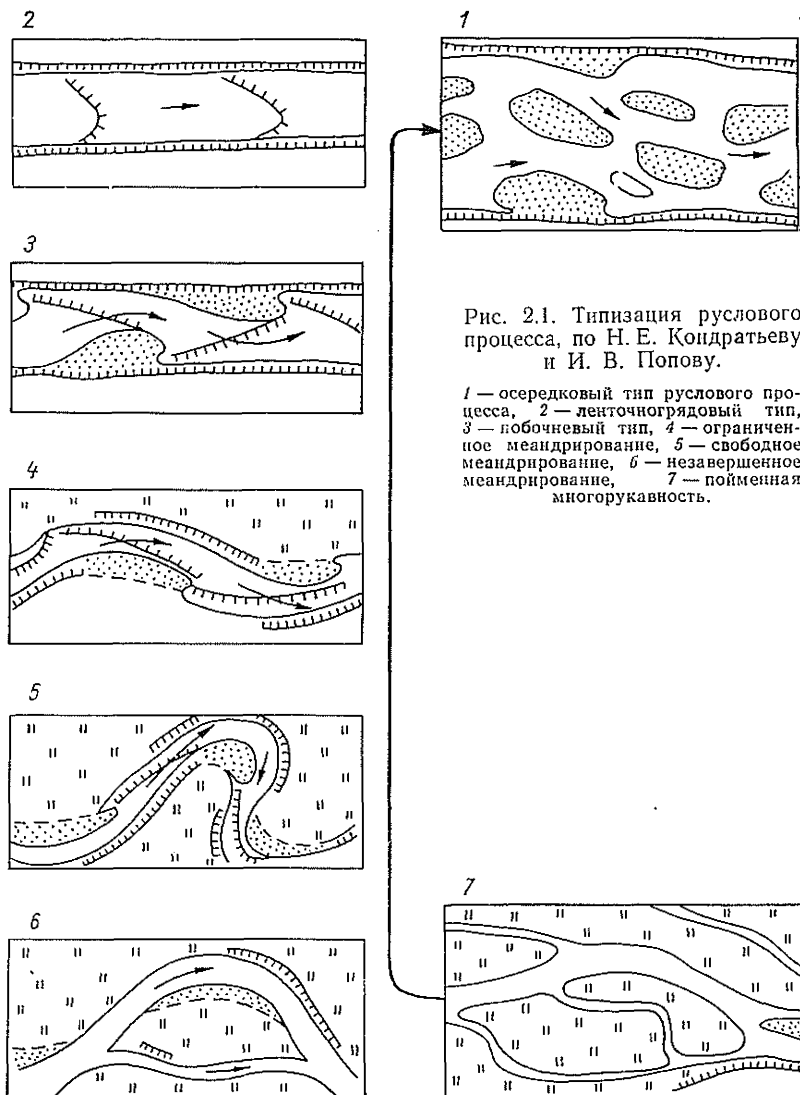


Рис. 2.1. Типизация руслового процесса, по Н. Е. Кондратьеву и И. В. Попову.

1 — осередковый тип руслового процесса, 2 — ленточногрядовый тип, 3 — побочный тип, 4 — ограниченное меандрирование, 5 — свободное меандрирование, 6 — незавершенное меандрирование, 7 — пойменная многорукавность.

широко пользуются сопоставлением съемок русла за разные годы.

Типизация руслового процесса, представленная Бондурантом, включает следующие типы русла, которые, как видно на

рис. 2.2, совпадают с типами, выделенными Кондратьевым и Поповым: прямолинейные русла, к которым Бондурант относит побочневый процесс, разбросанные русла, представляющие собой осередковый процесс, меандрирующие русла, в которых Бондурант выделяет сползание излучин по типу ограниченного меандрирования, развитие излучин до прорыва перешейка петли — свободное меандрирование и случаи меандрирования с промывом спрямляющего протока — незавершенное меандрирование. П. Бондурант выделяет также многорукавные русла,

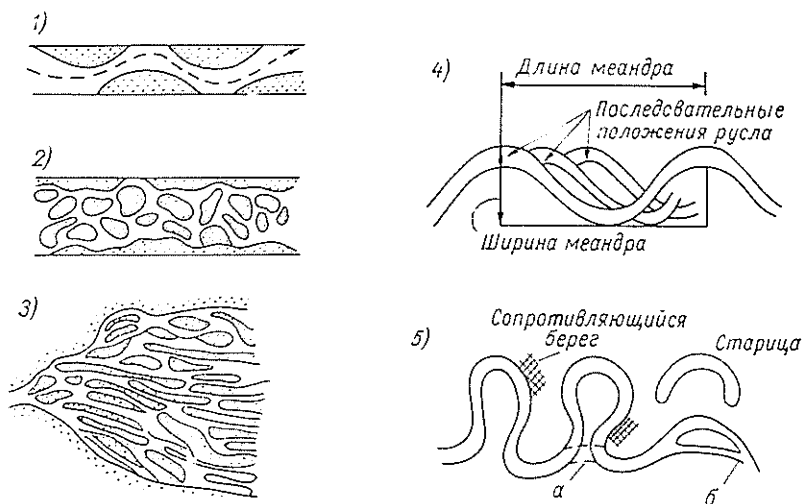


Рис. 2.2. Типизация руслового процесса, по Бондуранту.

1 — перемещающиеся бары (побочни), 2 — разбросанное русло (осередки), 3 — многорукавное русло, 4 — меандрирующее русло (ограниченное меандрирование), 5 — другие стадии меандрирования: а — прорыв петли (свободное меандрирование), б — промыв перешейка (незавершенное меандрирование).

к которым относятся дельтовые образования и конусы выноса — внутренние дельты. Как видим, в типизации Бондуранта по сравнению с типизацией ГГИ отсутствует только ленточногрядовый тип процесса.

П. Бондурант приводит краткое описание разных типов руслового процесса, характеризуя их по гидравлическому режиму. Так, он отмечает, что прямолинейные русла характеризуются либо малым уклоном, либо большим уклоном, и тогда они приближаются к осередковому типу процесса. Он высказывает мнение, что прямолинейное движение потока и соответственно побочневый тип процесса наблюдается тогда, когда в результате большой концентрации наносов требуется полное использование транспортирующей способности потока путем использования наибольшего уклона. Относительно осередкового типа процесса он высказывает мнение, что эти реки редко находятся

«в режиме», т. е. в состоянии динамического равновесия, и для транспорта большого количества наносов этим рекам требуется большой уклон, который составляет, по Лейну,

$$I = 0,1 \sqrt[4]{Q}, \quad (2.1)$$

а по Леопольду и Вольману,

$$I = \frac{0,06}{Q^{0,44}}. \quad (2.2)$$

Он полагает, что «разбросанность» русла определяется тем, что донные наносы, перемещаемые в высокие половодья в виде баров (осередков), остаются реликтовыми образованиями, которые поток с меньшими расходами и меженный поток не в силах переносить. В результате образуется случайное расположение баров, которые поток обтекает при менее интенсивных режимах. Зарастание этих баров усиливает процесс.

В качестве зависимостей, определяющих связь уклона и расхода воды меандрирующих рек, Бондурант предлагает формулы Лейна

$$I = \frac{0,0017}{\sqrt[4]{Q}}, \quad (2.3)$$

$$I = \frac{0,1}{\sqrt[4]{Q}}. \quad (2.4)$$

К. Читале [68], рассматривая русловые процессы в разных реках, считает, что все реки следует отнести к двум главным группам: реки с единым руслом, т. е. однорукавные, и реки с многими руслами, т. е. многорукавные. Первую группу рек Читале предлагает разделить на меандрирующие русла и прямые русла. Далее Читале считает, что меандрирующие русла можно разделить в зависимости от классификационного признака на регулярные, нерегулярные, простые и сложные, пологие и крутые и синусоидальные, параболические, круговые и производные от синусоидальных. К. Читале считает, что хотя прямолинейные русла встречаются обычно на коротких участках, но могут сохранять свое направление и на длинных, при больших уклонах дна, широких и мелких поперечных сечениях и равномерном составе донного материала.

Многорукавные русла Читале делит на осередковый тип и пойменную многорукавность, образованную в процессе строительства дельты.

Таким образом, рассмотренная типизация руслового процесса, по Бондуранту, официально принятая в США ТАСК-Комитетом, как мы видим, практически не расходится с типизацией руслового процесса, по Саймонсу и Кондратьеву и Попову, хотя и не уязвляет выделенные типы процесса с транспортирующей способ-

ностью русловых потоков. Как мы видим, существующие типизации, так или иначе связанные между собой, все же не отвечают на ряд важнейших вопросов теории руслового процесса: как связаны типы руслового процесса с основными определяющими факторами и каким путем наблюдается переход одного типа процесса в другой.

Однако имеются попытки ответить на эти вопросы при исследовании отдельных типов руслового процесса.

2.4. О причинах меандрирования рек

Существует много работ, посвященных этой проблеме. Часть из них описана Н. Н. Федоровым. При упоминании этих работ заранее отсылаем читателя к библиографии, приведенной Федоровым [47].

Причины меандрирования, которые признавались бы всеми единодушно, пока не установлены. К. Инглис, например, считает, что «меандрирование — это природный способ гашения излишней энергии в широких пределах гидравлических условий». Е. Лейн полагает, что при одинаковых расходах воды и крупности наносов аллювиальные потоки стремятся быть прямыми при больших уклонах дна. Некоторые исследователи считают, что любые препятствия на дне потока, ведущие к отклонению струй к одному берегу, будут служить причиной меандрирования.

В числе возможных причин меандрирования назывались такие, как изменения в уровне воды, превышение энергии потока, даже появление поперечных сейш.

В. Вернер¹ делает заключение, что меандрирование может наблюдаться только при малых глубинах. Превышение же некоторого предельного значения глубины служит препятствием для развития меандрирования. Он также считает, что для возникновения меандрирования необходима определенная величина транспорта донных наносов и что содержание взвешенных наносов сверх некоторой величины может предотвратить меандрирование.

В то же время существует противоположное Вернеру мнение Шамма¹: при относительно больших числах B/H могут быть только разбросанные русла.

Л. Леопольд и М. Вольман¹ считают, что при малых отношениях B/H скорость почти постоянна по глубине, поперечная циркуляция исчезает, и поток в криволинейных руслах приближается к потенциальному. В результате наблюдается изменение донных скоростей пропорционально радиусу линий токов. Следствием этого является смещение максимума скорости к выпуклому берегу, поперечные перемещения потока в русле не

¹ Библиография упоминаемых авторов приведена в статьях Аккерса [57—60].

наблюдаются, и в результате процесс образования мелей, которые ведут к возникновению меандрирования, затухает.

Г. Мэтзес, наоборот, считает, что малое значение отношения V/H не способствует образованию поперечной циркуляции, и поэтому меандрирующие русла (широкие и мелкие) образуются без ее участия. Он подтверждает свое мнение отсутствием циркуляционного потока на р. Миссисипи и других реках, которые он исследовал.

Ц. Инглис установил, что имеется два класса меандрирования; при одном из них наносы, поступающие от размыва берега, переносятся на выпуклый берег, а при другом эти наносы отлагаются ниже того же вогнутого берега.

И. Фридкин, исследуя пути движения наносов в излучинах, пришел к выводу, что при быстром размыве берегов эти наносы откладываются вдоль размываемого берега, а при отсутствии размыва берега наносы движутся от одного берега к другому.

В. Вернер пришел к выводу, что излишнее количество транспортируемых наносов служит помехой меандрированию русла. В то же время Шамм установил, что уменьшение расхода наносов является причиной того, что русло становится уже и глубже, и тем самым меандрирование усиливается.

П. Аккерс полагает, что меандрирование связано с расходом донных наносов. Если расход мал, то прямолинейные русла останутся таковыми и не начнут меандрировать, так как для этого процесса необходим существенный расход наносов.

Г. Эйнштейн, Х. Шен и С. Комура [82] пришли к мысли, что меандрирование возникает с развитием различия в касательных напряжениях на двух сторонах поперечного сечения.

Другими исследователями причина меандрирования связывается со вторичными течениями.

П. Аккерс и Ф. Чарльстон, Х. Шен, С. Комура, Ашида и Танака, Саймонс и Ричардсон считают, что причиной меандрирования является образование перекошенных баров (побочней) в русле. Так, Саймонс и Ричардсон полагают, что, по-видимому, можно связать извилистость оси меженного потока, обтекающего побочни с началом меандрирования. На рис. 2.3 они показывают последовательные стадии развития меандрирования. Вначале меандрирует тальвег, но это быстро приводит к размыву берегов. Существенной особенностью этого процесса, по мнению Саймонса и Ричардсона, является неизменность шага меандр при данном расходе даже тогда, когда длина петли заметно увеличивается при ее развитии.

И. Фридкин установил также, что при отсутствии подачи расхода наносов в начальное сечение русла оно стремится к меандрированию с ростом и развитием меандр. При обеспечении подачи некоторого расхода наносов русло стремится сохранить свою первоначальную слабую извилистость.

И. Фридкин и Мэтзис считают, что механизм меандрирования заключается в размыве одного берега и отложении этого материала на противоположную отмель.

П. Аккерс поставил такой опыт. В прямолинейный поток, транспортирующий малое количество наносов, вводилось искусственное препятствие, которое отклоняло поток поочередно, то к одной, то к другой стенке. В результате была получена серия

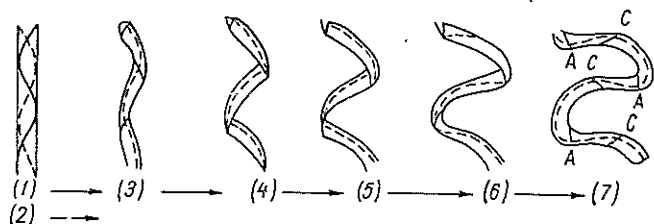


Рис. 2.3. Развитие меандрирования, по Д. Саймонсу.

1 — побочны в прямом русле, 2 — тальвег, 3, 4, 5 — развитие меандра при обтекании побочней, 6, 7 — развитая излучина (меандр), А — начало плёса, С — перекат.

затухающих по амплитуде излучин, свидетельствующая о стремлении потока вернуться к прямолинейному направлению. В связи с этим Аккерс считает необходимым различать меандрирование как устойчивый процесс, возникающий одновременно на большом протяжении, и разработку берега как местные затухающие по длине деформации от случайных причин. Как видно из сказанного, среди исследователей нет единодушного мнения о причинах возникновения меандрирования, хотя большинство связывает появление меандрирования с перемещением побочней.

2.4.1. Теоретические исследования возникновения меандрирования и разветвленных русел на основе теории устойчивости

Понятие о динамической устойчивости в области руслового процесса использовалось рядом ученых. Ц. Уайт пришел к выводу о том, что меандрирование вызывает неустойчивость дна русла. Д. Кеннеди [81] и А. Рейнольдс использовали понятие о динамической устойчивости для анализа условий возникновения рифелей на первоначально синусоидальном дне. Р. Калландер [65] использует представление о динамической устойчивости для решения задачи о возникновении устойчивости меандрирования или разветвленного русла в первоначально прямолинейном канале (русле).

В качестве исходной причины, вызывающей неустойчивость русла, им принимается случайное начальное периодическое возмущение линий токов с длиной, большей, чем ширина русла.

Эта постановка задачи, по мнению Калландера, отличает его исследование от предшествующих. Возникновение неустойчивости Калландер дополняет зависимостями сопротивления потоку от скорости течения, заимствованными от Ванони, Брукса, Кеннеди и Раудкиви. Это позволяет Калландеру сделать заключение о пропорциональности касательного напряжения на дне τ_0 величине средней скорости потока v . Калландер приходит к заключению, что если касательное напряжение на дне русла уменьшается при увеличении скорости, то русло неустойчиво, и наоборот. Он принимает, что давление распределяется по гидростатическому закону, градиент касательных напряжений по направлению течения постоянен по глубине потока и равен нулю поперек течения, а касательное напряжение у дна параллельно результирующей скорости потока. Пренебрегая также встречными течениями и полагая, что наносы по дну движутся по направлению течений, Калландер записывает исходную систему уравнений движения и неразрывности для воды и наносов:

$$\rho \frac{\partial u}{\partial t} + \rho u \frac{\partial u}{\partial x} + \rho v \frac{\partial u}{\partial y} = -\gamma \frac{\partial h}{\partial x} - \frac{\tau_0}{H}, \quad (2.5)$$

$$\rho \frac{\partial v}{\partial t} + \rho u \frac{\partial v}{\partial x} + \rho v \frac{\partial v}{\partial y} = -\gamma \frac{\partial h}{\partial y} - \frac{v}{V} \frac{\tau_0}{H}, \quad (2.6)$$

$$-\frac{\partial}{\partial x}(uH) + \frac{\partial}{\partial y}(vH) + \frac{\partial H}{\partial t} = 0, \quad (2.7)$$

$$-\frac{\partial}{\partial t}(h - H) + \frac{c_n}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y}\left(-\frac{v}{V}c_n\right) = 0, \quad (2.8)$$

где V — результирующая скорость, являющаяся векторной суммой u и v ; c_n — скорость перемещения наносов в единице пространства, на единицу времени и на единицу ширины русла; h — превышение свободной поверхности над горизонтальной сравнительной плоскостью; остальные обозначения общепринятые.

Обозначая невозмущенные условия индексом нуль, принимая также, что $u = U$, $v = 0$, $h = h_0 - I_0$ и записывая систему (2.5) — (2.8) для возмущенного движения путем записи переменных как суммы невозмущенной величины и приращения, Калландер получает новую систему уравнений, удовлетворяющих возмущенному движению за вычетом членов, являющихся малыми величинами второго порядка.

Принимая далее, что приращение касательного напряжения и скорости движения частиц τ' и c'_n пропорционально приращению скорости U :

$$\tau' = m_1 U', \quad (2.9)$$

$$c'_n = m_2 V', \quad (2.10)$$

Калландер замечает, что эти выражения соответствуют совпадению фаз τ_0 , c_n , U , V и, используя выражения (2.9) и (2.10), получает выражения:

$$\left. \begin{aligned} \frac{1}{g} \frac{\partial U'}{\partial t} + \frac{V}{g} \frac{\partial h'}{\partial x} &= \frac{\partial h}{\partial x} - I_0 \left(\frac{m_1 U'_0}{\tau_0} - \frac{H'}{H_0} \right), \\ \frac{1}{g} \frac{\partial V'}{\partial t} + \frac{U}{g} \frac{\partial V'}{\partial x} &= - \frac{\partial h'}{\partial y} I_0 - \frac{V'}{U}, \\ H_0 \frac{\partial h'}{\partial x} + U \frac{\partial H'}{\partial x} + H_0 \frac{\partial V'}{\partial y} + \frac{\partial H'}{\partial t} &= 0, \\ \frac{\partial h'}{\partial t} - \frac{\partial H'}{\partial t} + m_2 \frac{\partial U'}{\partial x} + \frac{c_{H_0}}{U} \frac{\partial V'}{\partial y} &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (2.11)$$

Подставляя в эту систему некоторое постулируемое решение для U' , V' , H' и h' и принимая эти приращения пропорциональными в первых двух случаях скорости и самим величинам в степени $ikI_0 \left(\frac{x - cUt}{H_0} \right)$, а в двух последних глубине H в той же степени, а также вводя соответственно для каждого приращения коэффициенты пропорциональности A , B , D и E , представляющие безразмерные комплексные функции величины y и, кроме того, используя безразмерное волновое число k и безразмерную комплексную скорость распространения волны $c = c_1 + ic_i$, Калландер получает

$$\left\{ m_1 \frac{U}{\tau_0} + ik \text{Fr}_0^2 (1 - c) \right\} A - D - ikE = 0, \quad (2.12)$$

$$\left\{ 1 + ik \text{Fr}_0^2 (1 - c) \right\} B = - \left(\frac{H_0}{I_0} \right) E', \quad (2.13)$$

$$A - (1 - c) D = i \frac{1}{k} \frac{H_0}{I_0} B', \quad (2.14)$$

$$\frac{m_2}{H_0} A + cD - cH = \frac{ic_{H_0}}{UH_0} \frac{1}{k} \frac{H_0}{I_0} B', \quad (2.15)$$

откуда путем исключения A , D и E и решения полученного дифференциального уравнения после принятия некоторых допущений Калландер получает линейные уравнения:

$$a_{11}c_1 + a_{12}c_i = l_1, \quad (2.16)$$

и

$$a_{21}c_1 + a_{22}c_i = l_2, \quad (2.17)$$

где

$$a_{11} = k \text{Fr}_0^2 \left(1 + \frac{m_1 U}{\tau_0} \right) + k (1 + \text{Fr}_0^2) + \frac{V^2}{k} \frac{m_1 U}{\tau_0}, \quad (2.18)$$

$$a_{12} = -k Fr_0^2 (1 - Fr_0^2) - \left(1 + \frac{m_1 U}{\tau_0}\right) - V_2 Fr_0^2, \quad (2.19)$$

$$a_{21} = -a_{12}, \quad a_{22} = a_{11}, \quad (2.20)$$

$$l_1 = k \frac{m_2}{H_0} + \frac{V^2}{k} \frac{c_{H_0}}{UH_0} \left(1 + \frac{m_1 U}{\tau_0}\right) - \frac{V^2}{k} \cdot \frac{m_2}{H_0}, \quad (2.21)$$

$$l_2 = k^2 Fr_0^2 \frac{m_2}{H_0} + V^2 \frac{c_{H_0}}{UH_0} Fr_0^2, \quad (2.22)$$

откуда

$$c_1 = \frac{a_{11} l_1 + a_{12} l_2}{a_{11}^2 + a_{12}^2}, \quad (2.23)$$

$$c_i = \frac{a_{11} l_2 + a_{12} l_1}{a_{11}^2 + a_{12}^2}. \quad (2.24)$$

Полученные линейные уравнения включают в себя как свойства потока, так и свойства возмущения: так, $\frac{c_{H_0}}{UH_0}$ — концентрация донных наносов в невозмущенном потоке; $\frac{n\pi}{I_0} \frac{H_0}{2l}$ — число путей, на которые разделяется русло в продольном направлении из-за возмущения; Uc_1 — скорость распространения возмущения.

Если известны свойства конкретного потока, то можно вычислить c_1 и c_i . Знак c_i позволяет определить, будет ли устойчиво или неустойчиво исследуемое состояние потока. Руслу, которые меандрируют, имеют значение $n=1$. Бóльшее значение n приводит к разветвлению при условии $c_i > 0$; при $c_i < 0$ русло устойчиво.

Анализируя реальные ситуации с помощью некоторого эмпирического соотношения $c_{H_0} \propto V^N$, Калландер приходит к выводу, что все возможные русла неустойчивы. Предложенное Калландером решение было проверено с помощью сопоставления расчетов устойчивости с данными экспериментов Леопольда и Вольмана и собственными экспериментами Калландера. В 16 случаях из 25 расчет показал неустойчивость русла, что совпало с типом процесса, по Леопольду и Вольману. Расхождения в 7 случаях Калландер квалифицирует как неубедительные.

В исследовании Н. Сукегава [97] была поставлена аналогичная задача, что и в исследовании Калландера. Однако, если Калландер за признак неустойчивости принял изменение в зависимости $\tau_0 = f(V)$, то Сукегава пытается использовать признаки непосредственно, по его мнению, характеризующие меандрирование русел.

На рис. 2.4 показана рабочая схема развития меандр из прямолинейного русла. Полагая, что извилистость потока наблюдается уже тогда, когда возникают побочни, Сукегава считает, что если удастся установить условия, при которых в потоке (в русле) возникают побочни, то эти условия будут характеризовать начало меандрирования. Для того чтобы оценить, есть или нет в потоке побочни, необходимо воспользоваться некоторым определенным отношением, которое является критериальным, если оно не достигнуто, то меандрирования не будет, если оно превышено, то будет наблюдаться меандрирование. Это критическое отношение рассматривается как нейтральная устойчивость русла к меандрированию. Величину этой нейтральной устойчивости Сукегава получает путем анализа линейной устой-

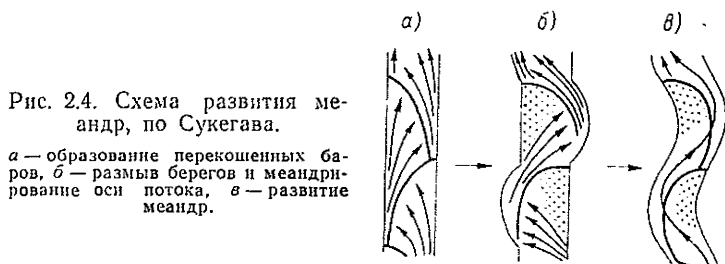


Рис. 2.4. Схема развития меандра, по Сукегаве.

а — образование перекошенных баров, б — размыв берегов и меандрирование оси потока, в — развитие меандра.

чивости на основе рассмотрения системы уравнений: неустановившегося движения воды, уравнений неразрывности потока и наносов, в последнее из которых включается формула расхода донных наносов при условии пропорциональности q_m четвертой степени скорости.

Н. Сукегава записывает уравнения движения в виде

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + g \frac{\partial H}{\partial x} + g \frac{\partial z}{\partial x} + f_x \frac{u^2}{H} = 0, \quad (2.25)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + g \frac{\partial H}{\partial y} + g \frac{\partial z}{\partial y} + f_y \frac{v^2}{H} = 0, \quad (2.26)$$

уравнение неразрывности в виде

$$\frac{\partial H}{\partial t} + u \frac{\partial H}{\partial x} + v \frac{\partial H}{\partial y} + H \frac{\partial u}{\partial x} + H \frac{\partial v}{\partial y} = 0. \quad (2.27)$$

и уравнение баланса наносов

$$\frac{\partial z}{\partial t} + \frac{\partial q_{bx}}{\partial x} + \frac{\partial q_{by}}{\partial y} = 0, \quad (2.28)$$

где x, y — координаты, продольная и поперечная; z — превышение дна над плоскостью xy ; f_x и f_y — коэффициенты гидравлического трения, взятые на соответствующие направления; q_{bx}

и q_{by} — компоненты расхода донных наносов на единицу ширины и длины; H — глубина потока.

Решая систему этих уравнений для данного момента и некоторого следующего момента времени, за которые происходят небольшие деформации русла Δz , ΔH и ΔB , Сукегава получает некоторое выражение, позволяющее учесть деформации дна и русла при изменении основных характеристик в потоке с подвижным дном:

$$\begin{aligned} & (C_b + 1) [Fr^2 C_b^2 + 4Fr^2 C_b^4 - \{1 - 6Fr^2 + TQ_b + \\ & + (1 + Q_b + 4Fr^2 W^2) \left(\frac{\beta}{\alpha}\right)^2\} C_b^3 - \{2 - 4Fr^2 + \\ & + \frac{19}{6} TQ_b + (2 + \frac{1}{6} TQ_b + 3Q_b + 6Fr^2 W^2) \left(\frac{\beta}{\alpha}\right)^2\} C_b^2 - \\ & - \{1 - Fr^2 + \frac{10}{3} TQ_b + (1 + \frac{1}{3} TQ_b + 2Fr^2 W^2) \left(\frac{\beta}{\alpha}\right)^2 - \\ & - 4(1 + Q_b) W^2 \left(\frac{\beta}{\alpha}\right)^4\} C_b - \{ \frac{7}{6} TQ_b + (\frac{1}{6} T + 1) Q_b \left(\frac{\beta}{\alpha}\right)^2 - \\ & - 2 \left(\frac{4}{3} T + 1\right) Q_b W^2 \left(\frac{\beta}{\alpha}\right)^4 \}] = 0, \end{aligned} \quad (2.29)$$

$$\text{где } C_b = \frac{1}{u} \frac{\gamma}{\alpha}, \quad W = \frac{f_x}{\beta H}, \quad Q_b = \frac{q_{bx}}{Hv}, \quad T = 1 + \frac{2m}{1 - \frac{v_*^2}{v_{*c}^2}}.$$

Выражение (2.29) получено путем исключения членов, учитывающих изменение времени, исходя из допущения, что этими членами можно пренебречь из-за малости деформаций за рассматриваемый период времени. В (2.29) C_b — безразмерное ускорение нейтральных деформаций; W — безразмерное трение; Q_b — безразмерный расход наносов (концентрация); v_* — динамическая скорость; v_{*c} — то же, отнесенное к началу трогания наносов; m — коэффициент; $T=5$ в формуле Броуна для расхода наносов и $T=3$ в формуле Сабо, Киккава и Ашида.

Записывая условие нейтральной устойчивости в виде

$$\Phi = \Phi^* \exp [i(\alpha x + \beta y + \gamma i) + \gamma_1 t], \quad (2.30)$$

где $\alpha = \frac{\pi}{L}$, $\beta = \frac{\pi}{B}$ — волновые числа по направлению x и y ; L — половина длины волны (длины побочня); B — ширина русла; i — мнимое число; α , β , γ и γ_1 — действительные числа, Сукегава использует их для исследования условий возникновения меандрирования.

Если γ_1 отрицательно, высота деформации уменьшается со временем, если γ_1 положительно, деформации увеличиваются, а русло неустойчиво. Если $\gamma_1=0$, то русло нейтрально и не меняется во времени. Отношение γ/α означает ускорение деформаций. Эти деформации будут перемещаться вверх по течению, если $\gamma/\alpha < 0$, и вниз по течению, если $\gamma/\alpha > 0$. Далее Сукегава подставляет (2.30) в (2.29) и, решая полученное выражение относительно C_b и β/α , получает пять корней этого выражения, исследует их и находит два возможных решения в виде

$$C_b = -\frac{7}{6} T Q_b, \quad \frac{\beta}{\alpha} = \sqrt{\frac{7T}{6(T-1)}} Fr, \quad (2.31)$$

и

$$C_b = \frac{4T+3}{3(Fr^3-2)} Q_b, \quad \frac{\beta}{\alpha} = 1. \quad (2.32)$$

Для нахождения величины ускорения нейтральных деформаций необходимо знать величину Q_b , которую, как правило, для натуральных условий мы не знаем. Поэтому Сукегава использует рекомендации Броуна, где $Q_b < 0,01W$,

$$W = \frac{f_x B}{\pi H}, \quad (2.33)$$

т. е. W пропорционально известному критерию $\frac{B}{H} \lambda$, так как

$$f_* = \frac{v_*^2}{v_{*c}^2} \approx \frac{\lambda}{\lambda_0}.$$

Численное решение полученных уравнений позволило Сукегава получить графики изменения C_b и β/α в зависимости от числа Фруда.

Рассматривая малые деформации и делая некоторые допущения, Сукегава находит выражение

$$Fr^2 = 1 + \left(\frac{\beta}{\alpha}\right)^2 \quad (2.34)$$

и строит график, интерпретирующий выражения (2.31), (2.32) и (2.34), который является критериальным графиком появления побочной, переходной зоны и антидюн, расположенных в шахматном порядке.

Н. Сукегава установил, что длина баров уменьшается с увеличением расхода при прочих равных условиях и при достижении нижнего предела этого расхода дно превращается в плоские (двухмерные) дюны, двухмерные антидюны или гладкую фазу в зависимости от свойств наносов и гидравлических условий.

Можно сделать вывод, что критическая кривая появления побочней, показанная на рис. 2.5, дает такой нижний предел для длины перекошенных гряд (побочней). В результате исследования Сукегава пришел к следующим выводам:

1) пространственные трехмерные донные формы разделяются на два класса: побочни и шахматно расположенные антидюны;

2) когда безразмерный расход донных наносов меньше, чем 0,02, движение жидкости может рассматриваться как установившееся и условие возникновения побочней может определяться формулами (2.32) и (2.44) или рис. 2.5;

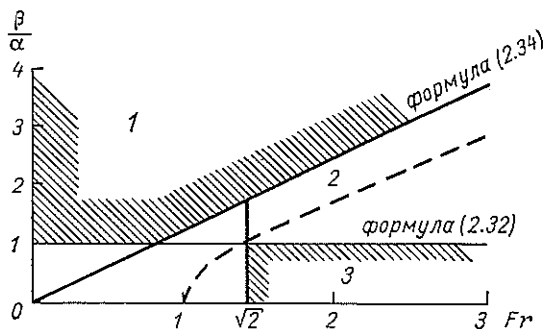


Рис. 2.5. Критериальный график условий возникновения побочней, по Сукегаве.

1 — область возникновения побочней, 2 — переходная область, 3 — область чередующихся (перекошенных) антидюн.

3) при больших значениях Q_b побочни не образуются до тех пор, пока W не становится достаточно большим. Поскольку W увеличивается с уменьшением отношения $\frac{H}{B}$, постольку бары (побочни) могут образовываться даже для больших значений Q_b , чем это характерно для лотков и установлено выводом 2.

Следует заметить, что соображения Сукегава будут верны, если верны предпосылки его исследований.

2.5. Экспериментальные исследования руслового процесса

Экспериментальные исследования руслового процесса начаты были еще в середине XX в. Эти исследования ставили своей задачей воспроизведение натуральных процессов в лаборатории с целью изучения причин образования того или иного процесса и сопутствующих им явлений. Однако интерес к этим исследованиям угас может быть вследствие того, что оказалось за-

труднительным связать результаты лабораторных исследований непосредственно с натурными данными и использовать их в прогностических целях.

В начале 60-х годов ученые разных стран вновь вернулись к подобным исследованиям. Однако эти исследования не увязаны между собой и результаты их подчас противоречивы. Попытаемся более или менее подробно остановиться на некоторых зарубежных исследованиях, мало известных в СССР, и увязать их результаты с выводами отечественных исследований.

2.5.1. Экспериментальное исследование образования побочней

Специальные исследования образования побочного типа процесса проводились как в Советском Союзе, так и за рубежом. Первыми исследованиями такого типа следует считать эксперименты Н. С. Шарашкиной [50] под руководством К. И. Россинского. В опытах Н. С. Шарашкиной создавалась пионерная траншея шириной 0,5 м, где в первые часы опыта (к 13-му часу) сформировались побочни, имеющие грядовую структуру. Побочни привели к дальнейшему искривлению стрежня потока и вследствие этого к размыву берегов в зонах подвалья побочней и к дальнейшему расширению потока. К концу экспериментов ширина по урезу составляла уже 1,5—1,7 м.

Это обстоятельство является чрезвычайно важным. Известно, что до сего дня нет однозначного определения побочного типа процесса. Н. С. Шарашкина вслед за К. И. Россинским назвала тип руслового процесса, который установился на лабораторной установке, как «периодическое» расширение и сужение русла». Н. Е. Кондратьев и И. В. Попов побочным процессом называют такой, при котором наблюдается отсутствие поймы, а движение побочней в русле происходит без размыва коренного берега. Другими словами, следует сказать, что конечный процесс, который установился на модели Шарашкиной, не есть побочный процесс, который выделен в типизации руслового процесса, по Кондратьеву. К этому типу процесса может быть отнесена лишь начальная стадия развития процесса, исследованного Н. С. Шарашкиной. Ею отмечалось, что на той стадии, когда побочни занимали пионерную траншею, фактически вся ширина этого русла была занята активной зоной транспорта наносов. Когда же начался размыв берегов и активная зона транспорта наносов сконцентрировалась по извилистому стрежню, то над побочнями установилась уже «полуактивная» зона транспорта наносов — зона замедленного движения побочней. Активная скорость движения побочней, определенная Знаменской по планам последовательных положений русла в опытах Шарашкиной за 9-й и 13-й

часы развития процесса, составила 1 м за 4 ч, или 0,25 м/ч¹, тогда как «полуактивная» скорость составила за период от 13 до 23 ч 0,03 м/ч, т. е. на порядок меньше. Последний период развития процесса характеризуется дальнейшим расширением русла и возникновением участка на побочке, не участвующего в продольном их перемещении. В этом же периоде времени наблюдалось отчленение побочки от русла.

По-видимому, здесь можно рассматривать три разных процесса: 1) побочный, до 13-го часа, характеризуемый активным смещением побочки; 2) процесс развития меандрирования (по типу ограниченного), когда побочки двигались полуактивно, и 3) процесс образования русловой многорукавности. Следует особо подчеркнуть, что при втором типе процесса начинался размыв берегов и расширение зоны меандрирования, а при третьем типе расширение прекращалось.

Примерно такая же картина наблюдалась в опытах И. Л. Розовского и В. А. Базилевича [45] и в экспериментах А. Ф. Кудряшова [30], проводившего опыты на сравнительно маленькой установке при постоянных расходах воды и наносов.

Все названные исследователи наблюдаемые ими формы русла относили к побочным.

Н. С. Шарашкина и И. Л. Розовский отмечали, что в ходе установления окончательной формы русла (а таковой считалось русло, которое не меняло однонаправленно своей ширины и уклонов дна) наблюдалось периодическое отторжение побочки, превращение их в осередки, а затем и приключение их к другому берегу.

Исследование образования русел разного типа и исследование происходящих в них процессов в 1953 г. выполнялось О. В. Андреевым и И. А. Ярославцевым [3]. Среди прочих типов процесса этими исследователями изучалось и самоформирование побочного (прямолинейного) типа процесса. Существенное отличие опытов Ярославцева и Андреева от опытов Шарашкиной, Розовского и Кудряшова заключается в том, что расход воды и наносов на модель подавались по модельному гидрографу, имитирующему натурную изменчивость жидкого и твердого стока. Авторами получен ряд интереснейших выводов, оценена роль крупности донных наносов и показано, что на одной и той же установке в результате изменения гидролого-гидравлических характеристик потока и наносов можно получить разные типы руслового процесса, аналогичные натурным.

Л. Леопольд и М. Вольман [84] также исследовали в относительно узком гидравлическом лотке формирование разных

¹ Н. С. Шарашкина пишет, что к 13-му часу образовались хорошо выраженные лобки со скоростью перемещения 0,06—0,1 м/ч, по-видимому, эта скорость определялась ею от 13-го часа.

типов процесса, в том числе и побочного. Они получили зависимости, свидетельствующие о том, что двойной шаг побочней (или длина меандр) есть функция расхода воды и ширины потока в бровках берегов. Последняя зависимость дает меньший разброс точек. Эта зависимость построена Леопольдом и Вольманом по натурным и лотковым данным с использованием данных Кьюрейши, Инглиса и Брукса.

Таким образом, Леопольд и Вольман использовали данные, относящиеся как к меандрирующим, так и к прямолинейным руслам и лоткам. Все эти данные сгруппировались около одной прямой линии, что свидетельствует о единой связи длины меандр и побочней с шириной русла

$$L = 6,5B^{1,1}. \quad (2.35)$$

Ц. Инглис установил, что для аллювиальных потоков справедлива следующая формула:

$$L = 6,6B^{0,99}. \quad (2.36)$$

Л. Леопольд и М. Вольман для галечных русел нашли, что длина меандр пропорциональна ширине с другим показателем степени

$$L = 10,9B^{1,01}. \quad (2.37)$$

Сопоставляя зависимость длины побочней и меандр от расхода и ширины русла, Леопольд и Вольман пришли к выводу, что эта длина зависит от ширины потока, а от расхода воды только косвенно, поскольку в расход входит ширина. Тем самым авторы подчеркнули не только роль ширины потока, но также высказали мысль о том, что тенденция к меандрированию проявляется уже в прямых руслах, которые, хотя и не встречаются в природе на больших протяжениях, но распространены повсеместно.

Ч. Карлстон [66], анализируя результаты предшествующих исследований, в том числе Инглиса и Леопольда, получил, что длина меандр пропорциональна расходу в степени 0,62

$$L = 8,2Q^{0,62}, \quad (2.38)$$

причем связь длины меандра и расхода лучше проявляется при использовании в качестве расчетного расхода среднегодового расхода, чем использовавшегося ранее расхода в бровках (или чуть выше бровок) берегов.

Для уточнения коэффициентов и показателя степени Карлстон использовал статистическую обработку данных по 31 потоку с широким диапазоном данных. При этом было получено следующее выражение:

$$L = 10,6\bar{Q}^{0,46} \quad (2.39)$$

при коэффициенте множественной корреляции, равном 0,995.

Л. Леопольд и М. Вольман и Мюллер считают, что развитость петель излучины зависит от характеристик берегов реки и от других местных характеристик гораздо больше, чем от каких-либо гидродинамических причин.

Р. Карлстон нашел из статистического анализа, что ширина пояса меандрирования связана со среднегодовым расходом следующим выражением:

$$B_m = 65,8 \bar{Q}^{0,47}, \quad (2.40)$$

а ширина русла

$$b = 7 \bar{Q}^{0,46}. \quad (2.41)$$

Ширина русла в зависимости от расхода в бровках берегов представляется следующим выражением:

$$b = 2,95 \bar{Q}^{0,47}. \quad (2.42)$$

По мнению Вольмана, приведенному Карлстоном, руслоформирующими расходами меандрирующих рек являются расходы воды в диапазоне от низких расходов до среднегодового. Сопоставляя данные экспериментального исследования с натурными, Леопольд и Вольман пришли к выводу, что прямые русла, равно как и русла другого типа, могут образоваться в любых условиях при определенной комбинации гидрологических характеристик. Причем при изменении характеристик состояния квазиравновесия данное русло за сравнительно короткий промежуток времени может изменить тип своего процесса.

Положение, форму и величину побочней Саймонс и Ричардсон [91] связывают с выравниванием русла. Побочни зависят от характеристики наносов и отношения B/H на перекатных участках между двумя излучинами. Состояние верхней излучины, по мнению Саймонса и Ричардсона, диктует берег, у которого образуется первый побочень. В нижней излучине вторичная циркуляция препятствует нормальному распространению баров (побочней). Поскольку побочни расположены между двумя излучинами, постольку они зависят и от характеристик излучин. По мнению Саймонса и Ричардсона, количество побочней обратно пропорционально расходу воды. Поток, обтекая эти побочни, меандрирует. Скорость движения побочней в большей степени зависит от изменения гидравлических характеристик потока (в том числе в излучинах), и в результате побочень перестраивается применительно к новым условиям потока. При движении излучин, ограничивающих прямолинейный участок, появляется дополнительная возможность перемещения и побочней на этом участке.

2.5.1.1. Исследование Аккерса-Чарльтона. Эти исследования были предприняты Аккерсом и Чарльтоном с целью увязать лабораторные натурные исследования по транспорту наносов и меандрированию путем использования такой крупной экспериментальной установки, которая может рассматриваться, как малая натурная река.

Уклон «долины» менялся в некоторых пределах, но всегда начальный уклон дна был одинаков. Расход воды в течение опыта поддерживался постоянным, но в нескольких опытах он специально менялся, чтобы установить, как он влияет на изменение русловых процессов.

Пионерное русло трапецеидальной формы задавалось такой ширины, которая по предположению экспериментаторов была меньшей, чем требуется для данного расхода. Расход воды увеличивался до заданного в течение получаса постепенно. На этой стадии сразу же наблюдался размыв берегов и из этих наносов формировались рифеля и дюны на дне русла. В действительности концентрация донного материала очень сильно зависит от начального уклона дна в равномерном потоке. В некоторых случаях начальный уклон был задан слишком большим и тогда возникали побочни, а затем меандрирование русла. В этих случаях опыт повторялся с меньшим уклоном дна, чтобы сохранить прямолинейность русла.

Концентрация твердого материала при размыве берегов поднималась до сотен миллиграмм на литр. После первого периода размыва берегов, который составлял от нескольких часов до нескольких суток, русло устанавливалось окончательной формы и в нем наблюдался небольшой расход наносов. Когда поток размывал берега, то часть илистых наносов поступала в поток и некоторая часть этого материала откладывалась на побочнях. Наилкок делал побочни неразмываемыми (кстати, об этом же процессе сообщает и И. Л. Розовский). Процесс начинался с образования побочней в траншее, затем происходил размыв берега напротив каждого побочня, материал этого размыва откладывался на нижележащем побочне, расширял его и тем самым усугублял размыв берега. При образовании меандр ширина этого потока становилась большей, увеличивался и уклон дна.

П. Аккерс в своих первых экспериментах выделяет три типа русла:

- 1) русла, в которых берега не размывались из-за образовавшегося на них наилка, заcolmатировавшего поры между песчаными наносами;

- 2) расширенные русла, образовавшиеся за счет размыва берегов;

- 3) русла с побочнями, которые затем начинали меандрировать.

Эмпирические формулы, связывающие геометрию русла с расходом, полученные на основании экспериментальных данных Аккерса, содержат три главнейших (по мнению Аккерса) физических соотношения; для гидравлических сопротивлений русла, расхода наносов и формы поперечного сечения. Одна из формул приведена в главе о грядах (1.41), другую приведем здесь

$$\frac{v}{v_*} = 7,13 \left(\frac{H}{\Delta} \right)^{0,25}. \quad (2.43)$$

После первого цикла экспериментов Аккерс больше уделял внимания проверке существующих и распространенных за рубежом формул транспорта донных наносов и морфометрических режимных соотношений, чем выяснению природы образования побочней.

2.5.2. Экспериментальное исследование меандрирования

Следующая серия экспериментов Аккерса, проведенная совместно с Чарльтоном, была посвящена изучению меандрирования. Для выяснения влияния начальных условий на форму меандр исследовались несколько различных комбинаций расхода наносов, начальной ширины пионерной траншеи (прямоугольного русла) и уклона дна долины. Оказалось, что в каждом сочетании как ход развития процесса, так и конечная форма русла были различными.

Опыты проводились при заполнении водой прямолинейного трапецидального русла так, чтобы уровень воды был выше берегов на 2—3 см. Опыт продолжался от 5 до 35 дней до получения устойчивой формы русла. Почти во всех опытах русло расширялось или свободно меандрировало до постоянного положения, за исключением тех нескольких опытов, где поддерживался постоянный уклон долины.

Последовательные стадии развития русла заключались в следующем: на дне верхового участка в результате подачи расхода воды и наносов образовывались рифели, симметрично расположенные вдоль продольной оси потока. Спустя 6—24 ч в зависимости от величины расходов образовывались симметричные побочни в пределах первоначального русла, имеющие одинаковый шаг. Побочни продолжали увеличиваться в длине и высоте и перемещались сравнительно быстро, увеличивая также площадь своей центральной части, и русло становилось шире, хотя в генеральном направлении оставалось еще прямолинейным. Затем, на следующей стадии развития одновременно по всей длине участка появились ниши размыва берега напротив каждого побочня (рис. 2.6). Расширение этих ниш приводило к возникновению синусоидальной в плане формы русла, которая также медленно сползала вниз по течению с условно меньшей скоростью, чем сползание побочней. При

этом ширина центральной части побочной оставалась неизменной или слегка уменьшалась. В центре русла вблизи от места подачи наносов во всех опытах образовывалась мель — ленточная гряда или осередок, которую поток обтекал, образуя два рукава.

Образование начального осередка и появление побочной на всем участке происходило одновременно, т. е. начальный участок не влиял на формирование меандрирования.

П. Аккерс замечает, что в тех опытах, в которых расход донных наносов был менее критического (предельного расхода донных наносов, необходимого для начала меандрирования), русло оставалось прямолинейным, хотя подвергалось расширению, и на начальном участке образовывался упомянутый бар—осередок, а по длине русла формировались бары, но меандрирования не наблюдалось. П. Аккерсом был проведен специальный опыт, в котором сначала не подавались наносы и меандрирования не было, а затем в русло на начальном участке подавался заданный расход наносов, превышающий критическую его величину, и через некоторое время меандрирование русла началось повсеместно.

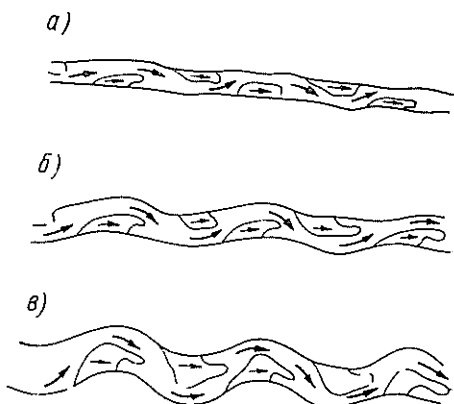


Рис. 2.6. Развитие меандрирования в опытах Аккерса.

а — побочный процесс; б — размыв берегов; в — меандрирование (ограниченное).

В опытах, в которых при прочих равных условиях, приводивших к меандрированию, был уменьшен уклон долины и поддерживался постоянным в течение опыта, меандрирование прекратилось и началось формирование разбросанного русла (расширение русла). Это произошло вследствие того, что уклон свободной поверхности в русле увеличился, вода затопила берега на верхнем участке и началось расширение русла, т. е. появился другой русловой процесс.

П. Аккерс и Ф. Чарльстон проводили также опыт, когда первоначально прямолинейное русло имело ширину, большую, чем пояс меандрирования. В том случае, когда подавались большие расходы воды и наносов образовывалось синусоидальное русло (т. е. имел место тот же процесс, но большего масштаба). Когда же расходы были уменьшены, то внутри меандрирующего русла появилась сначала синусоидальная модель русла, а далее она нарушилась, побочки были отторжены и возникла русловая многоруканность.

Как видим из описания опытов, процесс на модели Аккерса и Чарльтона, Шарашкиной и Розовского происходил в основном одинаково. П. Аккерс в своих публикациях представил достаточно подробный экспериментальный материал, позволяющий определить различные гидравлические и морфометрические характеристики, относящиеся к разным стадиям процесса. Им отдельно выделены стадии прямолинейного русла, стадии активного движения побочней и образования меандр. В целом ряде специальных статей Аккерс и Чарльтон анализируют морфометрию русла разного типа, характеристики донных форм, параметры излучин и гидравлические сопротивления русла.

В результате кропотливого анализа Аккерс и Чарльтон получили следующие выводы.

1. Меандрирование первоначально прямолинейного русла начинается тогда, когда наблюдается неустойчивость транспорта донных наносов, выражающаяся в появлении побочней. Только после того, как эти побочни становятся «выступающими», возникает синусоидальный размыв берега.

2. Имеется два главных динамически устойчивых типа русла — прямолинейный с микроформами и синусоидальный.

3. Длина меандр для исследованного диапазона величин может быть выражена формулой

$$L = 38,0Q^{0,467}. \quad (2.44)$$

4. Ширина меандрирующего русла, по крайней мере, вдвое превышает ширину прямолинейного русла при прочих равных условиях (Q и Q_T). Русла с выступающими побочнями никогда не остаются прямолинейными и имеют ширину, меньшую, чем меандрирующие русла.

5. Связь между шириной пояса меандрирования и расходом по данным экспериментов не обнаружена.

6. Длина меандр пропорциональна ширине русла.

7. С развитием процесса площадь побочня заметно увеличивается, но шаг побочней сохраняется постоянным (заметим, что в опытах Шарашкиной и Розовского с развитием процесса менялась и длина побочней. Возможно это было связано с разной методикой экспериментов — у Аккерса в русло подавались наносы систематически, а в опытах Шарашкиной и Розовского наносы укладывались на начальном участке по мере оголения колышков, фиксирующих первоначальную отметку поверхности дна. Кроме того, у Шарашкиной русло в процессе опытов расширялось, а у Розовского нет).

8. Если подача наносов (расход) превышала некоторую критическую величину, после образования меандр на участке длина меандр стремилась уменьшиться, так как расход наносов увеличивался.

9. Скорость сползания меандр в экспериментах составляла 0,15 м/день.

10. Опыты с флюоресцентными метками показали, что наносы, поступающие от размыва одного берега, никогда не перемещались к другому берегу.

11. Имеется некоторый предельный расход донных наносов, не достигая которого русло остается прямолинейным и превышая который меандрирует при условии, что уклон долины не препятствует развитию гидравлического уклона, необходимого для транспорта заданного расхода наносов.

12. Изученные малые потоки можно классифицировать следующим образом:

— прямолинейные с микроформами, для которых

$$I < 0,0015Q^{-0,12}, \quad (2.45)$$

— побочные, для которых

$$0,0015Q^{-0,12} < I < 0,0021Q^{-0,12}, \quad (2.46)$$

— меандрирующие, характеризующиеся

$$I > 0,0021Q^{-0,12}. \quad (2.47)$$

13. Когда уклон долины недостаточен для развития гидравлического уклона, необходимого для транспорта заданного расхода наносов в форме прямого русла с побочными или меандрирующего русла (в зависимости от величины расхода наносов), тогда развивается осередковый тип русла.

14. Конечный уклон меандрирующего русла по крайней мере в 1,5 раза больше уклона прямого эквивалентного русла с побочными. Причем, если оценивать уклон по тальвегу, то в среднем отношение уклона свободной поверхности меандрирующего и побочного русла составит 1,73, а по прямой линии — 2,37.

15. Потери энергии в меандрирующем русле могут быть разделены на потери, идущие на донное трение, и на потери за счет влияния формы русла. Согласно экспериментам почти 60% потерь энергии возникает за счет извилистости русла и изменений поперечных сечений.

16. Наибольшие глубины в излучине и на перегибе примерно те же, что и в прямолинейном русле при тех же условиях.

17. Касательное напряжение на дне в меандрирующих руслах примерно на 10% выше, чем в прямолинейных руслах при тех же условиях.

Как видим, интереснейшие выводы Аккерса, касающиеся процессов возникновения меандрирования, требуют увязки с существующими типизациями руслового процесса и позволяют

сделать попытку более глубокого обоснования типизаций руслового процесса.

2.5.2.1. Исследование Х. Шеном и С. Комура возникновения меандрирования в прямолинейных аллювиальных руслах. Рабочей гипотезой Шена и Комуры [82] явились представления Эйнштейна и Шена [91], а также Лангбейна и Леопольда. По мнению последних, меандрирование есть наиболее вероятная форма геометрии русла. Исследуя пять рек в штате Вайоминг, они установили, что на криволинейных участках русла изменения донных касательных напряжений и коэффициента гидравлических сопротивлений существенно меньше, чем на прямолинейных. (Как видим, точка зрения противоположна Аккерсу.)

Г. Эйнштейн и Х. Шен установили два типа меандрирования в прямолинейных руслах. Первый тип меандрирования они связали с наличием диагонально расположенных баров (побочней), возникающих в результате наличия поверхностных волн. Второй тип меандрирования они связали с наличием у берегов прямолинейного русла ям размыва, расположенных также диагонально по отношению друг к другу. Возникновение ям размыва Эйнштейн и Шен объясняют различием в касательных напряжениях на двух берегах потока. Свое экспериментальное исследование авторы посвятили изучению возникновения второго типа меандрирования. При этом авторами приводится теоретическое обоснование возможности появления ям размыва у разных берегов с использованием предложенной Теодорсеном модели турбулентности в виде вихревой подковы.

Экспериментальное исследование проводилось в лотке с боковыми стенками, которые могли изменять угол откоса с дном и которые покрывались различной шероховатостью в виде симметрично расположенных брусков размером $3 \times 3 \times 10$ см. Ширина лотка составляла 0,76 м, высота 0,42 м, а длина 15 м. В качестве материала использовались пластмассовые зерна $\sigma_T = 1,054$ и $\varpi = 3,2$ см/с.

Для подтверждения принятой гипотезы авторами исследовалось несколько различных ситуаций, учитывающих неустановившийся режим и шероховатость стенок. Исследовалось раздельное изменение скорости при постоянной глубине и глубины при постоянной скорости.

При возрастании скорости было получено дно с чередующимися ямами. При постоянной скорости потока, но уменьшающейся глубине появились ямы размыва.

В результате исследования Шен и Комура пришли к следующим выводам.

1. Для возникновения чередующихся у разных берегов ям размыва, являющихся причиной меандрирования, требуется неустановившийся неравномерный режим потока.

2. При установившемся равномерном режиме чередующиеся ямы размыва не возникают. Смена неустановившегося режима установившимся и равномерным приводит к исчезновению ям размыва.

3. Средняя максимальная глубина размыва увеличивается с увеличением изменения продольной составляющей скорости потока по времени и по длине.

4. Шероховатость берегов есть необходимое требование для возникновения таких форм дна, которые ведут к меандрированию (по крайней мере в диапазоне исследованных характеристик).

5. Наибольшая глубина размыва при диагональных ямах больше, чем при нерегулярном дне при тех же средних гидравлических условиях.

6. Возрастание глубины потока во времени так же, как $\frac{\partial v}{\partial t} < 0$ не приводит к зарождению меандрирования.

7. Шероховатая поверхность внешнего берега излучины создает вторичные течения, противоположные по направлению поперечной циркуляции, что приводит к стабилизации излучины.

Даже беглое сопоставление опытов Аккерса—Чарльтона и Шена—Комуры свидетельствует о том, что этими исследователями изучалось два разных явления. Однако и те, и другие относят его к одному процессу, хотя Шен—Комура оговаривают, что ими исследовались некоторые другие причины меандрирования. Может быть поэтому у названных исследователей и выводы подчас противоположны. В то же время выводы и тех, и других представляют несомненный интерес и требуют взаимной увязки или объяснения.

2.6. Экспериментальные исследования осередкового типа процесса и русловой многоруканности

Исследованием возникновения осередкового типа процесса в СССР занимались А. В. Андреев и И. А. Ярославцев [3], а за рубежом Леопольд и Вольман [84]. Целью исследования Андреева и Ярославцева было создание лабораторной реки с блуждающим руслом. Эксперименты эти широко известны, и мы не будем на них подробно останавливаться, отметим только, что упомянутым авторам удалось установить, что деформации «блуждающих» рек вызваны транспортом структурных наносных образований — гряд (осередков) — и наблюдаются при увеличении ширины русла и уменьшении уклона.

Л. Леопольд и М. Вольман в своих исследованиях получили разветвление первоначально однорукавного русла. Им была создана прямолинейная траншея в широком лотке. В результате транспорта донных наносов в первоначальной

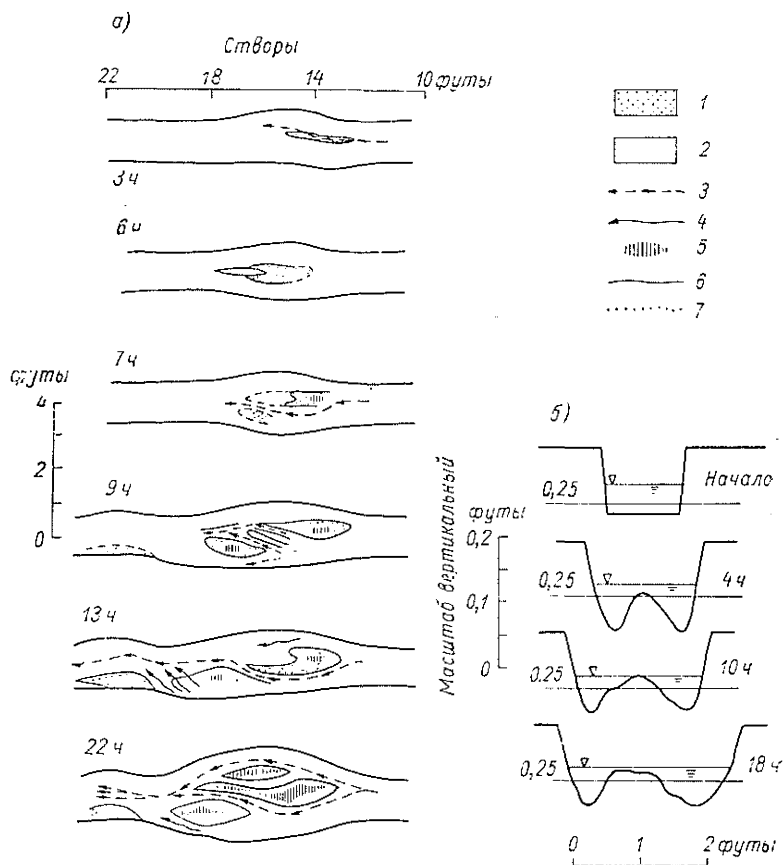


Рис. 2.7. Развитие русловой многорукавности в лотке, по Леопольду—Вольману.

1 — отложение более крупного материала, чем средний, 2 — отложение более мелкого материала, чем средний, 3 — траектории донного транспорта, 4 — течение воды в приглубую часть, 5 — острова или другие русловые формы, 6 — гребень бара четкий, 7 — гребень бара, выраженный нечетко; а — стадии образования осередка и рукавов, б — стадии развития поперечного сечения в створе 14 фут.

траншее образовывался бар (осередок), при обтекании которого поток разрабатывал себе два новых русла. В этих рукавах вновь образовывались центральные осередки. Таким путем первоначальное русло оказывалось разделенным на несколько рукавов (рис. 2.7).

Л. Леопольд и М. Вольман отмечают, что процесс образо-

вания осередков и как следствие русловой многорукавности идентичным образом протекал и в натурных условиях на р. Хорс-Крик. При этом Леопольд и Вольман отмечают, что разнозернистость донных отложений способствовала образованию многорукавности. Эти исследователи пришли к выводу, что как в лотке, так и в естественных условиях уклон разветвленного участка оказывается большим, чем уклон однорукавного русла до начала образования осередков. (Вспомним, что Ярославцев и Андреев пришли к противоположному выводу.) Леопольд и Вольман отмечают также, что русловая многорукавность не является формой одного только отложения наносов. Эта форма процесса свидетельствует о квазиустановившемся режиме переотложения наносов в иной, чем до разветвления форме, и является приспособлением потока к заданным ему условиям транспорта наносов. Деление русла тесно связано с ростом ширины водной поверхности и уклона и с уменьшением глубины. Увеличение же ширины связано с ростом осередка как формы транспорта наносов. При русловой многорукавности наблюдается изменение всех гидравлических характеристик русла при том же расходе воды и при изменении состава донных наносов. При русловой многорукавности на дне прекращают движение более крупные частицы, т. е. в числе донных наносов остаются более мелкие фракции состава донных отложений.

Разветвление русла, по мнению Леопольда и Вольмана, происходит не только вследствие увеличенного расхода наносов, но и в результате изменения комплекса гидрологических, гидравлических характеристик потока, участвующих в образовании формы реки. У рек с русловой многорукавностью может наблюдаться такое же квазиравновесие режима, как у рек, меандрирующих или с побочным типом процесса.

Прежде чем перейти к попытке обобщения рассмотренных результатов исследования, остановимся на исследовании отдельных сторон руслового процесса, так как эти исследования кое в чем дают ключ к требуемым обобщениям.

2.7. Исследование гидравлики пойм

2.7.1. Роль пойменных процессов в общем русловом процессе

Прохождение паводков на реках, как правило, ведет к затоплению пойм. Из семи выделенных Кондратьевым и Поповым типов руслового процесса четыре характеризуются взаимодействием руслового и пойменного процессов. Остальные три типа процесса (ленточногрядовый, осередковый, побочный) часто развиваются на фоне первых четырех, хотя и могут существовать изолированно. Поскольку процессы меандрирования

тесно связаны с переработкой пойменных отложений и с воссозданием потоком пойменных пространств, безусловно, представляет интерес рассмотрение происходящих на пойме процессов и их взаимодействия с русловыми.

В инженерных расчетах влияние поймы учитывалось при необходимости оценки скоростей течения или расходов воды в русле и на пойме при выходе потока из бровок берегов. В связи с этим в первую очередь развивались методы оценки скоростного поля и гидравлических потерь потока, имеющего сложное, как бы составное сечение.

Понять морфологические процессы превращения одного типа русла в другой без внимательного рассмотрения пойменных процессов было бы просто невозможно. Разработка спрямляющего излучину протока ведет к смене свободного меандрирования незавершенным. Образование двух или более протоков ведет к развитию пойменной многоорукавности. Как мы увидим далее, места и направления будущих протоков не случайны, а зависят от рельефа, который в свою очередь закономерно размещается на поймах. Для того чтобы выяснить эти закономерности, необходимо исследовать причины развития рельефа пойм, которые кроются в морфологии и гидравлике руслового потока. Поэтому представляется очень важным внимательное рассмотрение изученности пойм в морфологическом и гидравлическом аспектах.

2.7.2. Исследование гидравлики схематизированных моделей русла и поймы

При исследовании потока, имеющего пойму, методами инженерной гидравлики обычно использовалась следующая схематизация потока: поток разбивался на два отдельных потока (русловой и пойменный), взаимодействием которых либо пренебрегали, либо специально занимались. Г. В. Железняков установил кинематический эффект при взаимодействии двух потоков с параллельными осями, заключающийся в торможении руслового и убыстрении примыкающего к русловому пойменного потока. Вследствие того что описываемая схема взаимодействия может наблюдаться только при свободном соприкосновении руслового и пойменного потоков, а также при параллельности их осей, рядом исследователей было проведено изучение взаимодействия потоков в разных, отличных от названных условиях. При этом изучалось влияние непараллельности осей, шероховатости поймы и русла, изменение угла пересечения пойменного и руслового потоков и др. Как правило, оставалось неизменным лишь одно условие: пойменный и русловой потоки существовали в непосредственном соприкосновении друг с другом, взаимодействовали в условиях отсутствия между ними каких-нибудь жестких границ раздела.

В последние годы проведено детальное исследование пойменных русел, выполненное на различных схематических моделях Г. Тобесом и А. Суки [100]. Это исследование включает в себя подробное изучение скоростного потока в слабоизогнутом модельном русле прямоугольного сечения и двусторонней пойме, исследование гипсометрии свободной поверхности этого потока при различных гидравлических режимах и нескольких сочетаниях размеров русла и поймы, а также изучение гидравлических сопротивлений и сравнение этих характеристик с таким же изогнутым потоком, но без поймы. Г. Тобес и А. Суки получили ряд интересных выводов, развивающих исследования Г. В. Железнякова и В. Н. Гончарова и др.

Что касается механизма взаимодействия потоков, то исследование изотак скоростного поля показало наличие перестройки руслового и пойменного скоростных полей при выходе воды на пойму. Рассмотрение скоростных полей в русле свидетельствует о том, что наибольшие скорости располагаются вблизи выпуклого берега. Этот факт Тобес и Суки объясняют различием формы сечений лабораторного и натурного потоков. В натуральных излучинах сечение скорее треугольное, чем прямоугольное, а также соотношение длин прямолинейных и криволинейных участков в натуре и на модели неодинаково, что и приводило к расположению максимума скорости у выпуклого берега. (Этот факт был также обнаружен в экспериментах по исследованию русловых процессов [3, 45, 50].)

Было получено, что различие в распределении поперечных составляющих скорости в сечениях лабораторных и натуральных потоков не столь велико. Г. Тобес и А. Суки считают, что исследованные циркуляционные течения в модельном русле качественно совпадают с натурными, хотя в реках эти течения и выражены слабее, чем на модели (рис. 2.8). Ими исследовалось также количественное распределение расходов воды при взаимообмене массами воды между руслом и поймой. При этом отмечалось увеличение потерь энергии при выходе потока на пойму в 2,5 раза по сравнению с потерями потока в бровках меандрирующего русла при прочих равных условиях.

Г. Тобес и А. Суки установили, что потери энергии зависят как от числа Рейнольдса, так и от числа Фруда. Влияние последнего проявляется по-разному в двух различных режимах, разделяемых некоторым критическим значением числа Фруда.

Критическое значение числа Фруда уменьшается с уменьшением гидравлического радиуса. Потери энергии для данного расхода Q в меандрирующих потоках с поймой больше, чем сумма потерь взаимодействия потоков (этот вывод согласуется с выводами, полученными ранее отечественными исследователями школы Г. В. Железнякова и школы В. Н. Гончарова).

Потери энергии, связанные с взаимодействием руслового и пойменного потоков, увеличиваются с уменьшением средней скорости и глубины затопления поймы.

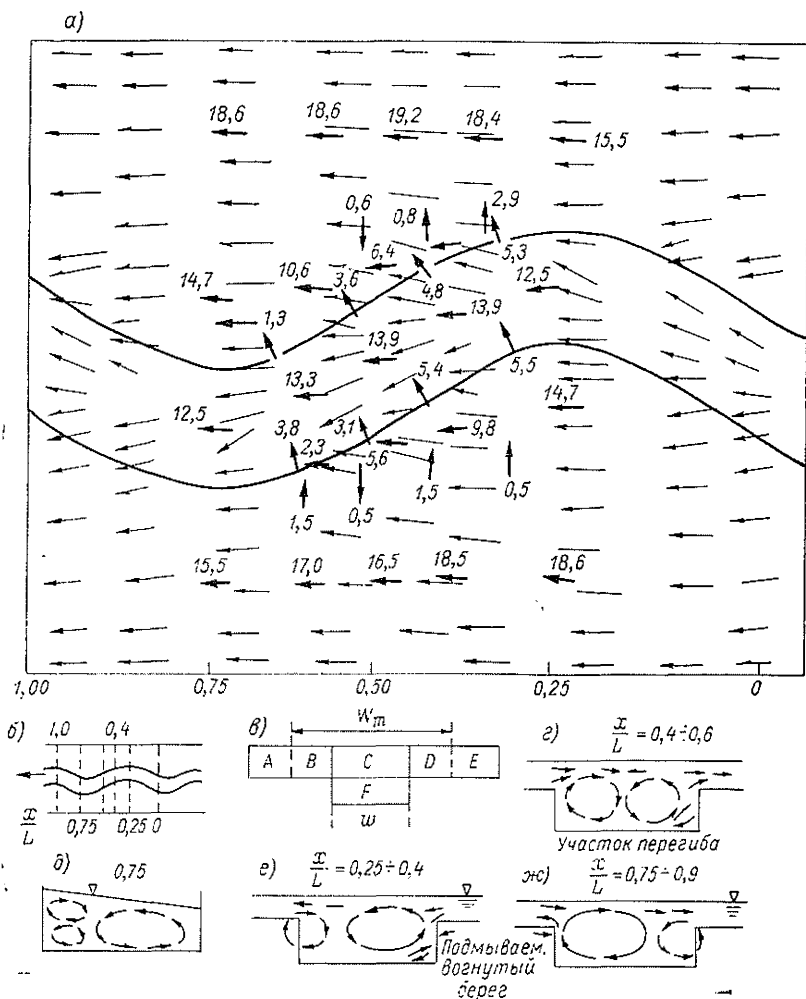


Рис. 2.8. Плановые и циркуляционные течения в русле с поймой, по Тобесу—Суки.

а — план течений с векторами переноса расхода воды; б — схема расположения створов; в — схема деления потока на отсеки; г—ж — схемы циркуляционных течений в разных створах излучины; з — на перегибе, д — в вершине излучины, е — в низовой части излучины, ж — верховая часть излучины.

Обнаруженные циркуляционные течения при выходе потока на пойму существенно отличаются от тех, которые наблюдаются в меандрирующем русле до начала затопления поймы,

когда поток находится в бровках берегов (этот вывод повторяет вывод, полученный И. А. Ярославцевым в 1966 г. [54]).

Анализ кинематического поля потока при затоплении пойм позволяет сделать вывод о том, что в высокие половодья при больших затоплениях следует ожидать отложения наносов у вогнутых берегов и отторжения или размыва пляжей. Большие расходы, вызывающие большие затопления пойм, должны приводить к спрямлению излучин. Длительность высоких половодий приводит к неустойчивости берегов русла и возникновению неустойчивых донных форм в русле, однако скорость размыва берегов при таких условиях требует специального исследования.

Г. Тобес и А. Суки пришли к выводу, что распространенное схематизированное разделение пойменных рек вертикальными условными стенками на русловой и пойменный потоки менее удачно, чем деление потока горизонтальной плоскостью (рис. 2.8 в). По мнению Тобеса—Суки, распространение полученных выводов на естественные реки требует специального исследования.

2.7.3. Исследование скоростного поля и деформаций пойм с учетом их рельефа

Первые упоминания о том, что взаимодействие русла и поймы в действительности развивается по более сложной схеме, чем это принято считать, имеются у В. С. Гвоздева [7]. При исследовании работы сельских ГЭС им было обнаружено, что затопление пойм происходит в некоторых определенных местах сосредоточенным оттоком воды из русла. При этом были также обнаружены «опасные» направления течения на пойме, схематически показана взаимосвязь рельефа пойм и течений, а также даны рекомендации по расчету пропускной способности пойм.

Обширные полевые исследования гидравлики пойм, проведенные в ГГИ Д. Е. Скородумовым [48], вновь привлекли внимание к этому сложному вопросу. Д. Е. Скородумов показал, что исследование пойм методами обычной гидрометрии с целью экстраполяции кривой расходов воды встречается с трудностями, поскольку генеральное направление потока на пойме проявляется подчас в неожиданных местах. Им было представлено несколько схем, где были показаны пути генеральных течений на пойме.

В 1967—1970 гг. исследование гидравлики и морфологии пойм в ГГИ уже проводилось на новой основе и с новыми целями. Н. Е. Кондратьев, И. В. Попов, Н. С. Знаменская и другие обследовали пойменный участок меандрирующей р. Оки у с. Досчатое и обнаружили сложное строение рельефа осмотренных участков поймы. При этом были обнаружены береговые валы, окаймляющие участок поймы в ее верхней части. Протяженность этих валов в некоторых местах нарушалась резким

падением отметок вала. Как было видно при осмотре и установлено опросом жителей, именно через эти участки понижения гребня вала, называемые в народе «прорвы», в половодье устремлялась вода из речного русла. Поскольку разность отметок гребня берегового вала и тальвега прорвы значительна (в некоторых прорвах она достигала 2—3 м), то вполне понятно, что существование пойменного и руслового отсеков, как правило, характеризуется отсутствием их контакта по всему периметру излучины. Характер же контакта скорее похож на боковой водослив, чем на обычно изучаемые схемы двух параллельных потоков. Осмотр пойменного участка показал, что для данного замкнутого между рекой и коренным берегом участка поймы, самые низкие отметки наблюдаются на довольно обширном низовом конце участка, разность отметок которого с окружающей поверхностью поймы, хоть не столь велика, как в прорыве валов, но все же обеспечивает поступление воды именно через эти низовые участки или «низовые прорвы». В дальнейшем было установлено, что обнаруженные характеристики рельефа пойм являются закономерными для меандрирующих рек.

В качестве основного элемента участка поймы Кондратьев и Попов предложили понятие «пойменный массив». Пойменные массивы — это такие окаймленные рекой и коренным берегом участки поймы, которые имеют общее происхождение и структуру.

Устанавливается, что тип массива определяется типом руслового процесса. Натурные данные показывают, что всем пойменным массивам свойственны повышенная прирусловая и пониженная притеррасная его части.

Обнаружение важных характеристик рельефа предопределило дальнейшее исследование гидравлики пойм при учете новых, закономерно размещенных граничных условий. Эти исследования позволили уточнить гидравлические процессы, происходящие на пойменных массивах, и разработать гипотезу образования рельефа пойм, поэтому остановимся на них более или менее подробно.

2.7.4. Экспериментальные исследования выноса донных наносов на пойму и скоростного режима пойменных потоков

Экспериментальными исследованиями автора на схематизированной модели р. Дон [10] было показано, что выносы донных наносов на пойму происходили по-разному при высоких и низких затоплениях поймы (рис. 2.9), поскольку при высоких и низких затоплениях наблюдаются разные системы течений на разных участках поймы. При высоких затоплениях наносы выносились с перекатных участков, расположенных в местах перегиба излучин, и из плёсовых ложин у вершины излучины на вогнутый берег.

При низких затоплениях наносы выносились только с пляжевых участков, расположенных ниже вершины излучины. Форма этих выносов во всех трех случаях была различной. С перекатных участков при высоких затоплениях наблюдались выносы песка в виде одиночных широких языков, напоминающих ленточную гряду, имеющую большую длину и ширину. Эти выносы вызывались течением вдоль оси долины. С пляжевых участков донные наносы вторичными циркуляционными

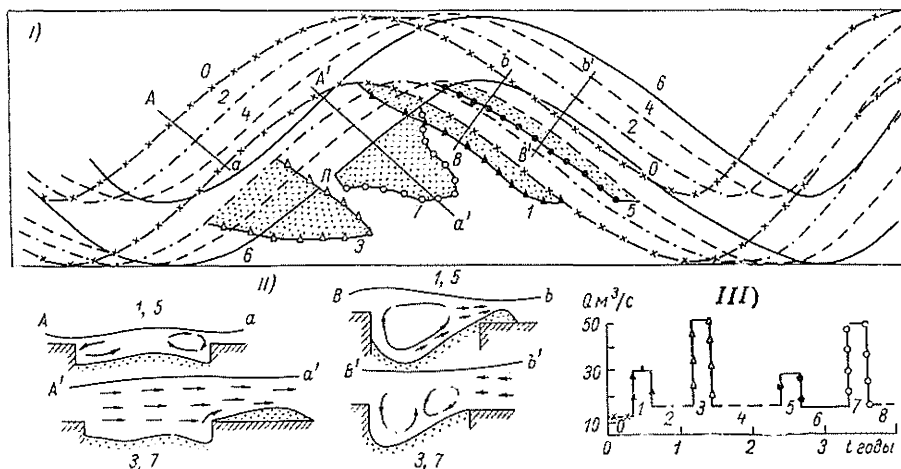


Рис. 2.9. Выносы песка на пойму и схема развития элементов рельефа поймы слабоизогнутой излучины (I); и схемы течений в характерных поперечных сечениях II и условный многолетний режим жидкого стока за период формирования рельефа III.

0, 1, 2, 3, ... 8 — на схеме III — характерные стадии гидрологического режима; 0, 2, 4, 6 на схеме I — положение границ русла, соответствующее одноименным меженным уровням на схеме III; 1, 5 на схеме I — выносы песка с пляжа в виде берегового вала в низкие паводки 1, 5; на схеме II — схемы течений в низкие паводки в створах: переката А—а и пляжа В—в; 3, 7 на схеме I — выносы песка с переката в виде «язычков» в высокую воду; на схеме II — схемы течений в высокие паводки в створах: переката А'—а' и пляжа В'—в'.

течениями выносились на пойму узкой полосой вдоль выпуклого берега. Из плёсовых ложин под действием восходящих струй циркуляционных течений донные наносы взмывались и поступали на пойму в виде небольших разобщенных между собою не широких и коротких гряд. Ни на каких других участках пойменного массива выноса донных наносов на моделях не наблюдалось. Такие же выносы донных наносов происходили и на размываемой модели р. Дона у г. Нововоронежа и на модели участка р. Оки [10].

Экспериментальное исследование гидравлики пойменного массива р. Поломети, воспроизведенного со всеми подробностями рельефа, позволило уточнить закономерности формирования скоростного поля на пойме. В результате исследования

были получены генеральные направления течений как линии, соединяющие верховую и низовую прорвы. Было установлено, что по линии этого направления скорости течения могут достигать, а иногда и превышать русловые скорости потока. Была также подтверждена разработанная Кондратьевым схема опорожнения и затопления пойм. Было показано, что сначала затопление начинается снизу, через низовую прорву пойменного массива, затем через верховую прорву и, минуя порог верховой прорвы, два потока соединяются, после чего наступает фаза транзитного течения.

Транзитное течение на пойменном массиве в результате его сложного рельефа не вовлекает всю массу затопившей пойму воды, а устанавливается на относительно узкой полосе, к которой примыкают циркуляционные зоны, занимающие обширные пространства (рис. 2.10). Ширина струи транзитного течения, а также конфигурация и площадь циркуляционных зон зависят от уровня и расхода воды в русле. Общее транзитное течение на исследуемой модели р. Поломети не наблюдалось даже при переливе воды через верховые береговые валы. Даже и тогда наблюдались циркуляционные области, связанные с рельефом поймы. С повышением уровня увеличивалось количество транзитных струй на пойменном массиве.

Исследованное на модели изменение уклона свободной поверхности вдоль оси транзитной струи показывает, что местные перепады свободной поверхности связаны с переломами рельефа, так называемыми «внутренними порогами прорвы». Продольные профили прорв были описаны И. В. Поповым [10], а затем С. В. Решетниковой. Характер продольного профиля прорвы и всего опасного направления определяет положение участка с наибольшими скоростями течения и место разработки будущего протока.

Пожалуй, здесь уместно упомянуть, что продольный профиль тальвега транзитного течения определяет также выбор формулы, по которой могут рассчитываться скорости течения на пойме. Поскольку пороги имеют пологий верховой скат и достаточно крутой низовой скат, скорости течения в этих местах могут рассчитываться по формуле водослива. Поскольку к моменту перелива воды с гребня верховой прорвы обычно низовая часть пойменного массива уже затоплена через низовую прорву, то для расчета скоростей течения целесообразно использовать формулу затопленного водослива. Расчеты скоростей течения для модельного участка рек Поломети и Оки, выполненные Знаменской, показали удовлетворительное совпадение с измеренными скоростями течения. При этом для расчета скоростей течения вне «опасного» направления была составлена таблица коэффициентов (табл. 2.1) по отношению к максимальной скорости над порогом прорвы («гребнем водослива»). При этом скорости течения в различных частях пойменного массива должны рассчитываться по формуле

$$v = kv_{\text{макс}} \quad (2.48)$$

где

$$v_{\text{макс}} = \varphi \sigma_3 \sqrt{2gH_0}. \quad (2.49)$$

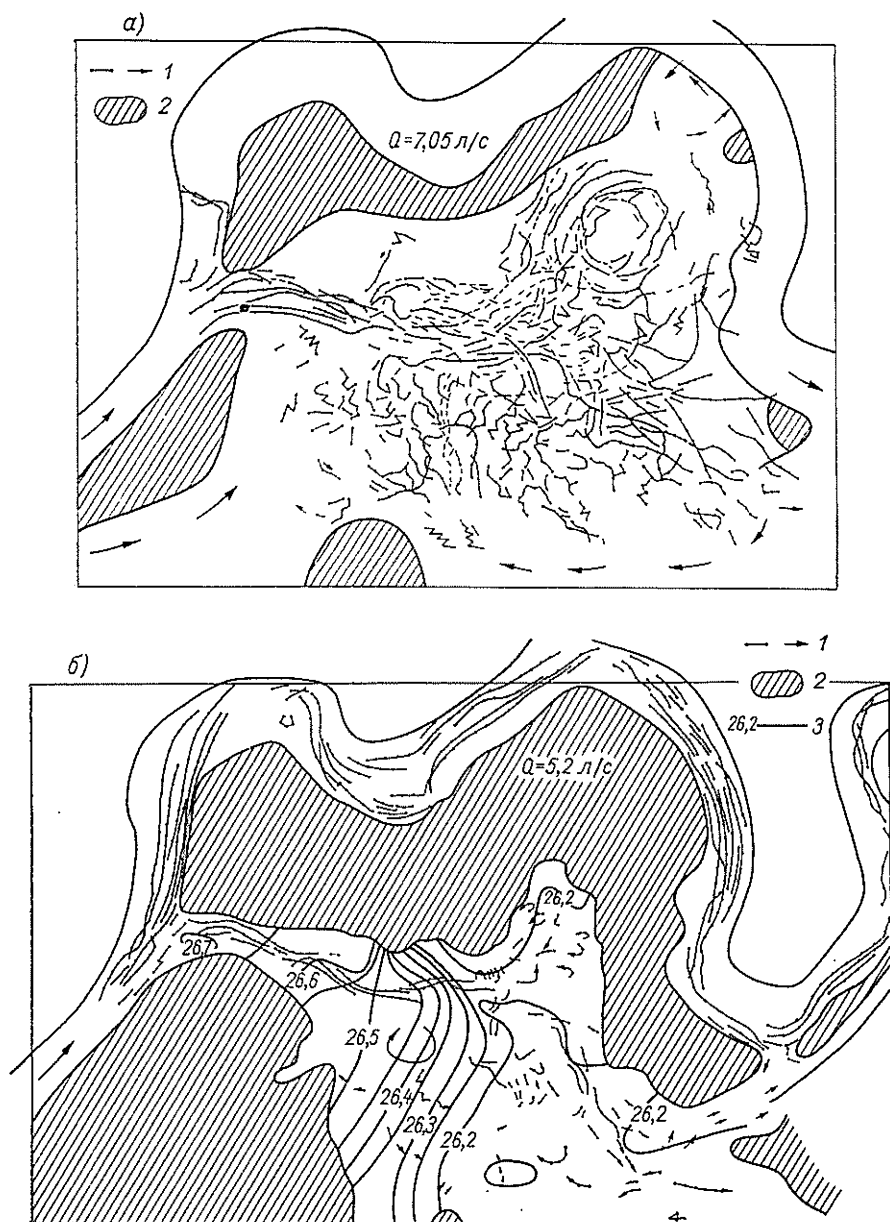


Рис. 2.10. Течения (а) и топография свободной поверхности (б) на пойменном массиве модели р. Поломети при разных расходах воды.

1 — вектора поверхностных течений, 2 — площадь, не залитая водой, 3 — изогинсы свободной поверхности в условных отметках (26,5 см).

φ — коэффициент водослива, зависящий от рельефа участка; σ_3 — степень затопленности порога прорвы, равная затоплению водослива и определяемая по графику, опубликованному в курсах гидравлики; H_0 — глубина на подходе к гребню водослива; k — коэффициент, зависящий от расположения участка на пойме и обеспеченности уровня.

ТАБЛИЦА 2.1

Коэффициенты k в формуле (2.48) и коэффициенты φ в формуле (2.49) при расчетах скорости течения на поймах для уровней разной обеспеченности

Морфологическая характеристика участка пойменного массива	Обеспеченность уровня, %					φ
	0,1	1	5	10	25	
Верховой и притеррасный участка, транзитное течение прорвы, водоразделы	1	1	1	1	1	0,45
Центральная часть пойменного массива вне транзитного течения	0,8	0,7	0,4	0,1	0,05	0,3
Привершинная часть пойменного массива и береговой вал	1	1	1	—	—	0,4
Низовой участок пойменного массива	0,8	0,7	0,5	0,3	0,2	0,35

Сказанное еще раз свидетельствует о необходимости установления причинно-следственных связей образования рельефа пойм.

2.7.5. Гипотеза образования рельефа пойм

2.7.5.1. Общие соображения. Как было показано в § 2.7.3, рельеф пойм определяет систему течений на пойме и пути дальнейшего развития руслового процесса (например, образование спрямляющих протоков), поэтому очень важно разобраться в происхождении рельефа пойм и установить, возможно ли предсказание его развития. Предыдущие исследования позволяют выделить следующие основные черты и элементы рельефа пойменных массивов: повышенная верховая часть, пониженная низовая часть, разнвысотные системы вееров блуждания русла — прежние береговые валы, отдалившиеся от русла в ходе меандрирования, верховые и низовые прорвы.

Кроме перечисленных основных особенностей рельефа пойменного массива, имеется множество вторичных форм рельефа, которые могут быть на массиве, а могут и отсутствовать. К ним относятся внутренние прорвы, местные эрозионные и аккумулятивные образования, старицы, пойменные речки, спрямляющие излучину протоки и т. п. Известны попытки установить причины формирования отдельных элементов рельефа

пойм. Формирование повышенной прирусловой части поймы И. В. Попов связывает [4]¹ с «проявлением общей для всех рек закономерностью отложения взвешенных наносов в пойме», причем у берегов русла откладывается наибольшее количество наиболее крупных наносов, а в притеррасной части лишь очень тонкий наилок. Происхождение валов Б. Б. Полюнов¹ и Н. И. Маккавеев объясняют решающей ролью эрозионных процессов, а В. Р. Вильямс говорит об эоловом происхождении валов, Л. С. Берг объясняет возникновение валов совместным воздействием эрозионных и аккумулятивных процессов, вызываемых местными течениями. Е. В. Шанцер, а впоследствии и И. В. Попов считают, что ряды валов возникают в ходе плановых смещений русла. И. В. Попов рассматривает другую схему их образования, полагая, что фундаментом берегового вала является причленившаяся к берегу песчаная коса (гряды), повторяющая изгиб излучины. Эта коса, по мнению Попова, в дальнейшем покрывается растительностью, отложения наносов на ней увеличиваются и она нарастает в высоту. И. А. Ярославцев [54] на основе анализа структуры скоростного поля вблизи вершины излучины у вогнутого берега и наблюдавшихся им выносов наносов из плёсовой ложины на нижележащий пойменный массив считает, что эти выносы и есть береговые валы.

Образование прорыв Попов связывает с самим народным названием, из которого следует, что прорыва есть результат прорыва пойменным потоком ранее целого берегового вала. Из сказанного видно, что в гипотезах об образовании отдельных элементов рельефа пойм недостаточно учитывается кинетическая структура руслового потока и закономерности перемещения донных наносов в русле и по пойме.

Как показали рекогносцировочные обследования пойменных рек, выносы донных наносов, аналогичные полученным на модели, наблюдаются и в естественных условиях [10, 54, 83].

Все это свидетельствует о том, что наблюдавшиеся на модели ограниченного меандрирования типы выноса донных наносов встречаются и в природных условиях на поймах с более сложным типом меандрирования рек и могут быть отнесены к определенным элементам рельефа.

Выносы с переката следует считать причиной, вызывающей повышение верхового участка пойменного массива, т. е. можно считать, что выносы создают основной продольный профиль. Выносы с пляжа следует рассматривать как причину формирования берегового вала, а выносы из плёсовых ложин как причину образования микрорельефа, т. е. местных аккумулятивных и эрозионных образований. Сопоставление форм выносов

¹ Библиография упомянутых авторов приведена в работе [46].

в природе и на модели и увязка их с основными формами пойменного рельефа позволяют распространить гидравлические причины, вызывающие тот или иной вынос наносов, рассмотренные ранее, и на натурные условия. Тогда следует ожидать, что выносы с переката будут наблюдаться только в половодья, выносы с пляжа — преимущественно в половодья, слегка превышающие по уровню расходы в бровках берегов, а выносы из плёса — при всех расходах выше бровки берега. Происходящие в природе плановые деформации слабо развитых излучин вносят дополнительные условия формирования рельефа поверхности пойм. Сползание излучины, как показано Н. С. Шарашкиной, И. Л. Розовским, Аккерсом, И. В. Поповым, вызывается наращением в плане пляжа за счет примыкания к нему кос, в результате чего река размывает вогнутый берег и отступает от ранее сформированного берегового вала. Поэтому с размывом вогнутого берега перемещается и вся зона выноса наносов с пляжа и новый вал образуется в некотором отдалении от предыдущего. Невысокие затопления пойм наблюдаются чаще, чем большие. Это означает, что образование валов в результате выноса наносов с пляжа является более распространенным процессом, чем вынос наносов с переката. При следующем относительно невысоком затоплении новый вал формируется у новой бровки русла в некотором удалении от предыдущего, как бы следуя за смещением русла.

При высоком и длительном затоплении пойм вынос донных наносов осуществляется с переката, и конус выноса, как и для лабораторных условий, может распространяться вниз по пойменному массиву на большие расстояния, поскольку направление движения донных наносов при этом совпадает с направлением пойменного течения вдоль оси долины. Ширина полосы выноса в этом случае зависит от протяженности участка переката, так как перекат питает наносами этот вынос. Продольный профиль выноса имеет грядовое строение, а поперечный профиль отличается выпуклостью центральной части и понижением к внешним границам выноса, что и было обнаружено при натурном обследовании. Язык выноса наносов с переката, образовавшийся при высоком половодье, может постепенно распространяться в глубь поймы. В случае, если следующее высокое половодье произойдет через большой промежуток времени, во время которого излучина сползет вниз на заметное расстояние, перекат сместится вместе с излучиной, и место выхода песка на пойму изменится, и рядом с прежним языком образуется новый. Тогда между ними окажется участок с пониженными отметками (на рис. 2.9 этот участок обозначен буквой П). Он будет служить местом сосредоточенного поступления воды в прорву. Все сказанное согласуется и с натурными наблюдениями.

2.7.5.2. Соображения о формировании рельефа пойм при других типах руслового процесса. Высказанные соображения о процессе формирования рельефа пойменного участка, ограниченного лишь одной слаборазвитой излучиной, можно распространить и на условия формирования рельефа всего пойменного массива при свободном меандрировании, включающем в себя несколько участков поймы, ограниченных излучинами реки (рис. 2.10).

Как было установлено И. В. Поповым [10, 42], каждой излучине при свободном меандрировании свойствен цикл развития. При малом угле разворота деформации излучины характеризуются одновременным ее сползанием вниз по течению и увеличением угла разворота. В этот период времени на каждом участке поймы, ограниченном одной излучиной, будут происходить процессы формирования рельефа, о которых говорилось выше. С увеличением угла разворота каждой излучины, когда прекращается ее сползание вниз по течению, сформированный ранее основной рельеф поймы закрепляется, так как одновременно перестает сползать и пойменный массив. При этом в излучине уже произошло смещение пляжей и перекаатов и соответственно изменилось расположение тех участков, откуда на пойму могут поступать донные наносы, формирующие рельеф элементарного пойменного массива. В результате могут появиться и новые верховые прорвы. Продольный профиль прорвы характеризуется наличием гребня, который может быть расположен либо в непосредственной близости от бровки русла, либо отстоять от нее на некоторое расстояние, либо на хорошо разработанных протоках гребень может вообще отсутствовать. Ожидаемое транзитное течение на пойме определяется расположением верховой прорвы у точки перегиба излучины, и низовой — по характерному затону в низовой части пойменного массива. Направление транзитного течения при малых затоплениях определяется микровыступами рельефа поймы, его местными характеристиками. С увеличением высоты уровня воды управляющая роль переходит к средним формам рельефа, а далее — к его наиболее крупным формам. Поэтому выработка тальвега временного транзитного течения зависит от частоты расходов той или иной обеспеченности. Можно считать, что наивысшие отметки гребня прорвы характеризуют высотное положение водораздела между верховой и низовой прорвами. Положение гребня прорвы зависит от частоты функционирования прорвы. Прорва, являясь пониженной частью берега и преимущественным местом сосредоточенного поступления воды на пойму, способствует формированию направленного транзитного течения. Если участок понижения между двумя соседними первичными языками наносов имеет небольшую ширину, то это будет способствовать углублению сечения прорвы, образованию ее отвесных краев и больших скоростей

течения, продукты же размыва будут транспортироваться донным путем и формировать гребень прорвы. С каждым последующим затоплением гребень будет дальше отступать от русла, а вблизи русла могут образовываться новые пороги. Снижение уровней, очевидно, будет приводить к замедлению движения гребня и к сработке его отметок.

Как было показано В. А. Виноградовым [10], в цепи смежных излучин каждая будет находиться в своей стадии развития. В связи с этим и рельеф каждого участка поймы, ограниченного одной излучиной, будет находиться в разных стадиях формирования, соответствующих стадиям развития излучин.

Можно ожидать, что и отметка гребня верховых прорв и проработанность линии транзитного течения между верховой и низовой прорвами при этом будут различными. Поэтому среди нескольких смежных излучин найдется такая, у которой гребень будет иметь наинизшую отметку. Именно через эту прорву раньше всех остальных будет поступать вода из русла на пойму. Направление же осевой линии начального транзитного течения будет определяться положением низовой прорвы той излучины, которая ближе других подошла к склону долины. Притеррасная часть всего пойменного массива, как и у элементарных массивов, остается самым низким участком поймы из-за того, что эта часть поймы меньше всего подвержена наращиванию в высоту за счет выноса донных наносов и осаждения взвешенных наносов.

В паводок образуются сначала временные транзитные течения, не имеющие четко выраженного русла, а затем периодически действующие протоки или постоянно существующие рукава. В результате свободное меандрирование превратится в незавершенное меандрирование, а далее в группу пойменных островов, разделенных рукавами.

2.8. Исследование движения потока в отдельной излучине

2.8.1. Изучение гидравлики потока на повороте

В настоящее время продолжают начатые еще в XIX в. исследования формирования скоростного поля потока в криволинейных лотках, изогнутых под разным углом. Нет никакой возможности сколько-нибудь подробно остановиться на всех этих исследованиях. Обзор исследований в этой области выполнен Н. Н. Федоровым [47]. Здесь мы позволим себе остановиться лишь на тех выводах этих исследований, которые представляются нам особенно важными.

Д. Томсон был одним из первых, кто обнаружил винтовое течение в криволинейных открытых руслах. А. Я. Милович не только исследовал поперечную циркуляцию (винтовое течение) экспериментально при больших отношениях B/H , приближающихся к натурным, но и установил, так называемый, закон «площадей», по которому произведение продольных составляющих скорости на радиус кривизны остается постоянным. А. Мокмор показал, что продольная составляющая скорости больше у выпуклого внутреннего берега, чем у вогнутого, а также, что движение донных наносов совпадает с направлением донных скоростей не только вниз по течению, но и к выпуклому берегу. На нижнем участке выпуклого берега располагается водоворот, который вызывает отложение наносов. Наблюдения Мэтзиса за скоростным полем на ручьях и крупных реках, включая р. Миссисипи, показали, что наносы, поступающие от размыва берега, откладываются вдоль этого же берега и лишь малая часть их пересекает русло. В связи с этим Мэтзис пришел к выводу, что винтообразное течение характерно только для потоков, имеющих малое отношение ширины к глубине, что не свойственно большим рекам. (Заметим также, что этого мнения придерживается и Н. Е. Кондратьев.) Г. Мэтзис пришел также к мнению, что процесс меандрирования зависит от донных наносов и их транспорта. Н. И. Маккавеев утверждает, что циркуляционные течения могут играть лишь второстепенную роль в процессе меандрирования — путем наращивания пляжей у выпуклых берегов тем самым отклонения потока к размываемому берегу. При этом, по Н. И. Маккавееву, увеличение расхода донных наносов будет способствовать увеличению интенсивности размыва противоположного берега.

Г. Мэтзис установил, что наибольшая интенсивность размыва вогнутого берега наблюдается на спаде паводка, когда наибольшие скорости потока прижимаются к вогнутому берегу, а последний перенасыщен влагой и вследствие этого менее устойчив.

А. Шукри экспериментально подтвердил выводы Мокмора. В дальнейшем Чоу показал, что спиральный поток в излучине зависит от трения на стенках (берегах) русла и центробежных сил, зависящих от скоростей течения и радиуса кривизны линий токов, а также от распределения скорости по вертикали.

И. Л. Розовский показал, что установленный Миловичем закон площадей выдерживается только на части поворота и только для гладкого дна. Было установлено также влияние формы поперечного сечения на распределение скоростного поля потока.

К. Меррис, исследуя проблему теоретическим путем, пришел к выводу, что свободные вихри, закону которых подчиняется течение в излучине, разрушаются к поверхности потока.

Он показал, что распределение скоростей по вертикали в нижнем течении излучины определяется скоростным полем у внутреннего (выпуклого) берега излучины и что отметки свободной поверхности быстро убывают у внутреннего берега до определенной точки, где свободный вихрь занимает все сечение. Образование вихря (водоворота) сопровождается прыжком вблизи внутренней стенки излучины. Положение вихря зависит главным образом от геометрии русла и от средней скорости потока.

Ч. Йен [106] исследовал характеристики потока в трапециевидных излучинах при больших отношениях ширины потока к глубине. Он получил приближенное теоретическое решение задачи о распределении скорости течения по вертикали и сопоставил его с экспериментом. Он пришел к выводу, что потери энергии в докритическом потоке при исследованных условиях зависят от изменения числа Фруда.

Т. И. Яковлева [53] при исследовании скоростного поля и деформации русла в одиночной излучине выделила два участка, качественно и количественно отличающиеся распределением продольных скоростей течения. Для первого участка характерно расположение максимальных скоростей у выпуклого берега, а для второго — нижележащего — у вогнутого. Для первого участка, как и было показано Розовским, распределение скоростей подчиняется установленному Миловицем закону площадей. Для второго участка распределение скоростей не подчиняется этому закону при превышении радиусом кривизны излучины некоторого значения.

Как видим из сказанного, при изучении скоростного поля потока в излучине иногда делались попытки связать полученные выводы с причинами меандрирования, но мало кем с общей концепцией развития русловых процессов.

2.8.2. Влияние расхода донных наносов и формы его транспорта на план течений и деформации дна в излучине

В литературе давно дискутируется вопрос о том, каков механизм развития излучины, имеется ли отражение струи, поступающей с верхнего прямолинейного участка, или размыв берега осуществляется поперечной циркуляцией потока. В связи с этим, а также для удовлетворения растущих запросов практики необходимо знать место наибольшего размыва дна в излучине и его стабильность. Из наблюдений в натуре и сопоставления лоцманских карт за разные годы мы знаем, что в одинаковых по конфигурации излучинах местоположение участка с наибольшей глубиной неодинаково. Это означает, что развитие излучин, имеющих одинаковое начальное положение, в одних случаях может пойти путем размыва правой ветви изгиба, а в других — левой, однако до сих

пор объяснения этому факту не найдено. Существующие исследования и расчетные формулы не позволяют определить ни критериев этого явления, ни, тем более, подойти к его оценке.

Т. И. Яковлева делает важный вывод о том, что участок размыва дна (плёс) в данной излучине может располагаться и у вогнутого, и у выпуклого берегов, что зависит от расхода донных наносов. Поэтому рассмотрение рельефа как результата влияния только угла разворота или радиуса кривизны излучины без учета транспорта наносов не может дать достоверных результатов.

Исследования Йена также подтверждают сказанное. Приведенные Йеном планы топографии дна в экспериментальной излучине с жесткими берегами и размываемым дном свидетельствуют о том, что центр пляжа, расположенного у выпуклого берега, с изменением числа Фруда от 0,3 до 0,5 и 0,7 соответственно перемещается все ниже и ниже по течению на три масштабные единицы, выделенные Йеном на планах русла. Следует, правда, заметить, что сам Йен пришел к выводу о том, что число Фруда не влияет на топографию русла. Он отметил, что во всех случаях при изменении F_r наблюдается качественно одна и та же картина скоростного поля потока, т. е. стрежень потока сначала прижимается к выпуклому берегу, а далее резким изгибом переходит к противоположному вогнутому берегу. На различие в расположении пляжей Йен не обращает внимания.

Ч. Йен также сопоставляет планы русла в горизонталях при одинаковых числах Фруда, но при разных отношениях B/H . Положение пляжей в этих опытах, как и на рисунках, приведенных Йеном, не изменилось. Однако Йен отмечает, что изменился характер фарватера и переката — стрежень потока от выпуклого берега плавно переходит к вогнутому. На рисунках также видно, что хотя сгущение изолиний рельефа в плёсе расположено напротив пляжа, но начало плёса зависит от изменения B/H .

Видимо, поэтому за признак влияния или невлипания числа Фруда и B/H на топографию излучины Йен принимает расположение верхней границы пляжа, с которой связан изгиб стрежня. Однако наибольшая глубина плёса, с которой связано место размыва берега излучины, не всегда расположена у границы плёса и, как правило, находится напротив и несколько ниже центра пляжа (как и отмечают Шарашкина, Аккерс и др.). Поэтому правильнее изменчивость топографии связывать либо с центром пляжа, либо с местом расположения наибольшей глубины плёса.

Ч. Йен анализировал также систему изолиний относительных донных касательных напряжений $\tau_0/\tau_{оср}$, которая сопоставлялась им с аналогичной системой для потока, имеющего

правильное трапецеидальное русло. Оказалось, что различие в рисунке изолиний наиболее четко проявилось в нижней части излучины. Высокие значения относительных касательных напряжений наблюдались на пляжевых участках, а в подвальях за пляжем наблюдалось заметное их уменьшение. Зона наибольших значений перемещалась в плёс к вогнутому берегу. Из этих фактов Йен делает вывод, что зоны намыва и размыва не прямо зависят от величины касательных напряжений. Главную же роль в деформациях дна излучины, по его мнению, играют вторичные течения, которые переносят донные наносы от внешнего берега к внутреннему следующей излучины, чем и определяют топографию меандрирующего русла.

Совпадение больших значений касательных напряжений с местом расположения пляжа, по-видимому, должно пониматься как условие усиленного транспорта наносов, приведшее к формированию пляжа, дальнейшее распространение которого вниз по течению ограничивается наличием винтового течения («свободного вихря», по терминологии Мерриса), которое на участке плёса переводит донные наносы во взвешенные и некоторое время транспортирует их взвешенным путем на участке уменьшения касательных напряжений, где они снова движутся донным путем.

Таким образом, пляж следует рассматривать, по мнению автора, как динамическую, а не статическую форму дна, которая хотя и не перемещается вниз по течению, но служит инструментом транспорта наносов вниз по течению.

Результаты исследования, выполненного Йеном, позволяют сделать вывод о том, что влияние числа Фруда на деформации дна излучины сказываются на размещении пляжа и соответственно места расположения наибольшей глубины плёса, а влияние отношения B/H сказывается на протяженности плёса (при данном составе наносов). Проведенные З. М. Великановой [9, 16] исследования движения потока в лабораторных излучинах, форма которых задавалась такой же, какую имеет натурная излучина в последовательные стадии своего развития, имели целью, кроме получения подробных данных по гидравлике потока и деформациям русла для излучин с реальной, а не идеализированной формой, ответить и на поставленный выше вопрос о причинах разного размещения пляжей и плёсов.

В этих исследованиях изменением соотношения Q и Q_t , а также формы транспорта донных наносов регулировалось и расположение пляжа у выпуклого берега, что приводило к разному положению плёса, а значит, и к разному месту ожидаемого наибольшего размыва берега. В этих экспериментах были получены также две крайние схемы течений в одной и той же излучине: одна, соответствующая удару потока о вогнутый берег и отвечающая схеме отражения потока, по Гарбрехту, а другая, соответствующая плавному обтеканию выпуклого

берега. Каждому из этих планов течений соответствуют и разные положения пляжа и плёса, вызванные разной (предельно отличающейся) формой транспорта донных наносов и разной его интенсивностью: в первом случае — гладкой фазой движения наносов, а во втором — движением микроформ (рифелей). Движение баров на вышележащем прямолинейном участке приводило к некоторым промежуточным положениям плёса и пляжа.

В этих исследованиях, кроме того, обнаружено, что при задании гладкой фазы движения наносов на вышележащем прямолинейном участке путем подачи на него определенного сочетания Q и Q_T в плёсовом участке излучины наблюдается четко выраженное продольно-поперечное винтовое движение, не захватывающее пляжевый участок потока. Это продольно-поперечное винтовое движение потока в плёсе при определенном сочетании гидравлических условий и транспорта наносов есть форма активной поперечной циркуляции потока. При этом в плёсе перемещаются крупные гряды, являющиеся, по-видимому, барами 2-го порядка, так как они занимают всю ширину винтовой струи, но не все русло.

В других гидравлических условиях, соответствующих транспорту баров разной формы, четко выраженная циркуляция затухала. Одновременно возникло вдольгребневое течение, направленное от вогнутого берега к выпуклому, перемещающее часть наносов вдоль гребня, а движение гряд вдоль вогнутого берега прекращалось. Транспорт микроформ на вышележащем перекате приводил к стабильному расположению плёса и пляжа и медленному транспорту донных наносов вдоль выпуклого и вогнутого берегов с некоторой долей транспорта частиц вдоль гребня переката.

Из сказанного можно сделать вывод, что разные сочетания жидкого и твердого стока, приводящие к смене формы транспорта донных наносов, регулируют положение пляжа, а вследствие этого и положение плёса, которое, в свою очередь, ведет к определенному направлению размыва берега излучины. Как мы видим, эта точка зрения в основном совпадает с данными Йена и мнением Аккерса, заключившего на основании своих экспериментов, что к размыву берега ведет местоположение и расширение побочней, становящихся пляжами, а также с выводом Г. И. Яковлевой, считающей, что положение плёса в излучине зависит от расхода наносов.

Сделанные выводы также увязывают в некоторой степени крайние мнения о причинах размыва берега в излучине. Полученные экспериментальные данные свидетельствуют о наличии угла встречи струи потока с вогнутым берегом и возникновении плёса непосредственно за этим местом встречи. Исследование планов течений в излучинах разной формы показывает, что имеется отражение потока, характеризующееся расположением

плёсов по ломаной линии. В то же время эксперименты показывают, что при некоторых вышеупомянутых условиях образуется винтовое течение. Поэтому можно сказать, что отражение потока следует рассматривать в сочетании с поперечной циркуляцией и одно явление не исключает другого.

2.8.3. Исследование влияния цепи излучин на происходящие в ней процессы

Этому очень важному вопросу в современной литературе уделяется недостаточное внимание. Исследование одинаковых по форме, слаборазвитых, с малым углом разворота излучин в опытах Н. С. Шарашкиной, И. Л. Розовского и Аккерса свидетельствует о сохранении формы излучин по всей длине меандрирующего участка. Однако в этих исследованиях не ставилась задача выявления непосредственного влияния вышележащей излучины на нижнюю, или наоборот. В работе Яковлевой дается анализ влияния скоростного поля одной излучины на формирование распределения скоростей в нижележащей излучине.

Т. И. Яковлева приходит к выводу, что это влияние мало и сказывается лишь на некоторой перестройке скоростного поля на входном участке низовой излучины, которое не сказывается на основной картине распределения скоростей всего изгиба потока.

Почти к аналогичному выводу на основании статистического анализа морфометрических характеристик серии последовательно расположенных излучин приходит и М. И. Кривошей [29], установившая, что для исследованных ею участков рек не наблюдается зависимости характеристик предыдущей излучины на характеристики нижеследующей петли реки.

К принципиально иному выводу пришел В. А. Виноградов [10], исследовавший серию излучин р. Полонети. Анализ скоростного поля излучин, уклонов свободной поверхности, деформаций дна и берегов показал, что характер развития одной излучины существенным образом влияет на процессы, происходящие в смежных излучинах. Угловая скорость плановых деформаций отдельной излучины существенно зависит от интенсивности развития смежных с ней, а иногда и более отдаленных излучин. Проанализированные Виноградовым плановые деформации 20 смежных излучин показали, что главное влияние на поведение нижележащих смежных излучин оказывает прорыв петли. За исследованный Виноградовым период времени на участке произошло два спрямления излучин, приведшие к резкому изменению условий транспорта наносов на спрямленном участке, что сказалось и на расходах наносов и выше- и нижележащих излучинах. Увеличение расхода наносов на спрямленном участке привело к активизации процесса на вышележащей

излучине и к затуханию процесса меандрирования на низовой излучине. Это еще раз подтверждает, роль транспорта наносов на развитие процесса меандрирования.

2.8.4. Методы расчета смещения излучины

Для расчета смещения излучин используется формула Н. Е. Кондратьева [26], позволяющая рассчитать смещение бровки вогнутого берега y по некоторым данным характеристикам потока и морфометрии русла

$$y = ck \frac{H_{\Pi} - H_0}{H_{\max} - H_0} T, \quad (2.50)$$

где c — наибольшая в пределах данной излучины скорость плановых деформаций, м/год; k — коэффициент, зависящий от угла разворота излучины α и развитости излучины S/λ_{Π} , где S — длина излучины, λ_{Π} — шаг излучины; H_0 , H_{Π} и $H_{\max}$ — глубины: соответственно средняя на входном и выходном перекате, в расчетном створе и наибольшая; T — время, за которое определяется смещение берега.

Ц. Нейе, как указывает Солеман [96], на симпозиуме по эрозии в Париже, предложил дифференциальное уравнение для меандрирующего русла

$$\frac{dl}{dt} = \frac{1}{L} \frac{dA}{dt}, \quad (2.51)$$

где l — среднее расстояние по поперечнику смещения русла за удельное время t ; A — площадь эрозии по левому и правому берегам в пределах длины меандра L .

Н. Е. Кондратьев и Б. К. Трахтенберг [27] в основу расчета плёсовой ложбины положили скоростное поле потока в излучине на подходе к повороту и форму сечения в начальном створе. В такой постановке задачи оказались искомыми границы русла. Вначале дается решение для построения плана течений свободного, не стесненного берегами русла потока. Скоростное поле определяется заданием действующих сил. Руслевые деформации излучины, по мнению Кондратьева и Трахтенберга, есть продукт несоответствия свободного потока существующим жестким границам. Поскольку участки подмыва и перемещения берега совпадают с плёсовыми ложбинами, постольку расчет положения в излучине, их протяженности и наибольшей глубины размыва в плёсе есть шаг к расчету планового смещения излучины и определения тенденции ее развития.

Положенная в основу расчета схема развития излучины свободного меандрирования получена на основе анализа аэрофотосъемки. Сведения о скоростном поле взяты из экспериментального исследования петель русла, соответствующих упомянутой

схеме развития излучины. При этом рассматривается расположение плёсов в последовательных стадиях развития излучины и констатируется, что принятой схеме соответствует и схема отражения потока от стенок русла.

Предложенное авторами решение для плана течений, основанное на уравнениях баллистики и вышеприведенных теоретических соображениях с использованием некоторых допущений, позволило Кондратьеву и Трахтенбергу получить выражения для ширины струи в плёсе и его максимальной глубины. Это в свою очередь позволило рассчитать поперечные сечения на изгибе потока и сопоставить их с наблюдаемыми в опытах З. М. Великановой. Полученное совпадение Кондратьев и Трахтенберг характеризуют как первое грубое приближение. Следует отметить, что рассматриваемая работа является первой попыткой отыскания теоретического решения задачи о русловых деформациях плёса в излучине. Упомянутые авторы оценивают свое решение как первое приближение, которое выполнено, кстати, для одной наиболее простой формы излучины из всей приведенной в начале статьи схемы ее развития. Дальнейшее развитие работы в этом направлении они видят как в области усовершенствования теории, уточнения и усложнения исходных зависимостей для некоторых принятых коэффициентов, так и в применении этого расчета для других положений меандра, что, по мнению Кондратьева и Трахтенберга, позволит подойти к проблеме меандрирования рек.

Следует, однако, признать, что положенная в основу расчета схема развития излучины свободного меандрирования не является исчерпывающей, поскольку известно, что развитие асимметрии излучины наблюдается не всегда в низовой части излучины, но иногда и в ее верховой ветви. Известны также случаи, когда одна из начальных стадий ее развития не переходит в асимметричную форму, а усугубляется путем размыва вершины излучины и превращения петли в пальцеобразную форму. Упомянутые аномалии не столь часто встречаются на практике, но и не являются единичными случаями. Это позволяет сделать заключение о существовании некоторого не учтенного Кондратьевым и Трахтенбергом фактора, действие которого проявляется в некоторых условиях и может нарушить рассмотренную и принятую этими авторами за типичную схему развития излучины. Поскольку действующими определяющими факторами руслового процесса являются расходы воды и наносов, а также ограничивающие условия (как было постулировано Кондратьевым), а в основу рассматриваемого расчета положено скоростное поле, т. е. некоторое следствие водности, а также рассматривается свободный поток и далее учитывается влияние границ на его распространение, то неучтенным фактором следует считать транспорт наносов. Этот вывод, кстати, вытекает из экспериментов на той же модели излучины, которые показали, что в зави-

симости от формы транспорта наносов расположение пляжей и плёсов в одной и той же излучине существенно меняется.

Как было показано выше, похожий результат был получен и в опытах Йена. Поэтому рассматриваемый подход к расчету формы плёса как тенденция к разрешению проблемы меандрирования представляется недостаточным и без учета транспорта донных наносов не может служить прогностическим целям.

2.9. Морфометрические зависимости

Поиски связей между морфометрическими характеристиками русла имеют давнюю историю. В 50-х годах XX в. вопросам установления морфометрических связей уделялось особенно большое внимание. Идеей таких поисков явилось утверждение М. А. Великанова о существовании специфической взаимоправляемости русловых потоков. В естественных реках ширина, глубина, уклон и крупность донных отложений находятся в определенной зависимости друг с другом и произвольное изменение одной из этих характеристик ведет к перестройке русла.

Для названных морфометрических характеристик известны многочисленные зависимости, полученные при обработке однотипного натурного материала (зависимости С. И. Рыбкина, М. А. Великанова, Н. А. Белинского и Г. П. Калинина, Л. Б. Левановского, С. Т. Алтунина и многих других авторов).

В основном эти формулы применялись для отыскания некоторых соотношений морфометрических характеристик, определяющих устойчивое русло.

Вследствие того, что в 60-е годы сам факт существования устойчивого русла подвергся сомнению, а термин этот толковался разными исследователями по-разному, интерес к морфометрическим зависимостям уменьшился. В толковании Н. Е. Кондратьева «устойчивость» рек с разным типом процесса следовало бы понимать как сохранение данного типа процесса. Поэтому 60-е годы отмечены отысканием таких морфометрических связей, которые были бы пригодны для каждого типа процесса. Примерами подобных исследований являются работы Л. Леопольда и М. Вольмана и развивающие их исследования В. В. Ромашина [9] и В. И. Антроповского [9, 10].

К этому же классу исследований можно отнести и попытки увязать расходы воды с уклонами долины или свободной поверхности потока. Обычно такие зависимости создавались для определенного района, характеризующегося сравнительно одинаковыми условиями стокоформирования. Среди них известны формулы, распространенные в США и Австрии

$$QI = 0,0063, \quad (2.52)$$

в Болгарии, разработанные Цаневым,

$$QI = 0,0022, \quad (2.53)$$

в Румынии

$$QI = 0,0072. \quad (2.54)$$

В начале настоящей главы были приведены формулы, разработанные для осередкового типа процесса Лейном (2.1) и Леопольдом и Вольманом (2.2). Для меандрирующих рек Лейном были предложены формулы (2.3) и (2.4).

По материалам равнинных меандрирующих рек СССР В. В. Ромашин получил формулу

$$QI = 0,400, \quad (2.55)$$

а для многорукавных русел

$$QI = 1,3. \quad (2.56)$$

Морфометрическая формула Великанова—Шарашкиной для сравнения с вышеприведенными формулами может быть представлена в виде

$$QI^{-0,5} = 0,22B^2d^{0,5}, \quad (2.57)$$

в которой Q и I оказываются зависимыми от абсолютных размеров русла B и крупности наносов d , что свидетельствует о большей полноте этой формулы по сравнению с предыдущими. Любопытно, что аналогичную формулу приводит и Гарде [74]

$$QI^{-0,5} = 0,18B^2d^{0,5}, \quad (2.58)$$

который в дополнение к данным, обработанным Великановым, привлек и данные по американским рекам.

К аналогичному виду можно привести и существующие морфометрические зависимости. Приведем здесь для сравнения две из них, выбранные наугад:

зависимость С. Т. Алтунина

$$Q^n I^{-0,5n} = kB \quad (2.59)$$

и зависимость С. А. Аннаева и Г. В. Железнякова

$$Q^{0,09} I^{0,27} = kBn^{0,5}. \quad (2.60)$$

Зависимость К. Ф. Артамонова и В. Ф. Талмазы может быть приведена к следующему виду:

$$Q^{0,4} I^{-0,3} = 0,68Bd^{-0,1}. \quad (2.61)$$

Рассматривая вышеприведенные формулы, можно сделать вывод, что произведение QI , или член, содержащий произведение Q и I , взятых в разных степенях, рассматривается некоторыми исследователями как постоянная величина, а некоторыми как функция ширины, диаметра частиц. По-видимому, для разных условий произведения QI изменяются, то с диаметром частиц, то

с шириной. Можно представить себе, что при малой изменчивости скорости течения для рек данного района (или типа) ее роль будет учтена в общем коэффициенте. Можно представить также, что для потоков одного размера или сложенных примерно одинаковым составом грунтов роль глубины или диаметра «укроется» за общим коэффициентом. Существование идентичных формул, отличающихся величиной коэффициента для разных районов (характеризующихся разными условиями), а также для разных типов руслового процесса свидетельствует о том, что ни одна из приведенных формул не является общей и справедливой для всех условий.

2.10. Обобщение изученности в области руслового процесса

2.10.1. Определяющие факторы руслового процесса

В гидроморфологической теории руслового процесса, как известно, выделяются три определяющих фактора: водность, транспорт наносов и ограничивающие условия. Эти факторы в основном признаются и Д. Кеннеди (см. табл. 1.1). Рассмотрим эти факторы отдельно.

2.10.1.1. Транспорт донных наносов. Три типа русловых процессов большинством исследователей связываются с перемещением мезоформ (баров): ленточногрядовый, побочневый и осередковый типы. В этих случаях влияние транспорта донных наносов на русловый процесс проявляется непосредственно в формировании баров, одноименных с типом процесса, и вряд ли вызывает сомнение. Как было показано, процессы зарождения меандрирования также связаны с транспортом донных наносов. И. А. Ярославцев, Леопольд—Вольман показали, что разветвлению русла на рукава всегда предшествовало образование в русле осередка, являющегося грядовой формой транспорта донных наносов.

Исследование деформаций отдельных излучин также свидетельствует о том, что расположение плёса зависит от расхода донных наносов, вызывающего то или иное расположение пляжа в излучине.

Как было показано при рассмотрении пойменных исследований, транспортом донных наносов и расположением русловых форм в излучине определяются основные формы пойменного рельефа, которые в свою очередь управляют пойменными течениями, а значит определяют места разработки проток. Все это позволяет подтвердить и обосновать принятый в гидроморфологической теории постулат о независимой определяющей роли расхода донных наносов в его структурном выражении. При этом

можно принять, что при установившемся течении расход донных наносов идентичен транспортирующей способности потока.

Влияние неустановившегося режима будет сказываться, по-видимому, только в том, что изменение расхода донных наносов и транспортирующей способности потока будет несколько отставать друг от друга, но при медленном изменении расхода воды в паводок этим отставанием можно пренебречь.

В главе о грядовом движении наносов мы установили, что принципиальной разницы между лотковыми и натурными барами (мезоформами) нет. Учитывая это обстоятельство, логично полагать, что увеличение расхода донных наносов или транспортирующей способности потока в натуральных условиях также будет сопровождаться аналогично изученной в лотках последовательностью смены формы баров. Случаи перехода к полному взвешиванию наносов в натуре мало распространены. Но можно предполагать, что соответствующее увеличение расхода донных наносов приведет к стиранию русловых форм и транспорту донных наносов в гладкой фазе или даже к антидюнному движению. Такие условия вследствие изменчивости Q в году не могут в натуре продолжаться долго. Следствием этой формы транспорта было бы блуждание потока и русла, так как следующее (за столь интенсивными условиями на пике половодья) уменьшение расхода наносов на его спаде вызвало бы спонтанное образование русловых форм (осередков, побочней или ленточных гряд). Их расположение в русле после прохождения гладкой фазы не было бы связано с предыдущим расположением русловых форм, поэтому поток приобрел бы новые очертания, воспринимаемые нами как блуждание русла.

2.10.1.2. Водность. Если расход донных наносов является независимым фактором, влияющим на смену типа русловых форм при неизменном расходе воды, то увеличение расхода воды изменяет гидравлические характеристики потока: глубины и скорости течения, а также местный уклон свободной поверхности потока. При этом происходит перестройка русловых форм, т. е. снова происходит увязка транспортирующей способности с расходом наносов.

Роль водности может рассматриваться также и в том, что в зависимости от расхода воды будет наблюдаться различная пространственность потока и различная выравненность гидравлических характеристик потока на рассматриваемом участке реки. Можно считать, что при малых расходах воды русловой поток будет неравномерным как вдоль одной мезоформы, так и в разных частях живого сечения, и на рассматриваемом участке будет наблюдаться как бы несколько струй потока, характеризующихся различными условиями. В результате по ширине потока будут формироваться разные гряды (микро- и мезоформы), соответствующие этим условиям.

С увеличением расхода воды будет уменьшаться неравномерность потока и количество обособленных струй по его ширине до тех пор, пока не будет достигнута выровненность гидравлических характеристик русловой части потока и пока сформируются такие мезоформы, которые займут всю его русловую часть. Поэтому можно считать, что от водности зависит разномасштабность русловых форм.

Как было установлено в разделе, посвященном исследованию пойм, в зависимости от расхода воды либо развивается меандрирование, либо промываются протоки, а значит наблюдается пойменная многоорукавность или незавершенное меандрирование.

Исходя из изложенного, следует признать, что водность влияет на поддержание того или иного типа процесса или на его смену и действительно является определяющим фактором руслового процесса.

2.10.1.3. Ограничивающие условия. Классическим примером ограничивающих условий, влияющих на развитие руслового процесса, служит ограничение поймы коренными берегами при меандрировании. К таким условиям также относят выход скальных пород, ограничивающих глубинные размывы, и другие препятствия геологического происхождения. Однако автор склонен рассматривать эти условия шире. Рассмотрим, каковы ограничивающие условия для транспорта мезоформ в русле.

Транспорт донных наносов в лотках происходит при наличии ограничивающего влияния стенок лотка. Является ли этот фактор обязательным условием для возникновения русловых форм в природе? Известно, что ленточные гряды, побочни и осередки, руслоформирующими условиями которых являются расходы выше бровок русла, существуют как в естественных руслах, не имеющих пойм, так и в руслах с поймой. В одном русле могут также одновременно существовать мезоформы разного порядка. Поэтому можно предположить, что для возникновения мезоформ ограничивающие условия в виде жестких стенок не обязательны. По-видимому, такими ограничивающими условиями являются жидкие границы потока, возникающие на границах раздела струи с разными гидравлическими характеристиками, поскольку мы видели образование гряд в пределах отдельных струй. Вероятно, к ограничивающим факторам, влияющим на движение мезоформ, должна быть отнесена и изменчивость гидравлического режима.

При постоянном расходе воды русловые формы в прямолинейном русле продолжали бы свое поступательное перемещение вниз по течению. Уменьшение расхода воды ведет к замедлению сползания форм, остановке, обсыханию верхних частей мезоформ и к частичным деформациям их подводных частей. Изменчивость расхода воды ведет к сокращению времени активного движения мезоформ, к дискретности во времени этого движения

и в этом сказывается его ограничивающее влияние. К ограничивающим факторам движения мезоформ следует также отнести и криволинейность долины и связанную с ней вынужденную криволинейность русла. Такие изгибы русла приводят к перераспределению расхода донных наносов по сечению и формированию пляжей и плёсовых лощин. В плёсовых лощинах в паводок может наблюдаться винтовое движение, которое способствует переводу донных наносов, поступающих с верхнего участка, во взвешенное состояние. Это неизбежно приведет к консервации русловых форм перед винтом. Проходя короткий участок пути во взвешенном состоянии, наносы снова принимают характер донных и формируют ниже по течению в зависимости от существующих гидравлических условий ленточную гряду, побочень или осередок. Как видно из сказанного, ограничивающие факторы влияют на поведение мезоформ. Этим влиянием, кстати, и определяется различие между лотковыми и натурными мезоформами. Ограничивающее влияние изменчивости гидрологического режима в еще большей степени сказывается на развитии незавершенного меандрирования и пойменной многорукавности. Как мы видим из исследования В. А. Виноградова, для свободного развития излучин ограничивающим фактором могут служить прорывы перешейка вышележащей излучины.

Сказанным, по-видимому, не исчерпываются гидролого-гидравлические и морфологические причины ограничения свободного развития того или иного процесса. Будем надеяться, что это все же привлечет внимание к более глубокому исследованию роли ограничивающих условий.

2.10.2. Обобщенная морфометрическая зависимость

2.10.2.1. Условия получения зависимости $\frac{B}{H}\lambda = f\left(\frac{H}{d}\right)$. Зависимость $\frac{B}{H}\lambda = f(H/d, z)$, изображенная на рис. 2.11, где z — некоторый параметр, характеризующий тип руслового процесса, построена по натурным данным, опубликованным в отечественной и зарубежной литературе и собранным из частично неопубликованного материала собственных наблюдений автора и его коллег, любезно предоставивших эти данные. В подписях к рис. 2.11 перечислены эти данные. При этом, определяя тип руслового процесса, мы руководствовались приведенными в этой главе типизациями руслового процесса.

В том случае, если по данным первоисточника не удавалось уточнить тип меандрирования, то реки с малым коэффициентом извилистости относились нами к ограниченному меандрированию, а с большим коэффициентом извилистости — к свободно меандрирующим рекам.

Выбор определяющих безразмерных комплексов, использо-

ванных нами, был обусловлен тем, что комплексы $\frac{B}{H}\lambda$ и $\frac{H}{d}$ являются распространенными в речной гидравлике критериями. Так, $\frac{B}{H}\lambda$ является критерием плановой гидравлики, а $\frac{H}{d}$ отражает не только относительную гладкость и масштабность явления, но и характеризует степень подвижности донного материала, так как

$$\frac{H}{d} = \frac{Fr_d^2}{Fr^2}, \quad (2.62)$$

где $Fr_d = \frac{v}{\sqrt{gd}}$ — критерий «устойчивости», по Великанову.

Кажущаяся ложная корреляция при использовании параметров, включающих в себя одну и ту же величину H , в действительности отсутствует, так как раскрытие выражения для λ приводит к исключению глубины в критерии $\frac{B}{H}\lambda = \frac{2glB}{v^2}$, однако принято написание критерия в форме $\frac{B}{H}\lambda$.

2.10.2.2. Руслоформирующие условия. Исходя из анализа предшествующих исследований руслового процесса, при построении зависимости, изображенной на рис. 2.11, было принято, что каждому типу руслового процесса соответствуют свои руслоформирующие условия (табл. 2.2).

При построении зависимости на рис. 2.11 мы не всегда могли в точности следовать вышеприведенным соображениям из-за отсутствия в нашем распоряжении длительных рядов наблюдений для необходимого осреднения требуемых характеристик за цикл развития данного типа руслового процесса. Поэтому, пренебрегая отклонениями фактически наблюдаемых характеристик потока и наносов для соответствующих условий от неизвестного нам осредненного значения, мы распорядились этими данными так, как если бы они соответствовали требуемому осреднению. Тем самым на рис. 2.11 присутствует некоторый, как бы запланированный разброс точек.

На рис. 2.11 точки, соответствующие каждому типу руслового процесса, обозначенные условными знаками, разделились на несколько областей. Достаточно четко выделились области ленточногрядового и побочного типа руслового процесса. Следующая за побочным область осередкового процесса имеет несколько размытую границу, а в следующей области разместились точки, соответствующие русловой многорукавности и ограниченному меандрированию. Правый угол графика занят точками, соответствующими свободному и незавершенному меандрированию и пойменной многорукавности.

Рис. 2.11. Критеральная зависимость перехода одних типов руслового процесса в другой.

1 — ленточные гряды, 2 — побочки, 3 — осередки, 4 — ограниченное меандрирование, 5 — русловая многорукавность, 6 — свободное меандрирование, 7 — незавершенное меандрирование, 8 — пойменная многорукавность. Цифры у точек означают номера в списке рек и моделей, данные по которым опубликованы В. И. Антроповским, П. Аккерсом, Г. И. Герговым, З. Д. Коппалани, В. С. Кожевниковым, Н. М. Кулеминой, С. Комуры, Леопольдом-Вольманом, А. Н. Ляпшиным, Мартинцем, И. Л. Розовским, Л. И. Розенбергом, В. В. Ромашкиным, С. И. Пиньковским, Д. Саймонсом, Шеном, Ш. Читале, И. А. Ярославцевым, Н. С. Знаменской и др.

1 — Норт-Форт, 2 — Коси, 3, 4 — Коси, 5 — Натанеби, 6 — Поул-Крик, 7 — Хорс-Крик, 8 — Малая Маджара, 9 — Гета, 10 — Натанеби, 11 — Кларк-Крик, 12 — Уэст Форк, 13 — Булл-Крик, 14 — Бахлановка, 15 — Коттон-Вуд, 16 — Попо Айджин, 17 — Коттон-Вуд-Крик, 18 — Хорс-Крик, 19 — Бахлановка, 20 — Дгамиши, 21 — Кодори, 22 — Селенга, 23 — модель Ярославцева, 24 — Кларк-Форк, 25 — Рок-Крик, 26 — рукав Уотс, 27 — Коттон Вуд, 28 — Бзыбь, 29 — Уинд, 30 — Алдан, 31 — Маджара, 32 — Бивер Крик, 33 — Струма, 34 — Маджара, 35, 36 — Бзыбь, 37 — Бжуджа, 38 — Йеллоустон, 39 — Кодори, 40 — модель Днепр, 41 — Вахш, 42, 43 — модель Аккерса, 44 — Бзыбь, 45 — Моква, 46 — Хорс-Крик, 47, 48 — Хо-

шупсе, 49 — Сандриши, 50 — Бзыбь, 51 — Попо Айджин, 52 — Сенека-Крик, 53 — Маджара, 54 — Чаквисцхали, 55 — Бжуджа, 56 — Чаквисцхали, 57 — Сацисвилла, 58 — Псеузапсе, 59 — Струма межень, 60 — Люзница, 61 — Дгамиши, 62 — Струма, 63 — модель Ярославцева, 64 — Сев. Саскочеван, 65 — Рика, 66—69 — модель Аккерса, 71 — Бивер, 71 — Чорохи, 72 — модель Ярославцева, 73, 74 — Сев. Саскочеван, 75—82 — модель Аккерса, 83 — Банас, 84 — Роноли, 85—88 — модель Аккерса, 89 — Грин, 90 — Липл Санди-Крик, 91 — Супса, 92 — Галидзга, 93 — Лесновска, 94 — Струма, 95 — Бзыбь, 96, 97 — Люзница, 98 — Бзыбь, 99 — Струма, 100 — Бзыбь, 101 — Псеузапсе, 102 — Бзыбь, 103 — Гумиста, 104 — Шаори, 105 — Бзыбь, 106, 107 — Струма, 108 — Сочи, 109 — Сев. Саскочеван, 110 — Лесновска, 111 — Квирилла, 112 — Сефа, 113 — Сев. Саскочеван, 114 — Лесновска, 115 — Псеузапсе, 116 — Квирилла, 117 — Селенга, 118 — Люзница, 119 — Грин, 120 — Люзница, 121 — Грин, 122, 123 — Аджарис-Цхали, 124 — Грин, 125 — Ред Форк, 126 — Чаквис-Цхали, 127 — Люзница, 128 — Лесновска, 129 — Нью-Форк, 130 — Тура, 131, 132 — Аджарис-Цхали, 133 — Люзница, 134 — Аше, 135 — Сефа, 136 — Кодори, 137 — Струма, 138—142 — Струма, 143, 144 — Чорохи, 145 — Люзница, 146 — Н. Тунгуска, 147 — Супса, 148 — Кодори, 149 — Тура, 150 — Тура, Струма, 151 — Супса, 152 — лоток автора, Рома-

шин, 153 — лоток Комуры 13 точек, 154 — лоток Кожевникова, 155 — лоток Коппалани, 156 — Томь, 157—159 — лоток Комуры, 160 — Чусовая, 161 — Яссы, 162 — Флостампур, 163 — Коси, 164 — Кашкадарья, 164а — Амур, 165 — Брамапутра, 166 — Сона, 167 — Ямуна, 168 — Саванна, 169 — Домодор, 170 — Ямуна, 171 — Мпасс, 172 — Сарасвати, 173 — Енисей, 174 — Обь, 175 — Пури, 176 — Уса, 177 — Сев. Плата, 178 — Вапч, 179 — Нарын, 180 — Мутха, 181 — Обь, 182 — Полометь, 183 — Селенга, 184 — Кипри, 185 — Туба, 186 — Инд, 187 — Сырдарья, 188 — Ватрак, 189, 190 — Йеллум, 191 — Сев. Сосьва, 192 — Йеллум, 193 — Тапи, 194 — Бархи, 195 — Гапг, 196 — Орзонг, 197 — Днепр, 198 — Десна, 199 — Москва, 200 — Сатлей, 201 — Рамганг, 202 — Миссисипи, 203 — Мохор, 204 — Енисей, 205 — Волга, 206 — Луга, 207 — Иртыш, 208, 209 — Днепр, 210 — Гогра, 211 — Вахгипраси, 212 — Тапи, 213 — Амударья, 214 — Мохор, 215 — Амударья, 216 — Миссисипи, 217 — Редихала, 218 — Сев. Двина, 219 — Сап (Камбоджа), 220 — Мурум-бидге, 221 — Бенхала, 222 — Колумбия, 223 — Дунай, 224 — Каракумский канал, 225, 226 — Рио-Гранде, 227—229 — Дунай, 230 — Амазонка, 231 — лоток Саймонса 2,5 м, 232 — лоток Саймонса 0,0 м — 7 точек, 233, 234 — то же 3 точки, 235 — Или, 236 — Дон, 237, 238 — сель Алмаатинка.

Руслоформирующие условия русловых процессов

Тип руслового процесса	Руслоформирующий расход	B	$d_{\text{ср}}$	I
Ленточногрядовый	$Q_{\text{макс. многол}}$	Русла в бровках	Русла	Русла—долины
Побочневый	„	То же	„	То же
Осередковый	„	„	„	„
Ограниченное меандрирование и русловая многорукавность	$Q_{\text{ср. многол}}$ (по месячному)	Русла при соответственном расходе воды	„	Русла
Свободное меандрирование	То же	Пояса меандрирования	Русла и поймы	„
Незавершенное меандрирование, пойменная многорукавность	$Q_{\text{ср. многол}}$	Долины	То же	Долины

Примечание. Глубина русла H и скорость потока v определяются для соответствующего руслоформирующего расхода воды.

Если учесть, что использованные для построения графика точки получены для рек разного размера, от маленьких ручьев до самых больших рек, что диапазон данных, по которым получены эти точки, охватывает несколько порядков величин определяющих комплексов $\frac{B}{H}\lambda$ и $\frac{H}{d}$ и что лабораторные данные

по исследованиям руслового процесса, описанным в предыдущих параграфах, попали в соответствующие области, то следует оценить полученную зависимость как обобщающую.

Размещение точек, соответствующих разным русловым процессам в одной области, может означать, что либо в принятых координатах нет принципиальной разницы по выделенному признаку между этими русловыми процессами и требуется некоторый дополнительный признак, либо допущенное отклонение фактических данных от требуемого осредненного значения оказывается ощутимым. В п. 2.10.3 попытаемся показать, что дополнительным признаком разделения точек, соответствующих ограниченному меандрированию и русловой многорукавности, служат граничные унаследованные условия.

Разделение точек, соответствующих свободному незавершенному меандрированию и пойменной многорукавности, действительно существенно зависит от осреднения характеристик за многолетний период. Тот или иной вид меандрирующего русла зависит от повторяемости руслоформирующих условий, соответствующих каждому типу процесса, и может быть предсказан только в сравнительной оценке этих условий за расчетный период времени. Другими словами, для названных типов руслового процесса существенными оказываются гидрологические циклы изменчивости расходов воды за многолетний период времени.

Как мы видели при рассмотрении пойменных процессов, всем рассматриваемым трем типам меандрирования свойственны одни и те же процессы: при свободном меандрировании в некоторые годы наблюдаются такие высокие расходы воды, которые ведут к возникновению транзитных течений и созданию таких элементов рельефа пойм, которые служат признаком свободного меандрирования. В то же время частое повторение высоких расходов подавляет свободное меандрирование путем создания протоков на пойме. Поэтому для разделения названных типов руслового процесса без учета повторяемости расчетных условий, очевидно, обойтись нельзя. Не располагая в настоящее время достаточным количеством требуемых данных для учета руслоформирующих условий этих трех типов, мы вынуждены пока мириться с их расположением в одной области.

Граничные линии, которыми разделяются выше названные области с разными типами руслового процесса, могут быть охарактеризованы некоторым параметром z , различным для

каждой линии. Аналитическое выражение семейства параллельных линий на рис. 2.11 может быть получено в виде

$$\frac{B}{H} \lambda = z \frac{d}{H}, \quad (2.63)$$

где численное значение z определяется из графика.

2.10.2.3. Связь существующих морфометрических критериев и чисел с критерием z . Попробуем показать, что существующие критериальные выражения, предложенные разными исследователями, являются частными случаями критериального числа z .

Известны морфометрические критерии Глушкова—Великанова $\frac{HI}{\alpha} = \text{const}$, Г. В. Железнякова $\Gamma = \frac{Q^2}{H^4 g B}$, К. В. Гришанина $M = \sqrt[4]{\frac{1}{\Gamma}} = \text{const}$, И. Ф. Карасева $S = \frac{B}{H} \sqrt{\lambda}$.

Тогда, учитывая (2.63), получим

$$z = \frac{2HI B^2}{d H^2} M^4 = \frac{\sqrt{\lambda} H}{d} S = \frac{2HI}{d} \frac{1}{\Gamma} \frac{B^2}{H^2}. \quad (2.64)$$

Зависимость (2.64) показывает связь числа z с критерием Глушкова и числом Гришанина $M = \frac{1}{\sqrt[4]{\Gamma}}$. Из (2.64) следует,

что z более общий критерий, который учитывает не только M , но и критерий устойчивости Глушкова, принимаемый Гришаниным для рассматриваемых им условий устойчивых плёсовых ложин равнинных рек за постоянное число.

Из (2.64) также видно, что критерий S не учитывает относительной гладкости русла H/d , т. е. является также менее общим критерием, чем z .

2.10.2.4. Связь морфометрического критерия с определяющими факторами руслового процесса. Попробуем выразить число z через некоторые общие гидрологические характеристики.

Рассмотрим выражение транспортирующей способности потока S_T , например, по А. В. Караушеву [22],

$$S_T = 150 \frac{N}{H} v^2 \Gamma_*, \quad (2.65)$$

где $N = \frac{M' C}{g}$, $\Gamma_* = f\left(C, \frac{w}{v}\right)$, $M' = \frac{0.7C + 6}{g} = \frac{f(C)}{g}$, C — коэффициент Шези.

После подстановки соответствующих чисел и функций в (2.65) получим

$$S_T = \frac{150 f(C) v^2}{g^2 H f\left(\frac{v}{w}\right)}. \quad (2.66)$$

Если принять $f(C) = \alpha C^2$ и $f\left(\frac{v}{w}\right) = \beta \frac{w^2}{v^2}$ и учесть, что, по В. В. Романовскому [46],

$$w^2 = x^2 \left(\frac{\gamma_T - \gamma}{\gamma} \right) g d, \quad (2.67)$$

то, принимая $x = \text{const}$, получим для песка

$$S_T = \frac{150 \alpha C^2 F r^2 v^2 \gamma}{\beta x^2 g^2 d (\gamma_T - \gamma)}. \quad (2.68)$$

Объединяя (2.68) и (2.63) и все коэффициенты в один коэффициент ξ , найдем, что

$$z = 2\xi \frac{B}{d} \frac{Q}{Q_T} F r^2 F r_d^2 = \eta \frac{B}{d} \frac{H}{d} \frac{Q}{Q_T} F r^4, \quad (2.69)$$

где

$$\eta = 2\xi = \frac{300 \alpha \gamma}{\beta (\gamma_T - \gamma) x^2}. \quad (2.70)$$

Из выражения (2.69) видно, что морфометрическое критериальное число z пропорционально основным определяющим процесс факторам — водности Q и $F r$, расходу наносов Q_T и ограничивающим факторам (B/d и критерию устойчивости $F r_d$).

2.10.3. Усовершенствование типизации руслового процесса

2.10.3.1. Переход от грядовых типов процесса к ограниченному меандрированию и русловой многорукавности. Меандрирование зарождается в прямолинейном русле. Началу меандрирования предшествует образование в русле перекошенных баров (побочней). Как правило, возникновение меандрирования большинство исследователей отождествляют с появлением побочней. А потому критерий появления побочней рассматривают как критерий меандрирования.

Как было показано при описании экспериментального исследования руслового процесса за признак начала меандрирования Аккерс принял рост побочней в ширину, а условия, соответствующие образованию побочней в русле, определил критическим расходом донных наносов, ниже которого побочни не возникают.

Н. С. Шарашкина наблюдала три стадии развития руслового процесса.

Первая стадия была отнесена нами к побочневому процессу, вторая, аналогичная опытам Аккерса, — к ограниченному меандрированию, а третья — к русловым процессам, происходящим на унаследованных границах в результате сезонного колебания расходов и уровней.

Опыты Шарашкиной, так же как опыты Аккерса, позволили установить, что движение побочней является активной формой

транспорта наносов, а возникновение ограниченного меандрирования, по Шарашкиной, является «полуактивной» зоной транспорта наносов, а по Аккерсу — формой замедленного транспорта наносов в виде баров.

О. В. Андреев и И. А. Ярославцев пришли к выводу, что побочни образуются только в паводки, причем в зависимости от водности в русле могут образоваться побочни разных порядков. Меженный поток, по мнению этих авторов, имеет тенденцию к меандрированию, причем «кривизна потока зависит от степени сжатия его структурными образованиями твердой фазы, которые появляются в результате прохода паводков предыдущих лет». Возникновение многорукавного русла блуждающего типа Андреев и Ярославцев связывают со значительным нарушением подачи наносов на модель и изменением высоты паводков, приводящих к отторжению побочней.

Заметим, что подобное явление при постоянном жидком расходе воды, но при прерывистой подаче наносов (по мере оголения начального участка) наблюдалось и на модели Розовского—Базилевича. Отторжение побочней наблюдалось в опытах Шарашкиной, начиная с момента пропуска жидкого и твердого стока (по гидрографам). Русло при этом так же, как в опытах Ярославцева, имело вид русловой многорукавности. В то же время Леопольд и Вольман пришли к выводу, что русловая многорукавность проявляется в результате дробления русла осередками на рукава: после возникновения одиночного осередка русло разделяется на два рукава, затем после возникновения в каждом рукаве новых гряд (осередков) возникают новые рукава и идет дальнейшее дробление потока.

Такой же вывод можно сделать и из экспериментов Аккерса и Розовского—Базилевича применительно к начальному участку русла: разработке рукавов всегда предшествовало образование бара (осередка).

В свете сказанного грядовые типы процесса могут рассматриваться как активные, а русловая многорукавность — как пассивная форма, развивающаяся на унаследованных граничных условиях. Сопоставление русловых форм с формами, наблюдающимися в лотках, позволяет расположить грядовые типы процесса по возрастанию транспортирующей способности в том порядке, в каком происходит смена форм гряд при увеличении расхода донных наносов. Известно, что с увеличением числа Фруда при данных крупности наносов и размерах потока расход донных наносов увеличивается. При этом происходит смена форм гряд в следующей последовательности: рифеля, перекошенные бары, двухмерные бары (при смыве гряд), гладкая фаза и антидюны.

Если за осередковый тип руслового процесса принять образование в русле крупномасштабных рифелей, а плоские бары смыва отнести к ленточногрядовому типу руслового процесса, то

увеличению транспортирующей способности потока, взятого на единицу ширины, будет отвечать следующий порядок расположения типов руслового процесса: осередковый, побочный, ленточно-грядовый и реки с блуждающим руслом, что и отражено в левой части (активные процессы) рис. 2.12.

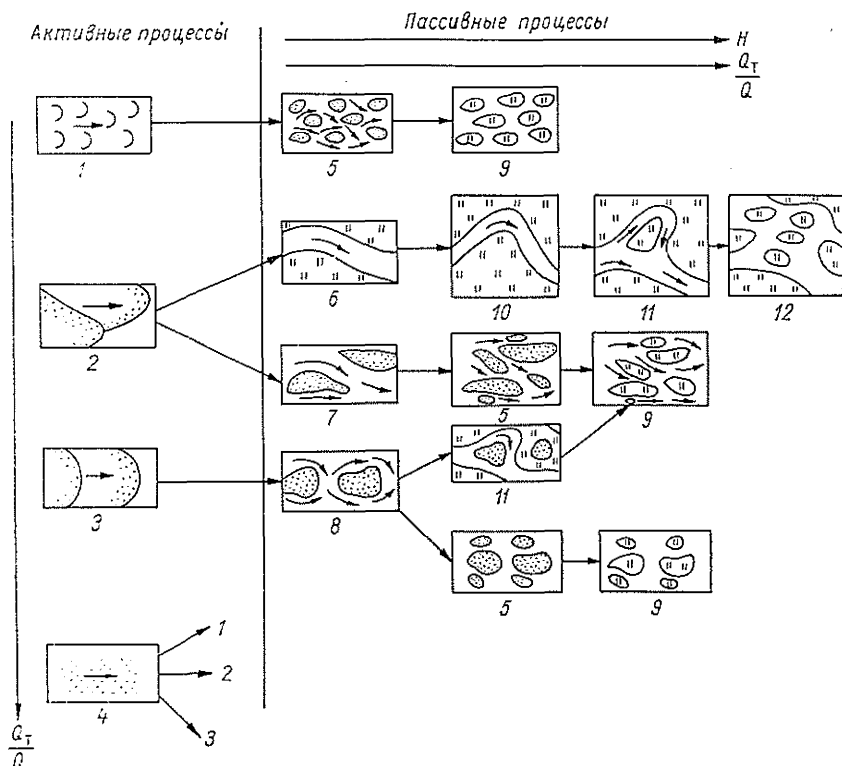


Рис. 2.12. Типизация руслового процесса с учетом основных действующих факторов и условий перехода одних типов руслового процесса в другие.

1 — осередковый тип, 2 — побочный, 3 — ленточно-грядовый, 4 — блуждающие реки, 5 — русловая многорукавность, 6 — ограниченное меандрирование, 7 — отторжение побочной (как переход к русловой многорукавности), 8 — бифуркация, 9 — пойменная многорукавность, происшедшая из русловой, 10 — свободное меандрирование, 11 — незавершенное меандрирование, 12 — пойменная многорукавность.

Такому расположению типов руслового процесса соответствует и последовательность расположения грядовых типов руслового процесса на рис. 2.12. Из выражения 2.69, отражающего связь параметра z с выражением для транспортирующей способности, также следует, что уменьшению z соответствует увеличение расхода наносов.

Сделанный выше вывод об активности русловых процессов грядового типа позволяет всю левую часть рис. 2.12 считать

соответствующей активным процессам, формирующим основное русло, на базе которого в дальнейшем могут развиваться качественно новые, но названные нами, в отличие от грядовых, пассивные процессы.

Поскольку активное смещение грядовых русловых форм характерно только для периода высокого половодья, рассмотрим, какие изменения могут произойти с грядовыми типами руслового процесса при уменьшении расходов воды и соответственно при уменьшении глубин.

Для ленточногрядового типа процесса, характеризваемого смещением плоских гряд, имеющих сравнительно равномерный по высоте гребень, с некоторым повышением в центральной части, уменьшение глубины потока приведет к образованию единичного осередка и двух равноценных рукавов с одинаковым углом отклонения от первоначальной оси однорукавного русла (условные знаки 5—8 на рис. 2.12), как и было показано Леопольдом и Вольманом.

При побочном процессе заметное уменьшение глубины приведет к плановой синусоидальной извилистости нового потока. Если же произойдет незначительное уменьшение глубин, то произойдет отторжение побочной, и образование русловой многорукавности, как это было показано Андреевым и Ярославцевым и Розовским. При осередковом типе процесса произойдет образование большого числа русловых протоков — рукавов, обтекающих повышенные гребневые участки осередков, т. е. возникнет русловая многорукавность.

В принципе такая картина наблюдается для названных типов процесса ежегодно при смене паводочного режима меженью. Если гидрологический режим реки таков, что каждый новый паводок или половодье приводят к активному смещению мезоформ или хотя бы к косвенному их перемещению, когда мезоформы за период высокой межени или за ряд низких половодий не теряют своей возможности активно перемещаться, т. е. не подвергаются быстрому зарастанию растительностью, то каждый из названных активных процессов сохраняется. Если же периоды активного смещения редки или в результате регулирования наблюдается однонаправленное уменьшение глубин потока, то может произойти смена процесса. В первом случае ленточногрядовый тип сменится дворукавностью (бифуркацией), во втором — побочный процесс заменяется либо ограниченным меандрированием, либо русловой многорукавностью, а в третьем — осередковый переходит в русловую многорукавность.

Таким образом, условные знаки 5—8 на рис. 2.12 должны иллюстрировать изменения, происходящие с грядовыми типами процесса при уменьшении глубины потока (а значит водности). Гидравлические характеристики потока в этих случаях не являются органически связанными с унаследованными русловыми

формами, они взаимосвязаны со вторичными формами или даже с микроформами. Это обстоятельство объединяет рассмотренные типы руслового процесса, вследствие чего в выделенных координатах графика на рис. 2.11 их разделение оказывается невозможным. Ограниченное меандрирование, двурукавность и русловая многорукавность могли бы быть разделены по признаку унаследованных граничных условий, которые не являются гидравлическими характеристиками, а потому и не отразились на размещении точек в области 4, 5 рис. 2.11.

Вследствие того что активные и пассивные процессы (рис. 2.12) развиваются в одних и тех же морфологических границах, но соответствуют лишь разным руслоформирующим условиям, различить побочный процесс от ограниченного меандрирования, осередковый тип от русловой многорукавности оказывается не всегда возможным.

Количественным критерием различия активных и пассивных процессов могла бы служить скорость сползания русловых форм, которая, как мы видели по данным Шарашкиной и Аккерса, различается для этих стадий на порядок.

2.10.3.2. Развитие свободного меандрирования. Процессы, характерные для прямолинейных русел и изображенные на рис. 2.12 (условные знаки 1—4), еще не несут в себе обязательности возникновения меандрирования. Если движение побочной наблюдается при таких условиях, которые неотвратимо приводят к периодическому сползанию мезоформ, то признаки меандрирования, проявляющиеся на спаде паводков и в межень, подавляются. Для того чтобы могло развиваться меандрирование, необходимо либо однонаправленное изменение гидравлических условий в многолетнем разрезе, либо такой ход гидрологических характеристик, когда периоды активного смещения побочной слишком редки. Отсутствие ограничивающего влияния коренных берегов долины приводит к дальнейшему развитию свободного меандрирования (рис. 2.12, условный знак 10). Появившаяся начальная извилистость русла подвержена природной изменчивости гидрологических характеристик, которая обуславливает изменчивость расхода воды и донных наносов от года к году.

Как было показано при экспериментальных исследованиях Прус-Часинского, Великановой, Йена и других, изменение транспорта донных наносов влияет на расположение пляжа у выпуклого берега и приводит к изменению места размыва вогнутого берега, а следовательно, может привести к такому размыву излучины у ее вершины, который означает переход к свободному меандрированию. Транспортирующая способность потока в русле для свободного меандрирования по сравнению с ограниченным уменьшается вследствие уменьшения уклона свободной поверхности из-за удлинения русла.

2.10.3.3. Переход от свободного меандрирования к незавершенному. Отличие незавершенного меандрирования от свободного, как это было установлено гидроморфологической теорией, состоит в том, что излучина, не достигнув своего полного развития, спрямляется образовавшимся протоком (рис. 2.12). Рассмотрим, какие условия должны способствовать такому явлению.

Исследования, проведенные на моделях меандрирующих рек с воспроизведением рельефа пойм, как было показано выше, позволили установить, что рельеф пойменных массивов обусловлен гидравлическим режимом руслового потока. Как было показано в разделе о поймах, на них наблюдаются участки опасного направления течений, т. е. имеются такие осевые линии транзитных течений, где формируются наибольшие скорости, могущие привести к деформации пойм. Эти направления определяются расположением главных прорыв, которые в свою очередь связаны с размещением русловых форм в русле. Поэтому можно считать, что морфология русла определяет направление возможного спрямления излучины. Образуется ли спрямляющий рукав или нет, будет зависеть только от того, какие условия в данной реке наблюдаются чаще — приводящие к размыву вогнутых берегов, а значит к развитию свободного меандрирования, или к разработке протока, а значит к незавершенному меандрированию. Разрыв вогнутого берега, как было показано в многочисленных исследованиях, обобщенных Н. Н. Федоровым в монографии [47], наиболее четко проявляется тогда, когда поток находится в бровках берегов. Этот вывод полностью согласуется с данными Андреева—Ярославцева. Разрыв протока может происходить только в том случае, когда по опасному направлению формируется транзитное течение, т. е. во время достаточно высокого половодья. Далеко не каждое затопление пойм приводит к формированию транзитных течений. Поэтому условия, вызывающие свободное меандрирование, наблюдаются чаще, чем условия, приводящие к незавершенному меандрированию. Однако темпы развития этих процессов неодинаковы. Период времени, за который происходит полное завершение цикла свободного меандрирования, измеряется десятками, а иногда и сотнями лет. Время, за которое происходит образование спрямляющего рукава, исчисляется годами и редко десятилетиями (т. е. на порядок меньше). Это объясняется тем, что разрыв вогнутого берега происходит под влиянием меньших скоростей течения, чем разрыв спрямляющего протока. Можно считать, что разрыв вогнутого берега определяется поперечными составляющими скорости течения, а разрыв протока — продольными составляющими, что способствует разным темпам этих деформаций.

Спрямляющий поток не образуется за одно половодье. В зависимости от повторяемости половодий, при которых наблюда-

ется транзитное течение по опасному направлению на пойме, и продолжительности существования этих течений темпы размыва спрямления могут меняться.

Исходя из сказанного, можно попытаться получить соотношение, позволяющее грубо оценить для конкретных условий, когда будет развиваться свободное, а когда незавершенное меандрирование. Для этого примем, что: 1) поперечные составляющие скорости на порядок меньше продольных русловых скоростей течения (что согласуется с данными Тобеса—Суки и др.); 2) для завершения цикла свободного меандрирования, определяемого временем $T_{см}$, необходимо переработать участок поймы шириной пояса меандрирования B и длиной, равной шагу излучины L ; 3) для проработки протока, который имел бы сечение, равное сечению главного русла, требуется время $T_{нм}$, за которое необходимо разработать участок той же поймы, но шириной, равной ширине русла b . Тогда можно определить время, необходимое на разработку протока,

$$T_{нм} = \frac{bhL}{v_p H_{п} L'}, \quad (2.71)$$

где h — высота поймы; $H_{п}$ — осредненная за весь цикл глубина протока, которая в первом приближении принимается равной $0,5h$, исходя из назначения предельных глубин вреза протока: до его образования $H=0$, при завершении цикла $H_{п}=h$, $L'=L$,

Время полного цикла свободного меандрирования может быть определено по формуле

$$T_{см} = \frac{BhL}{0,1v_p H_p \delta S}, \quad (2.72)$$

где H_p — глубина русла, осредненная за период цикла развития меандра с учетом того, что меандрирование происходит при меженных расходах вплоть до расхода в бровках берегов. Для грубой оценки можно принять $H_p=0,5h$, хотя H_p должно быть несколько меньше, чем эта величина; δS — длина участка излучины, на котором одновременно происходит размыв берега. Эта длина практически близка к длине плёсовой ложины, и для грубой оценки может быть принята равной $0,25L$.

Возьмем отношение времен $T_{нм}$ и $T_{см}$ и сделаем необходимые подстановки с учетом сказанного

$$\frac{T_{нм}}{T_{см}} = 0,025 \frac{b}{B}. \quad (2.73)$$

Конечно, время полного цикла как одного, так и другого типа меандрирования складывается из дискретных времен, соответствующих гидрологическим условиям, являющимся руслоформирующими для данного типа процесса.

При незавершенном меандрировании в стадии развития и функционирования спрямляющего протока транспортирующая

способность больше, чем при свободном, так как уклон в протоке больше, чем в излучине.

2.10.3.4. Условия перехода к пойменной многорукавности. В зависимости от повторяемости расходов воды, приводящих к формированию нескольких струй транзитного течения, на пойме могут развиваться не одно, а несколько спрямлений, совпадающих с направлением транзитных струй, соединяющих не одну пару, а несколько пар прорв, имеющих разные отметки гребня. Как и было показано в разделе о поймах, это приведет к появлению пойменной многорукавности.

Транспортирующая способность потока при пойменной многорукавности по сравнению с незавершенным меандрированием возрастает, поскольку пойменной многорукавности соответствуют более высокие уровни затопления при больших расходах воды, а значит и большие скорости течения.

Можно представить себе и другие пути возникновения пойменной многорукавности. Если представить, что для случая дворукавности в каждом из рукавов будут перемещаться ленточные гряды, то при снижении уровней произойдет дальнейшее парное дробление рукавов обсохшими частями этих гряд — осередками. Таким путем будет осуществляться переход к русловой многорукавности, которая затем может превратиться в пойменную путем зарастания островов и отложения наилка. Предлагаемое графическое изображение типизации руслового процесса позволяет увязать ее с определяющими факторами (транспортом наносов, водностью и ограничивающими условиями), объяснить происхождение меандрирования его связью с грядовыми типами руслового процесса и определить сходство и различие в транспорте донных наносов и развитии русловых процессов в руслах и лабораториях. Расположение типов руслового процесса, представленное на рис. 2.12, также способствует объяснению некоторых других явлений в области руслового процесса.

Так, оказывается вполне объяснимым одновременное существование на одном участке разных типов руслового процесса. Это явление аналогично одновременному существованию в русле гряд разных порядков: наиболее крупные бары с масштабом первого порядка остаются в русле унаследованными от наиболее редких паводков, на них размещаются бары, вызванные более часто повторяющимися паводками, и так далее, вплоть до самых малых микроформ, размеры которых определяются местными мгновенными характеристиками турбулентного потока. Такая многоступенчатая масштабность форм связана и со своей степенью осреднения определяющих ее характеристик. Наиболее крупные русловые формы (макроформы) унаследованы от наиболее редких паводков и для связи этих форм с гидравлическими характеристиками потока необходимо их осреднение за период полного цикла их развития. Поскольку условия, приводящие к развитию макроформ, наблюдаются не непрерывно,

а дискретно в многолетнем периоде времени или дискретно за годовой период времени, то осреднение определяющих характеристик должно проводиться за время активного развития той или иной макроформы.

В периоды времени, когда эти условия не создаются, наблюдается развитие либо макроформ того же типа, но меньшего масштаба в пределах унаследованных границ, созданных наиболее крупными макроформами, либо происходит образование макроформ другого типа, но также на фоне унаследованных границ. Период осреднения гидравлических характеристик, определяющих эти вторичные макроформы или вторичные пассивные процессы, уже значительно меньше, чем для главной макроформы. Поэтому в отдельном рукаве под воздействием местных гидравлических условий, вызванных общим ходом изменчивости гидрологических характеристик, будут образовываться мезоформы, развивающиеся по своим местным циклам, существенно отличающимся от главного цикла развития всего участка поймы и излучины, где рассматриваемый рукав является формирующимся протоком. В свою очередь для развития на побочных этого протока вторичных гряд (вторичных побочней, а также крупно- и мелкомасштабных рифелей) весь цикл развития излучины оказывает слабое влияние из-за большой разницы в величине времени развития главного руслового процесса (незавершенного меандрирования) и времени развития вторичных русловых форм. Конечно, в период активной перестройки главного руслового процесса вторичные процессы подавляются. Но в момент их развития главный процесс находится в состоянии временного прекращения своего развития. Этим и можно объяснить одновременное существование разных типов руслового процесса на одном участке. Отсюда вытекает следствие: необходимо научиться определять время осреднения каждого типа руслового процесса.

2.10.4. Заключение

Зависимость $\frac{B}{H} \lambda = f\left(\frac{H}{d}, z\right)$, а также ее аналитическое выражение отражают основные закономерности развития руслового процесса, определенные при экспериментальном их исследовании. Они могут применяться для естественных рек и рек с регулируемым режимом в широком диапазоне величин $\frac{B}{H} \lambda$ и $\frac{H}{d}$.

Предлагаемое графическое изображение типизации руслового процесса позволяет не только увязать последовательность смены грядовых типов руслового процесса с изменением транспортирующей способности, но также открывает пути для более

широкой интерпретации связи типов процесса с изменением водности и ограничивающих факторов.

Зависимость (2.69) может быть использована: а) для прогноза и расчета русловых процессов при изменении гидравлических характеристик потока при многолетнем их изменении, б) при регулировании рек, их обваловании, дноуглублений и т. п., в) при расчете русловых процессов отдельных рукавов русла или его участков для конкретных гидравлических ситуаций, г) для расчета гидравлических характеристик потока при известном русловом процессе и заданных морфометрических его характеристиках, д) для выбора сечения каналов при переброске рек с учетом требуемого типа процесса.

3. МОДЕЛИРОВАНИЕ РУСЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ

3.1. Общие соображения

В настоящее время термин «моделирование» является одним из наиболее распространенных терминов в науке. Под этим термином понимают и создание математических моделей явления, и создание физических моделей. В настоящей главе мы будем рассматривать вопросы, связанные только с физическим моделированием. Философской основой моделирования является способность моделей отображать исследуемое явление. Физическое моделирование отличается от научного эксперимента тем, что на основе теоретических предпосылок модель рассчитывается по определенным правилам. Далее, исследуемое явление воспроизводится на модели, измеряется и изучается. Необходимым элементом моделирования также является толкование модельного явления и количественный пересчет модельных данных на натуральный конкретный объект.

По самой идее моделирования модель должна являться схематизацией прототипа и являться подобной тем его сторонам, которые изучаются посредством модели. Следует также подчеркнуть, что хотя модель создается на основании теоретических предпосылок, все же процессы, протекающие на модели, подчинены физическим объективным законам и в этом смысле не зависят от экспериментатора. Влияние последнего на результат моделирования проявляется главным образом в расчете модели и толковании полученных результатов, а также в пересчете их на натурные условия.

Целью моделирования следует считать воспроизведение конкретных изучаемых натуральных процессов в отличном от природы масштабе, удобном для обозрения и измерения необходимых искоемых характеристик, не затушеванных второстепенными процессами и явлениями и дающем выигрыш во времени протекаемых процессов.

3.2. Теория подобия как основа моделирования

Теоретической основой моделирования является теория подобия, из которой следует, что те явления подобны, которые описываются тождественными уравнениями.

Уравнения оказываются тождественными тогда, когда коэффициенты у сходных членов уравнений, записываемых для модельных и натуральных явлений, одинаковы. Коэффициенты при разных членах уравнения, составленные обычно из определяющих явление параметров, являются таким образом критериями подобия.

Движение жидкости, как известно, описывается уравнениями Навье—Стокса

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = gI + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \nabla^2 u. \quad (3.1)$$

Поскольку для выведения критериев подобия достаточно одного уравнения в системе уравнений Навье—Стокса, ограничимся уравнением (3.1) для оси x . Обычно для получения коэффициентов перед членами уравнения (3.1) последнее нормируется путем замены переменных на новую переменную и некоторый постоянный множитель, например $u = u_0 u^*$, $x = x_0 x^*$, $p = p_0 p^*$ и т. д. Тогда, вынося постоянные за знак дифференциала и деля все члены на u_0^2/x_0 , получают уравнение, тождественное уравнению (3.1), записанное с коэффициентами, представляющими собой известные в гидравлике критерии подобия

$$\begin{aligned} \frac{x_0}{u_0^2} \frac{\partial u^*}{\partial t^*} + \left(u^* \frac{\partial u^*}{\partial x^*} + v^* \frac{\partial u^*}{\partial y^*} + w^* \frac{\partial u^*}{\partial z^*} \right) = \\ = \frac{I g x_0}{u_0^2} + \frac{p_0}{\rho u_0^2} \frac{\partial p^*}{\partial x^*} + \frac{\nu}{x_0 u_0} \nabla^2 u^*, \end{aligned} \quad (3.2)$$

где

$$\frac{x_0}{u_0^2 t_0} = \frac{1}{\text{Ho}}; \quad \frac{I g x_0}{u_0^2} = \frac{I}{\text{Fr}^2}; \quad \frac{p_0}{\rho u_0^2} = \text{Eu}; \quad \frac{\nu}{x_0 u_0} = \frac{1}{\text{Re}}. \quad (3.3)$$

Поскольку условием подобия является равенство коэффициентов при соответствующих членах уравнения (3.2), записанного для модели (с индексом «м») и натуре (с индексом «н»), получают следующее критериальное выражение:

$$\frac{(\text{Ho})_m}{(\text{Ho})_n} = \frac{I_m}{I_n} \frac{\text{Fr}_n^2}{\text{Fr}_m^2} = \frac{(\text{Eu})_m}{(\text{Eu})_n} = \frac{(\text{Re})_m}{(\text{Re})_n} = 1. \quad (3.4)$$

В выражении (3.4) часто принимают $I_m = I_n$, и тогда оперируют только с требованием удовлетворения следующих условий:

$$\text{Ho} = \text{idem}; \quad \text{Fr} = \text{idem}; \quad \text{Eu} = \text{idem}; \quad \text{Re} = \text{idem}. \quad (3.5)$$

Однако удовлетворение всех вышеприведенных условий оказывается возможным только в том случае, если модель равна натуре, т. е. из (3.5) следует, что полное подобие невозможно. В этом можно убедиться на примере установления масштаба скорости по критерию Фруда и Рейнольдса. Для неискаженного

моделирования, для которого и было получено условие (3.4), запишем масштаб скорости α_v , по Фрудру и Рейнольдсу,

$$\alpha_v = \sqrt{\alpha_L} = \frac{1}{\alpha_L}, \quad (3.6)$$

что справедливо только при $\alpha_L = 1$, т. е. тогда, когда масштаб модели равен масштабу природы, что противоречит самой идее моделирования.

3.3. Противоречия в области моделирования

Полученное следствие (3.6) из условия (3.5) до настоящего времени расценивалось как невозможность получения полного подобия на моделях. Отсюда также делался вывод о том, что с увеличением масштаба модели α_L мы приближаемся к искомому подобию. Следствием этого вывода явилось стремление многих экспериментаторов строить гигантские модели. Это стремление, как нам кажется, также противоречит самой идее моделирования и ведет к неоправданным затратам.

Из полученного выражения (3.6) можно сделать и другой вывод. Если критериальное условие (3.5) ведет к парадоксальному тривиальному решению (3.6), то невозможность соблюдения условия (3.5) для неискаженных моделей может означать, что неискаженных потоков в природе не бывает и условия (3.5) и (3.6) получены для несуществующих процессов.

Как мы знаем из работ М. А. Великанова в области моделирования, а также работ Н. А. Ржаницына и Бленча, натурные реки малых размеров могут рассматриваться как модели крупных рек. М. А. Великанов [6] на III Всесоюзном гидрологическом съезде отметил, что «геометрическое подобие границ потока отнюдь не всегда влечет за собой подобие скоростных полей», а также, что «геометрическое подобие форм русла в природе вообще отсутствует, например, отношение ширины русла к его глубине различно у рек разных размеров и зависит как от водоносности и уклона, так и от размера наносов. Поэтому нелогично требовать, чтобы лабораторная микрорека была геометрически подобна своей натуре». Заметим, что отношение α_H/α_B — есть искажение вертикального масштаба по отношению к горизонтальному, кратко именуемое в практике моделирования «искажением масштабов». Обращаясь к цитате Великанова, видим, что в ней, по существу, сформулирован закон искажения масштабов натуральных потоков и высказана мысль о необходимости использования этого закона при моделировании. Н. А. Ржаницын [44] не ограничился утверждением о существовании этого закона. Полученные им нелинейные зависимости изменения отношения H/B от порядка (размера) рек, а также зависимости

изменения уклона свободной поверхности и диаметра донных отложений и других морфометрических характеристик являются прямым опровержением негласно принятого постулата об отсутствии искажения в натуральных потоках, следствием чего и является условие (3.5).

В практике моделирования известен факт существования так называемого «масштабного эффекта», проявляющегося при создании моделей разного масштаба одного и того же натурального объекта. Измеренные характеристики на моделях, построенных по одним и тем же теоретическим предпосылкам, и пересчитанные по общему правилу пересчета приводят к разному результату, который оказывается зависимым от абсолютных размеров модели. Поскольку модель при ее функционировании подчинена объективным физическим законам, постольку проявление масштабного эффекта следует рассматривать как проявление физического закона искажения масштабов.

Практика моделирования изобилует фактами, подтверждающими существование этого закона и опровергающими условие (3.5).

Если принятие условия (3.5), в котором уже заключен парадокс, выражающийся в невозможности создания моделей, ведет к вторичным противоречиям, то это может только означать неправомерность этого условия применительно к изучаемым процессам. Таким широко известным противоречием является неподвижность наносов на моделях, рассчитанных по условию (3.5), тогда как наносы прототипа перемещаются и их перемещение является предметом исследования.

Практика моделирования нашла многие обходные пути разрешения названного противоречия, но при этом экспериментаторы часто сокрушались о том, что, заставляя наносы двигаться на модели, они нарушают законы подобия.

Другим известным противоречием в области моделирования русловых процессов является вытекающее из (3.5) требование соблюдения одинаковых масштабов глубины и крупности частиц. Поскольку в равнинных реках крупность донных наносов часто определяется долями миллиметра, уменьшение частиц во столько же раз, во сколько уменьшены плановые размеры модели и его глубина оказывается практически невозможным. В то же время известно, что уменьшение размеров реки с одним и тем же русловым процессом совсем не влечет за собой уменьшение диаметра частиц в том же масштабе, в котором уменьшены основные размеры одной реки по отношению к другой.

Экспериментаторам хорошо известны факты изменения самим модельным потоком уклона дна и свободной поверхности по сравнению с требуемым по условию (3.5). Все это свидетельствует о существовании в природе не учитываемого настоящей практикой моделирования объективного закона искажения масштабов. Действие этого закона проявляется и при моделирова-

нии на жестких моделях, хотя, за исключением упомянутого масштабного эффекта, на жестких моделях противоречия условия (3.5) проявляются не так четко.

Известно, например, что при создании жестких моделей больших участков рек при расчете их по условию $Fg=idem$ тарировка модели требует большого искусства. Установление на модели необходимого уровня режима может быть достигнуто только при размещении на модели грубых элементов шероховатости, достаточно густо покрывающих ее бетонную поверхность. При этом происходит стеснение живого сечения модельного потока, и действительная глубина потока существенно отличается от расчетной, по Фруду, что может означать лишь нарушение условия (3.5). Однако мы продолжаем упорно считать, что динамическое подобие соблюдено, а без этого нарушения не было бы необходимого энергетического подобия и подобия скоростей.

Экспериментаторам хорошо известно также, что с изменением числа Фруда на модели меняется кривизна линий токов, изменяются длины и площади водоворотных зон, которые часто являются искомыми. Из этого делается вывод о том, что нарушение условия равенства чисел Фруда недопустимо, так как в противном случае будет допущена ошибка при пересчете модельных данных на натуру. В то же время известно, что отрывное течение также подвержено и масштабному эффекту, и в натуре возникает при меньших числах Фруда, чем на модели. Однако недостаточная изученность этого вопроса в предложенной постановке не позволяет этому противоречию проявиться столь же четко, как это следует из опыта размываемых моделей.

В этом смысле представляют чрезвычайный интерес результаты исследования Харрисона и Мелема [76] на модели излучины Померой р. Миссури. Не полагаясь на выбор условий моделирования по одному из методов, основанных на условии (3.5), Харрисон и Мелема решили получить эти масштабы моделирования путем подбора. Задавая на размываемой модели с жесткими стенками разным сочетанием глубины и скорости, эти авторы за критерий подобия приняли качественное подобие течений и деформаций исследуемой излучины. Результаты такого анализа модельных условий представлены на рис. 3.1. Здесь выделены три зоны: одна, где наблюдалось качественное подобие (область 1 на рис. 3.1), другая, где этого подобия заведомо не было (область 3), и третья (область 2), где определить, есть ли подобие, было трудно. На этом же графике нанесена кривая 4, отвечающая условию $Fg=idem$. Как видно на рис. 3.1, эта кривая не попадает в область подобия явления.

Все сказанное свидетельствует о том, что искомое подобие потоков следует рассматривать как некоторое энергетическое их подобие, отражающее закон искажения масштабов и геометрических размеров потоков и действующих сил. Сказанное не оз-

начает, что практика моделирования шла неверным путем. Для решения необходимых задач экспериментаторам (да и теоретикам тоже) приходилось находить обходные пути, которые, не отвергая принятых принципов, на самом деле тем или иным способом отражали существующий в природе закон искажения. В арсенале экспериментаторов появилась и теория автомодель-

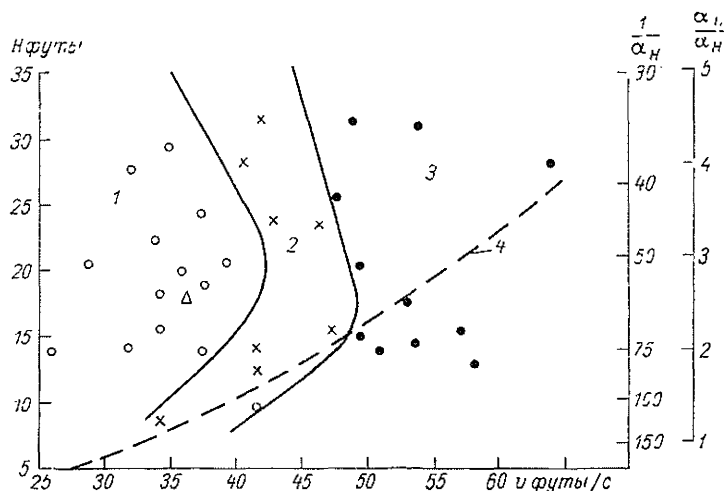


Рис. 3.1. Исследование масштабов скорости и глубины на модели р. Миссури, по Харрисону—Мелема.

1 — подобие течений и деформаций, 2 — промежуточная область, 3 — область качественного различия течений и деформаций, 4 — кривая Fr_{idem} .

ности, по Рейнольдсу (а затем и по Фруду), и способы форсировки расходов, и заменители песчаных наносов, и «натуральное моделирование», и учет «масштабного эффекта», и многое другое.

Попытаемся кратко систематизировать существующие в настоящее время методы расчета размываемых моделей. При этом рассмотрим идейную сторону существующих методов, отсылая заинтересованного читателя к первоисточнику, где он мог бы ознакомиться с рекомендуемой каждым автором схемой расчета.

3.4. Систематизация существующих методов моделирования русловых процессов

3.4.1. Общие соображения

В случае моделирования потоков с размываемыми границами критериев подобия, полученных из уравнений движения (3.5), оказывается недостаточно. Отсутствие соответствующих

теоретических выражений для транспорта наносов приводит к необходимости включения в общую систему уравнений дополнительных условий, описывающих транспорт наносов и деформаций русла. В качестве одного из теоретических уравнений используется обычно уравнение баланса, куда входят величина твердого расхода q_T , определяемая разными авторами по разным эмпирическим формулам. Отсутствие теоретических критериев подобия для размываемого дна приводит к использованию различного вида критериев подвижности наносов $\left(\frac{v}{v_0}, \frac{v_*}{w}, \frac{v}{w}, \frac{\tau_0}{\tau_c}, \frac{HI}{d}, Re_{*d} \text{ и др.} \right)$.

Принятие условия (3.5), как было показано выше, приводит к неподвижности песка на модели. Применение же различных заменителей (широко используемое в практике моделирования) приводит к различной подвижности разного материала, что делает неопределенным количественный пересчет модельных данных в натуру.

3.4.2. Сходство и различие существующих методов моделирования на размываемых моделях

3.4.2.1. Среди существующих методов можно выделить два различных подхода к расчету размываемых моделей: по подобию плановых деформаций русла и по подобию транспорта наносов и гидравлических сопротивлений русла. Первый подход основан на использовании морфометрических зависимостей для устойчивого русла или «режимной теории», второй подход — на использовании различных формул расхода наносов и зависимостей для q_T и λ .

К первой группе можно отнести методы, предложенные Велликановым, Ярославцевым, Россинским, Розовским, Бленчем-Ласеем, Харрисоном, а ко второй — Эйнштейном, Комура, Егiazаровым, Лосиевским, Де Врисом, Хербертсоном, Цвамборном, Гарде, Богарди, Алтуниным. Вторую группу методов можно подразделить на методы, где транспорт наносов учитывается на структурном уровне движения частиц (Эйнштейн, Комура, Егiazаров) и на структурном уровне движения гряд (микроформ) (Хербертсон, Де Врис, Цвамборн, Богарди, Глазик и отчасти Алтунин). Имеются также методы, основанные на объединении условий подобия как плановых, так и высотных деформаций русла (Леви, Лятхер, Ржаницын, Знаменская). В этих методах подобие плановых деформаций обеспечивается принятием постоянства критерия $\frac{B}{H} \lambda$ (Ржаницын принимает $\frac{B}{H} = f(I)$).

Транспорт наносов, по Леви, Лятхеру и Ржаницыну, учитывается на структурном уровне движения частиц, а по

Знаменской — на структурном уровне движения гряд (микро- и мезоформ).

3.4.2.2. Существующие способы расчета моделей отличаются различными точками зрения исследователей по поводу искажения масштабов.

а. Наиболее часто при моделировании применяется искажение геометрических масштабов (несмотря на то, что условием (3.5) такое искажение не предусмотрено). По этому поводу существуют различные мнения. Некоторые исследователи считают, что при моделировании необходимо стремиться к неискаженным моделям или к минимальному искажению. М. А. Великанов и Н. А. Ржаницын, как было показано выше, считают, что в самой природе при переходе от более крупных по масштабу потоков к меньшим по размеру существует определенный закон искажения геометрических размеров (B и H) потоков, если меньший по размерам принять за модель большего. Этот закон Ржаницын отображает путем выделения разных порядков рек, а Великанов — в виде морфометрических зависимостей. Железняков, Леви и Хербертсон находят критерии этого закона

$$Fr_r = Fr \frac{B}{H} = \text{idem.}$$

Однако никем, кроме Ржаницына и Знаменской, критерии, отражающие закон искажения масштабов, не связывались именно с выбором искажения масштабов модели.

б. Существуют два противоположных мнения по поводу допустимости нарушения масштаба крупности частиц по сравнению с масштабом глубины. Среди сторонников правомерности искажения размеров частиц по сравнению с масштабом глубины следует назвать Лятхера, Гарде, Хербертсона, Аллена, Бленча и Знаменскую. Гарде, Лятхер и Знаменская считают, что такое изменение должно быть учтено вносимыми изменениями в соответствующие масштабные соотношения.

в. Допустимость искажения действующих сил при моделировании признается не всеми исследователями. Лятхер, Гарде и Знаменская считают, что искажение действующих сил правомерно при соответствующем учете в масштабных соотношениях. Искажение действующих сил на модели по сравнению с натурой выражается, по мнению автора, в изменении числа Фруда модели по сравнению с натурным значением этого числа.

М. А. Великанов, А. И. Лосиевский, А. В. Караушев, И. А. Ярославцев, О. В. Андреев и Де Врис в той или иной степени также признают правомерность искажения действующих сил. Так, Де Врис и Лосиевский полагают, что закон Фруда является законом вторичной важности по сравнению с законом деформаций русла. А. В. Караушев и И. А. Ярославцев вместо общепринятого выражения для критерия подобия Фруда исполь-

зуют уточненное выражение $(Fr^2)^* = (Fr^2)_a = \frac{Fr^2}{I}$. А. В. Караушев получает этот критерий из уравнений движения (3.1), а Ярославцев из анализа действия силы тяжести на наклонное дно.

г. Допустимость искажения удельного веса частиц признается почти всеми исследователями. Однако некоторые из них (Хербертсон, Гарде, Аллен, Бленч и Знаменская) полагают, что это ведет к необоснованным трудностям и потому такое искажение нецелесообразно. Шатберашвили считает, что искажение удельного веса частиц недопустимо.

д. Существует разногласие между исследователями по поводу масштаба времени русловых процессов. В большинстве методов это время оказывается неодинаковым со временем протекания гидравлических процессов, что является еще одним вторичным противоречием, вытекающим из условия (3.5).

Н. А. Ржаницын, Хербертсон и Знаменская считают, что масштаб времени один для гидравлических и морфологических процессов. К такому же выводу для некоторых условий приходит и Лятхер.

е. Существуют разногласия и по поводу масштаба уклона свободной поверхности и дна. Большинство исследователей считают, что масштаб уклона должен быть равен искажению масштабов. Лишь Де Врис и Гарде показали, что часто приходится наклонять модели сверх требуемого по условию $\alpha_1 = m$. Н. С. Знаменская, а также Лятхер дали теоретическое масштабное соотношение, связывающее искажение геометрических масштабов, масштаб уклона и изменение числа Фруда на модели. Из этого соотношения можно сделать вывод, что модель следует наклонять на дополнительный угол при увеличении числа Фруда на модели и уменьшать угол наклона в случае, если число Фруда на модели будет уменьшено по сравнению с натурным. К аналогичному выводу можно прийти, если рассмотреть предложенные Караушевым и Ярославцевым критерии Fr^* и Fr_a .

Экспериментально факт изменения уклона свободной поверхности на размываемой модели обнаружен Харрисоном и Мелема.

ж. Только Знаменская и Лятхер считают, что масштаб высоты гряд должен отличаться от масштаба глубин. Этот факт также отмечен в экспериментах Харрисона.

з. Учет форм гряд и их влияния на деформации дна и сопротивления русла Де Врисом и Алтуниным предлагается производить с помощью зависимостей для коэффициента Шези. С. Хербертсон, Я. Богарди, Цвамборн, Глазик, Гарде и Знаменская предлагают для этой цели использовать графики зависимости формы гряд от гидравлических характеристик потока. При чем Хербертсон, Цвамборн и Гарде предлагают использовать

Масштабные коэффициенты, определяемые разными методами моделирования

ТАБЛИЦА 3.1

Автор	Критерий подобия	K_{Π}	α_d	α_{τ}	α_I
Алтуниин [2]	$\alpha_{Fr} = 1$	$\frac{HI}{\rho' d}$	$\frac{\alpha_H \alpha_x^2 \alpha_k^2}{\alpha_{\rho'}}$	$\frac{\alpha_t (\alpha_{H/d})^{1,5}}{(\alpha_{\rho'})^{0,5}}$	$m = \frac{1}{\sqrt{\alpha_L}}$
Де Врис [70]	$Fr_M > Fr_{\Pi}$	$\Phi, \psi, v/v_0$	$\frac{\alpha_{\rho} \alpha_H \alpha_I}{\alpha_{\rho'}}$	$\frac{\alpha_L \alpha_H}{\alpha_{q_T}}$	$km = \frac{1}{\alpha_c^2}$
Егизаров	$\alpha_{Fr} = 1$	$Re_{*d}, \frac{RI\varepsilon}{df}$	α_H	$\alpha_t \alpha_{H/d} \sqrt{\alpha_{\lambda}}$	m
Эйнштейн [91]	$\alpha_{Fr} \neq 1$	Φ, ψ $\frac{\alpha}{\beta'} = \text{idem}$	$\alpha_{\delta} \neq \alpha_H$	$\frac{\alpha_L \alpha_H \alpha_{\rho}}{\alpha_{q_T}}$	m
Знаменская [15]	$\alpha_{Fr} \sqrt{\alpha_{\Pi}} = \alpha_{\omega} \alpha_{K_{\Pi}}$	$v/w, \frac{B}{H} \lambda$	$\alpha_d = f(\alpha_{\omega})$	$\alpha_t = \frac{\alpha_L}{\alpha_{Fr} \sqrt{\alpha_H}}$	$m \alpha_{Fr}^2$
Караушев [21]	$\alpha_{Fr*} = I \alpha_{Fr}$	$\frac{v}{w}$	$\alpha_H \alpha_n^{3/2}$	$\frac{\alpha_L \alpha_H}{\alpha_{q_T}}$	α_{Fr}^2
Леви [31]	$\alpha_{Fr} = 1, Fr_{кр}^2 \approx 0,3$	$\frac{B}{H} \lambda; v/v_0; Re_{*d}$	$\frac{1}{\sqrt[3]{\alpha_{\rho'}}} f(Re_{*d})$	$\alpha_L \alpha_{H/d} \alpha_{\lambda}$	m
Лятхер [34]	$Fr_{кр}^2 \leq 0,8$	$\frac{v}{w}, \frac{v}{v_0},$ $\frac{v_*}{w}, \psi, \frac{B}{H} \lambda$	$\alpha_{\rho'} \alpha_d = \frac{1}{\alpha_b^3} \alpha_{Fr}^2$	$\alpha_t (\text{при } \alpha_d = \alpha_H)$	$\frac{\alpha_{\rho'} \alpha_d}{\alpha_H}$
Ржаницын [44]	$\alpha_{Fr} = 1$	$\frac{HI}{d}$	$\frac{\alpha_H^4}{\alpha_L^3}$	$\alpha_t = \frac{\alpha_L}{\alpha_v}$	$\frac{1}{\alpha_H} = km$

Автор	α_{q_T}	μ	α_v	Материал	α_C
Алтуний [2]	$\alpha_v^3 \alpha_x^{y_1} \alpha_k^{y_2}$		$\frac{\alpha_p^{0,5} \alpha_d}{\alpha_x \alpha_k}$	Заменитель, песок	$\frac{1}{\alpha_x \alpha_k}$
Де Врис [70]	$\alpha_d^{3/2} \alpha_p^{1/2}$	$(C_3/C_{90})^{3/2}$	$\frac{\sqrt{\alpha_p \alpha_d \alpha_c}}{\alpha_\mu^{0,5}}$	Заменитель, песок	
Егнazarов	$\alpha_Q m^{3/2}$		$\sqrt{\alpha_H}$	Песок	$\neq 1$
Эйнштейн [91]	$\alpha_Q m^{3/2}$		$\sqrt{\alpha_H}$	Заменитель	
Знаменская [15]	$\alpha_Q \alpha_H^{1/6} d \alpha_{Fr}$ график $\bar{C}$	$\Delta/\lambda = f$ (Fr, v/ω)	$\alpha_{Fr} \sqrt{\alpha_H}$	Песок	$\frac{1}{\alpha_n} \alpha_H^{1/6}$
Қараушев [21]	—		$\alpha_{Fr} \sqrt{\alpha_H}$	—	
Левн [31]	$\alpha_Q (\alpha_H/d)^{k+1}$		$\sqrt{\alpha_H}$	Заменитель, песок	
Лятхер [34]	$\alpha^{1,25} \left(\frac{d}{H}\right) \alpha_Q$		$\sqrt{\alpha_H}$	Заменитель, песок	
Ржаницы [44]			$\sqrt{\alpha_H}$	Песок	$\alpha_L^{3/4}$

Автор	Критерий подобия	K_{Π}
Хербертсон [78]	$a_{Fr} \neq 1$	$\frac{v_*}{w}, \frac{H}{d}$
Цвамборн [107]	$a_{Fr} = 1$	$\frac{v_*}{w}$
Ярославцев [3, 55]	$a_{Fra} = 1$	
	$a_{Fr} \neq 1$	
Харрисон [76]	$a_{Fr} \neq 1$	$\frac{wd}{v}$
Шатберашвили [51]	(обесп. Fr)	$\frac{HI}{d}$
	$a_{Fr} \neq 1$	
Аккерс [56]	$a_{Fr} = 1$	v_a^n
	$a_{Fr} \neq 1$	$\frac{\sqrt{gd \frac{\beta+1}{\rho}}}{\times \left\{ \frac{v}{\sqrt{321g \frac{H}{d}}} \right\}}$
Лапшенков	$a_{Fr} = 1$	$\frac{v}{v_0}$
	$a_{Fr} \neq 1$	
Гарде [74]	$a_{Fr} = \beta^{3/2} a f^{1/2}$	$\frac{\tau_0}{\Delta_T d} \neq 1$
Шапиро	$a_{Fr} \neq 1$	v_*
	Подбор	

	α_d	α_τ	α_f
	1	$\alpha_t + \Delta\alpha_t$	
	$\sqrt{\frac{1}{\alpha_f}}$		$\frac{\mu^{2/3}}{C^2}$
	$\neq \alpha_H$	Подбор	
	$\neq \alpha_H$	Подбор	Самоформир.
	$\neq \alpha_H$	$\alpha_L^{0,665} \alpha_d^{-0,15}$	m
$\times$	$\frac{\alpha_v^{2/3}}{\alpha \left(\frac{\rho_\tau - 1}{\rho} \right)^{1/3}}$	$\frac{\alpha_t \alpha_d}{\alpha_H m^{-n/2}}$	$\frac{\alpha_v}{\alpha_C \alpha_H^{0,5}}$
$\left. \begin{matrix} \\ \\ \end{matrix} \right\} 1 - n$	Подбором		
	$\neq \alpha_H$	$\frac{\alpha_L^2 \alpha_H}{\alpha_\varepsilon \rho \alpha_q \tau}$	$\frac{1}{\alpha_C^2}$
	$\eta = \beta f^2$		ηm
	1	$\frac{\alpha_L}{\alpha_v}$	m

Автор	α_{qT}	μ	α_v	Материал	α_C
Хербертсон [78]	График $\bar{c} = f(H/d \text{ и } Fr)$	График Цвамбор- на—Богарди	$\neq \sqrt{\alpha_H}$	Песок	$m^{-0,5}$
Цвамборн [107]		График Альберт- сона	$\sqrt{\alpha_H}$	Песок	
Ярославцев [3, 55]	Подбор		$\alpha_{Fr} \sqrt{\alpha_H}$	Песок	
Харрисон [76]	Подбор	Общая форма гряд	Подбор	Скорлупа грецких орехов	
Шатберашвили [51]	—	—	$\alpha_L^{0,335} \alpha_d^{0,15}$	Песок	
Аккерс [56]	—	—	$\sqrt{\alpha_H}$	Песок, заменитель	$m^{-0,5}$
Лапшенков	Подбором				
Гарде [74]	$\alpha_L^{2,48} \alpha_d^{-0,98} \beta^{-11,7}$	График Альберт- сона	$\alpha_L^{0,414} \alpha_d^{0,087} \beta^{-0,20}$	Песок, заменитель	
Шапиро	$\alpha_L^2 \alpha_H^{1,5} \alpha_w^{-0,25}$ или $\alpha_Q \alpha_t = \alpha_\tau$		$\sqrt{\alpha_H}$	Песок мелкий	

график Альбертсона—Гарде, Глазик — графики Богарди или Знаменской, а Харрисон предлагает просто сопоставлять модельные гряды с натурой. Ж. Шабер и Ж. Шовин, наоборот, ищут такие условия, при которых гряды (рифеля) вообще не возникали бы.

В табл. 3.1 приведены масштабные коэффициенты основных характеристик потока и наносов по разным методам моделирования. Не имея возможности подробно остановиться на разных методах расчета моделей с подвижными границами, рассмотрим некоторые из них, которые кажутся автору наиболее любопытными или являются наиболее новыми по времени их разработки.

3.4.3. Метод Хербертсона — «метод синтеза»

Дж. Хербертсон на основании анализа существующих методов моделирования разработал метод синтеза применительно к естественным прямолинейным руслам с фиксированными стенками и размываемым дном, над которым течет равномерный поток, имеющий две степени свободы — изменять глубину и уклон свободной поверхности.

Среди действующих сил Хербертсон выделяет влекущую силу, силу тяжести, силы взаимодействия с осаждающимися частицами и силы вязкости. Рассматривая основные действующие силы, используя Ig для выражения большинства действующих сил, считая расход граничным условием, Хербертсон получает два следующих функциональных выражения, связывающих основные факторы и параметры на основе π -теоремы и условий подобия:

$$\varphi \left(\frac{Q_{\tau}}{Q}, \frac{Qg^{1/3}}{\nu^{2/3}}, \frac{g^{1/2}d^{3/2}}{\nu}, \frac{d}{R}, \frac{H}{R}, \frac{\rho_{\tau} - \rho}{\rho} \right) = 0 \quad (3.7)$$

и

$$\varphi \left(\frac{Q_{\tau}}{Q}, \frac{Qg^{1/3}}{\nu^{2/3}}, \frac{g^{1/2}d^{3/2}}{\nu}, \frac{d}{B}, I, \frac{\rho_{\tau} - \rho}{\rho} \right) = 0, \quad (3.8)$$

где ρ_{τ} — плотность твердой фазы; ν — кинематическая вязкость; R — гидравлический радиус; остальные обозначения общепринятые.

Рассматривая условия подобия системы (3.7) и (3.8), Хербертсон преобразует их для решения разных конкретных задач.

В том случае, когда $R \approx H$, в выражении (3.7) четвертый член представляет собой d/H , а пятый превращается в единицу. По мнению Хербертсона, мало кто учитывает этот важный критерий. Для учета влияния d/H он предлагает график, где использованы данные, полученные по экспериментам в лотках разных авторов (рис. 3.2). От метода моделирования с использованием режимной теории Ласея Хербертсон взял отношение H/R , введенное Ласеем для учета влияния ширины, а также член

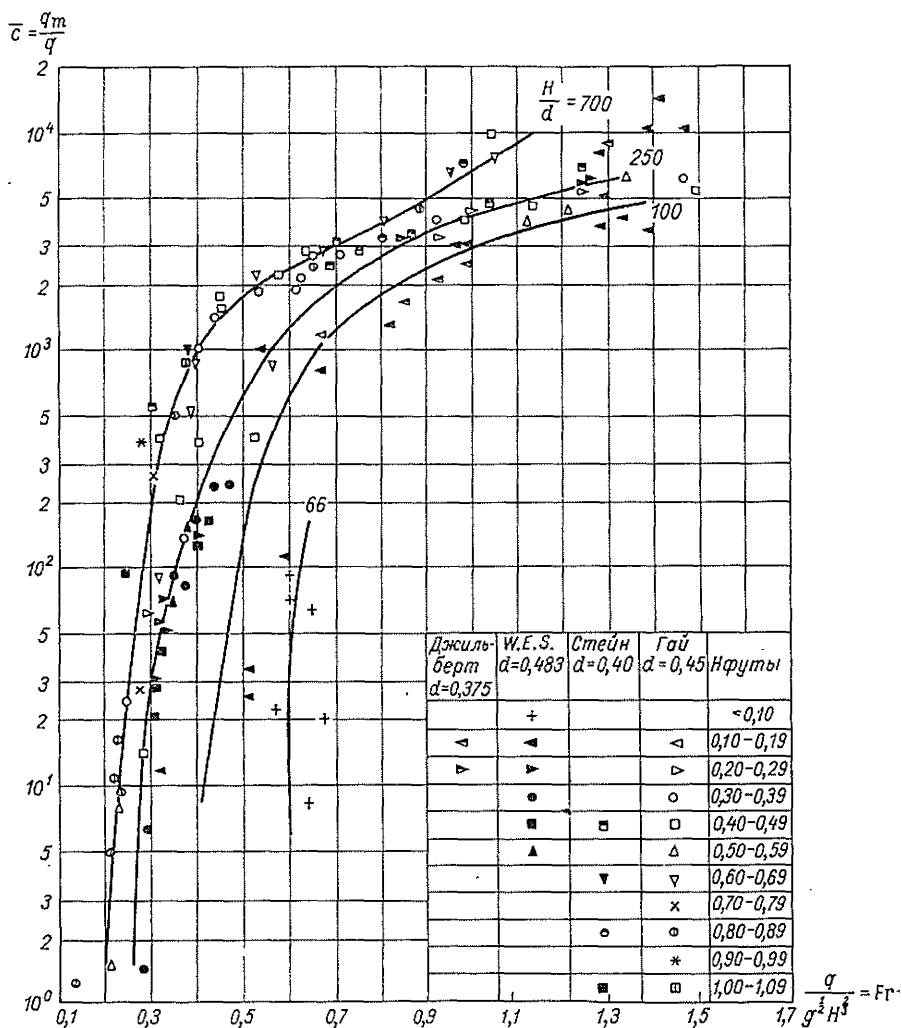


Рис. 3.2. Зависимость концентрации наносов от Fr и $\frac{H}{d}$, по Хербертсону.

$\frac{Q}{g^{1/2} H^{3/2}}$, который есть не что иное, как преобразованное число Фруда $Fr \frac{B}{H}$, полученное ранее Железняковым [13]. От метода моделирования по гидравлическим сопротивлениям и транспорту наносов Хербертсон взял критерий Шильдса. В первом случае

функциональная зависимость основных критериев приняла вид

$$\varphi \left(\frac{Q_{\tau}}{Q}, \frac{Q}{g^{1/2} H^{5/2}}, \frac{g^{1/2} d^{3/2}}{v}, \frac{d}{H}, \frac{H}{R}, \frac{\rho_{\tau} - \rho}{\rho} \right) = 0. \quad (3.9)$$

Учет критериев Шильдса привел функциональную зависимость к виду

$$\varphi \left(\frac{d}{H}, \frac{R}{H}, \frac{q}{(g'_w)^{1/2} H^{3/2}}, \left[\frac{(Ig)^{1/2} d^{3/2}}{v} \left(\frac{H}{d} \right)^{1/2}, \frac{Ig}{g'_w} \frac{H}{d} \right] \right) = 0, \quad (3.10)$$

где третий член есть не что иное, как преобразованное число Фруда в масштабных коэффициентах, приводящее к выражению

$$\alpha_v = \sqrt{\alpha_H \alpha_{(\rho_{\tau} - \rho)}}, \quad (3.11)$$

так как $g_w = \left(\frac{\rho_{\tau} - \rho}{\rho} g \right)$ — подводная сила, действующая на жидкость.

Может быть показано, что, используя параметр Шильдса при той же плотности донного материала, что и в натуре, равенство параметров в двух системах возможно только, если $\frac{1}{\alpha_H} =$

$$= \sqrt{\frac{1}{\alpha_L}}. \quad \text{Этот результат свидетельствует о необходимости}$$

очень большого искажения. Полученные выражения Хербертсон упрощает для разных конкретных случаев. Например, он показывает, что для широких русел второй член выражения (3.10) является постоянным, а также, что если для модели и

натуры используется одно и то же отношение $\frac{\rho_{\tau}}{\rho}$, то первый член не является важным, так как $d_M = d_n$, и в этом случае окажется, что масштаб времени морфологических процессов будет больше, чем масштаб времени гидравлических процессов. Допущение различия между гидравлическим масштабом времени и масштабом времени транспорта наносов не более чем отклонение от условий полного подобия.

Основой метода Цвамборна [107] является критериальный график донных гряд, построенный в координатах v_*/ω , $\frac{v_* d}{v}$,

чисел Фруда и частиц d . Для соответствия модели и натуры Цвамборн принимает следующие необходимые условия: $Re_M > 600$, что обеспечивает турбулентный режим; $Fr_M = Fr_n$; $v_*/\omega =$

$= idem$. Масштаб диаметра частиц $\alpha_d = \frac{1}{\sqrt{\alpha_I}}$. При этом нала-

гаются определенные ограничения в выборе искажения верти-

кального масштаба и движения донных наносов, чтобы модель и натура находились в той же самой области транспорта наносов (например, рифеля, дюны и т. п.) согласно предложенному Цвамборном графику. Однако метод Цвамборна не учитывает критерия H/d , влияние которого показано Хербертсоном на рис. 3.2. До тех пор пока необходимое число таких графиков для каждого легкого материала не будет получено, метод Хербертсона требует предварительных лабораторных исследований.

Анализируя полученные выражения, Хербертсон приходит к следующим выводам.

1. Для того чтобы получить подобие как движения наносов, так и жидкости, масштаб скорости должен удовлетворять выше-названным уравнениям и в то же время общей формуле расхода донных наносов. При этом возникает несколько противоречий:

а) формула для Q_T недостаточно надежно описывает транспорт наносов; б) в разработанной методике для описания одного явления используются два уравнения: одно для гидравлических сопротивлений и другое для Q_T . Как следует из теории подобия, подобие сопротивления потока наблюдается в аллювиальных руслах тогда, когда есть подобие транспорта наносов, и наоборот. Одно из условий подобия активных аллювиальных русел состоит в том, что отношение плотности наносов к плотности жидкости на модели и в натуре должно быть то же самое. Таким образом, напрашивается вывод, что подобие транспорта достигается из подобия гидравлических сопротивлений только, строго говоря, для наносов одной плотности.

2. В практике моделирования имеется тенденция переносить закон сопротивления для жестких граничных условий на аллювиальное русло, деля при этом единый закон развития аллювиального русла на два закона — сопротивлений и транспорта донных наносов. Обычно для этого используются независимые эмпирические методики.

3. Для того чтобы удовлетворить соотношению между сопротивлениями и транспортом наносов, по-видимому, на модели должны наблюдаться донные формы той же конфигурации, что и в натуре, т. е. рифеля, дюны, гладкая фаза и т. п., как это показано Цвамборном [107] или Богарди [64].

3.4.4. Метод Де Вриса и его взгляды на расчет размываемых моделей [70]

При постройке моделей часто приходится встречаться с масштабным эффектом, смысл которого показан Де Врисом на примере исследования потока над водосливом с широким порогом, для которого применяется закон Бернулли

$$H' = H + \frac{v^2}{2g} = H + S, \quad (3.12)$$

или в масштабных соотношениях

$$\alpha_{H'} = \frac{H'_M}{H'_H} = \frac{H_M + S_M}{H_H + S_H} = \frac{1 + \frac{S_M}{H_M}}{\frac{1}{\alpha_H} + \frac{S_M}{H_M}} = \frac{1 + \left(\frac{S_M}{H_M}\right)}{\frac{1}{\alpha_H} + \frac{1}{\alpha_S} \left(\frac{S_M}{H_M}\right)}. \quad (3.13)$$

В случае, если $\alpha_H = \alpha_S$, тогда $\alpha_{H'} = \alpha_H = \alpha_S$, если же $\alpha_H \neq \alpha_S$, тогда $\alpha_{H'} = f\left(\alpha_H, \alpha_S, \frac{S_M}{H_M}\right)$. Последний случай показывает, что масштаб глубины зависит не только от других масштабных характеристик, но и от абсолютных размеров модели. В этом и заключается масштабный эффект. Далее Де Врис делает заключение, что отсутствие масштабного эффекта наблюдается в первом случае, т. е. когда $\alpha_H = \alpha_S$, или когда $Fr = idem$. (Поскольку масштабный эффект есть отражение закона искажения, то отсюда можно сделать заключение, что $\alpha_H = \alpha_S$ — практически невозможный случай.)

Де Врис рассматривает уравнение движения для одномерного потока

$$\frac{\partial u}{\partial t} + v \frac{\partial v}{\partial x} = -\frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial x} - \frac{gv(v)}{C^2 H}. \quad (3.14)$$

Принимая распределение давления по гидростатическому закону, он превращает (3.14) в следующее выражение:

$$\frac{1}{g} \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \frac{v^2}{2g} \right\} = -\frac{\partial H}{\partial x} - \frac{\partial z}{\partial x} - \frac{v(v)}{C^2 H}. \quad (3.15)$$

Различные сочетания разных членов выражения (3.15) приводят к получению разных известных критериальных чисел. (Этой процедурой Де Врис заменяет процедуру нормирования уравнения.) Первый и второй члены приводят к числу Струхала, второй и третий — к критерию Фруда, третий и четвертый — к равенству масштаба донных возвышений α_z , масштабу глубины α_H , а сочетание второго и пятого членов выражения (3.15) определяет масштаб шероховатости

$$\alpha_C^2 = \frac{\alpha_L}{\alpha_H} = \frac{1}{m}. \quad (3.16)$$

Де Врис отмечает, что выражение (3.15) и критерии, полученные из него, не предусматривают возможности искажения, и вопрос об искажении масштабов по этой стадии рассмотрения остается неясным.

Уравнения двумерного потока свидетельствуют о том, что масштаб шероховатости связан с кривизной линий тока: если модель шероховата, кривизна линий тока велика, а если модель гладкая, то и кривизна линий тока мала.

В этом утверждении чувствуется невысказанная убежденность необходимости сохранения одной и той же кривизны линий токов на модели, что и в натуре. Если же вспомнить, что длина побочня пропорциональна B/H потока, то обтекание побочней крупной реки и реки малого размера будет в сходные фазы половодья происходить и линиями тока разной кривизны. В то же время нет сомнения в том, что такое обтекание есть идентичный процесс, который и необходимо воспроизвести на модели. Тогда требование сохранения одинаковости кривизны линий токов оказывается неверным. Я. Сумбал [98] установил, что отклонение донных линий тока от средней линии русла при моделировании не требуется соблюдать одинаковым в натуре и лаборатории, т. е. не требуется количественного равенства поперечных циркуляций для осуществления подобия деформаций русла. Этот вывод получен им на основании опытных данных, показавших, что с увеличением глубины увеличивается и поперечная циркуляция, однако это не приводит к изменению морфологии русла. По мнению Сумбала, искажение модели приводит к искажению какого-то другого фактора, влияющего на морфологию русла так, что эти влияния взаимно компенсируются. Этим вторым фактором Сумбал считает поперечный уклон дна.

Для воспроизведения на модели подобного натурному транспорта наносов Де Врис анализирует эмпирические функции транспорта наносов X и потока Y , предложенные Эйнштейном и дополненные Де Врисом,

$$X = \frac{q_T}{d^{3/2} \sqrt{g \left(\frac{\rho_T - \rho}{\rho} \right)}} \quad (3.17)$$

и

$$Y = \left(\frac{\rho_T - \rho}{\rho} \right) \frac{d}{\mu H I}, \quad (3.18)$$

где μ — коэффициент рифельности дна, равный $\left(\frac{C}{C_3} \right)^{3/2}$, где

$$C_3 = 18 \lg \frac{12H}{d_{90}}.$$

Для условий отсутствия масштабного эффекта требуется, чтобы $\alpha_x = \alpha_y = 1$, тогда

$$\alpha_{q_T} = \alpha_d^{3/2} \alpha_{(\rho_T - \rho)}^{1/2} \quad (3.19)$$

и

$$\alpha_{\mu H I} = \alpha_{(\rho_T - \rho)} \alpha. \quad (3.20)$$

Используя формулу Шези, Де Врис получает

$$\alpha_v^2 = \alpha_{(\rho_T - \rho)} \alpha_c^2 \alpha_\mu^{-1}. \quad (3.21)$$

Из выражения (3.21) следует, что идентичность транспорта наносов на модели натурным условиям достигается некоторым «идеальным» масштабом скорости, отличным от масштаба скорости, по Фруду. Удовлетворение закону Фруда при одновременном удовлетворении идеального масштаба скорости для

песка, используемого в качестве донного материала, достигается только при условии $\alpha_H = \alpha_d$, что возможно только при крупном натурном материале донных отложений. При этом влияние α_u и α_c неопределенно из-за отсутствия должных формул. Масштаб времени де Врис получает из уравнения неразрывности транспорта наносов в виде

$$\alpha_t = \frac{\alpha_L \alpha_H}{\alpha_q} . \quad (3.22)$$

Для масштаба времени α_t необходимо определять поправку при тарировке модели путем воспроизведения русловых процессов за известный период времени.

Де Врис подробно анализирует роль искусственной шероховатости на жестких и размываемых моделях и приводит рекомендации для ее определения.

Особое внимание Де Врис уделяет воспроизведению уклона на моделях. Он показал, что особенно для размываемых моделей обычно принимается условие $\alpha_I = m$, которое не может быть выдержано. Для обоснования этого Де Врис рассматривает формулу Шези $\alpha_v^2 = \alpha_c^2 \frac{\alpha_H}{\alpha_L} \alpha_H$. Если при этом удовлетворить

условию подобия шероховатости (3.16), то при $\alpha_I = 1$ автоматически получается условие Фруда, которое, по мнению Де Вриса, является законом вторичной важности, так как требуется выдерживать подобие морфологических процессов, основанных на идеальном масштабе скорости, т. е. противоречащем закону Фруда.

Для исключения этого противоречия, по мнению Де Вриса, модель следует наклонять на дополнительный угол I_t , зависящий от искажения масштабов m ,

$$I_t = I_H \left\{ \frac{\alpha_c^2 \alpha_H}{\alpha_v^2} - m \right\} . \quad (3.23)$$

В работе Де Вриса приводятся несколько примеров расчета русловых моделей.

3.4.5. Метод расчета искаженных русловых моделей, разработанный Гарде на основании режимной теории

Р. Гарде [74], рассматривая существующие методы расчета размываемых моделей, их достоинства и недостатки, выделяет два типа методов. Один из них позволяет в какой-то мере воспроизвести на модели натуральный транспорт донных наносов и гидравлические сопротивления, другой — плановое подобие развития процесса. При этом рассмотрении им высказываются интересные мысли о допустимом искажении на моделях не только геометрических масштабов, но также искажения крупности на-

наносов и действующих сил, что требует только соответствующего учета в масштабных соотношениях. В предложенной Гарде методике однако не все его высказывания нашли отражение. В качестве одного из исходных выражений он предлагает морфометрическую зависимость, которая почти полностью совпадает с зависимостью Великанова—Шарашкиной (см. 2.57), а также закон сопротивления в форме

$$\frac{v}{\sqrt{\left(\frac{\Delta\gamma_{\tau}}{\rho f}\right)d}} = k \left(\frac{R}{d}\right)^{1/3} \left(\frac{I}{\frac{\Delta\gamma_{\tau}}{\gamma f}}\right)^{1/2}, \quad (3.24)$$

где R — гидравлический радиус; f — коэффициент заиления в теории Ласея, $f = 1,76 \sqrt{d}$; $k = 7,66$ для гладкого дна без движения наносов, $k = 3,20$ для рифелей и дюн и $k = 6,00$ для гладкой фазы и антидюн.

Р. Гарде использует также соотношение, принятое в режимной теории

$$\frac{\beta \alpha_H \alpha_I}{\alpha_d} = \lambda_{\lambda}, \quad (3.25)$$

где

$$\beta = \frac{\alpha_R}{\alpha_H} = \left(\frac{\alpha_Q}{\alpha_f}\right)^{1,3}. \quad (3.26)$$

Для уклона Гарде принимает следующее соотношение:

$$\alpha_I = \eta \frac{\alpha_H}{\alpha_L} = \eta m, \quad (3.27)$$

т. е. так же, как и Де Врис, допускает дополнительный наклон моделей.

Для расхода наносов Гарде использует формулу, которая обобщает формулы Эйнштейна, Мейер—Петера и Калинске

$$\frac{q_{\tau} B}{v_* d} = A \left(\frac{\tau_0}{\Delta\gamma_{\tau} d}\right)^p, \quad (3.28)$$

где $A = 16$, $p = 4$ для расхода наносов на единицу ширины. В методе Гарде сделана попытка объединить два подхода в один с целью воспроизведения на модели как условий транспорта, так и плановых деформаций русла. Его методика может использоваться с помощью подбора необходимых величин.

3.4.6. Метод Аккерса

На XV конгрессе МАГИ [56] был представлен доклад П. Аккерса о моделировании русловых процессов, где предлагаются несколько вариантов расчета размываемых моделей в зависимости от моделируемого объекта и его природных характеристик.

Используя в качестве определяющей морфометрическую зависимость

$$\frac{B}{H} = k' \frac{Q^{0,159}}{I^{0,08} d^{0,354}} \quad (3.36)$$

и равенство

$$B = k' H^{1,5} I^{0,5} \left(\frac{H}{d} \right)^{0,167}, \quad (3.37)$$

Шатберашвили получает масштабное соотношение трех линейных размеров

$$\alpha_H = \alpha_L^{0,665} \alpha_d^{0,3}. \quad (3.38)$$

Из выражения (3.38) следует, что искажение масштабов для размываемых моделей является обязательным. Учитывая, что при выведении (3.38) были использованы морфометрические зависимости для естественных меандрирующих рек, Шатберашвили считает, что для натурных условий отчетливо прослеживается нелинейность связи ширины с глубиной при уменьшении их размеров. П. А. Шатберашвили отмечает, что этот вывод согласуется с зависимостью В. М. Маккавеева, полученной на основании соблюдения подобия кинематической структуры потока у дна, и зависимостью Н. А. Ржаницына.

В качестве критерия подвижности K_n Шатберашвили использует выражение

$$K_n = Fr_{кр} \frac{g}{C^2} \left(\frac{H}{d} \right). \quad (3.39)$$

Принимая далее $\alpha_d = 1$ и рекомендации индийских ученых Гидравлической лаборатории в г. Пуна, Шатберашвили получает необходимые масштабные соотношения, приведенные в табл. 3.1. При этом сопротивление на модели оказывается больше натурального во столько раз, во сколько искажен вертикальный масштаб.

3.4.8. Метод Н. С. Знаменской [15, 39]

Исходя из постулатов гидроморфологической теории, русловой процесс определяется тремя основными факторами — водностью, транспортом наносов и ограничивающими факторами. Подобие водности достигается с помощью гидравлических критериев (с учетом искажения сил), подобие ограничивающих факторов — воспроизведением идентичной геометрии модели с требуемым искажением масштабов, а подобие транспорта наносов — воспроизведением гряд той же формы, что и в натуре. Это достигается расчетом соответствующих условий по критериальной зависимости $\frac{\Delta}{\lambda} = f(Fr v/w)$ (см. рис. 1.2).

Поскольку ограничивающие условия не являются жестко заданными, а сами составляют предмет изучения на размываемых моделях, то подобие начальных ограничивающих условий с помощью воспроизведения подобной геометрии русла еще не обеспечивает подобия этих границ в последующее время. Поэтому для учета плановых деформаций русла необходим дополнительный критерий. В качестве этого критерия используется отношение $\frac{B}{H}\lambda$. Записанное в масштабах, оно приводит к основному масштабному соотношению

$$m = \frac{\alpha_H}{\alpha_L} = \alpha_\lambda = \frac{\alpha_I}{\alpha_{Fr}^2} = \frac{1}{\alpha_C^2}. \quad (3.40)$$

Из соотношения (3.40) следует, что геометрическое искажение зависит от масштаба коэффициента Шези α_C , связанного с движением гряд и изменением числа Фруда на модели. Из этого выражения также следует, что неискаженное моделирование может иметь место только при $\alpha_C = 1$, что возможно при условии:

$$\alpha_n = \alpha_H^{1/3}. \quad (3.41)$$

Такие условия при обеспечении идентичности гряд в натуре и на модели практически невыполнимы, как следует из рис. 3.3, так как они могут быть выдержаны только для размеров модели, равных натурным или отличающихся от них в 2—3 раза. Поэтому практически по условию (3.41) все модели должны выполняться с искажением масштабов, которое в свою очередь связано с изменением числа Фруда на модели.

На рис. 1.2 видно, что подобия гряд можно добиться при разных сочетаниях Fr и v/w , т. е. при множестве сочетаний величины расхода и соответствующей ему крупности донных наносов, откуда можно рассчитать необходимое увеличение числа Фруда при заданной крупности частиц и α_H

$$\alpha_{Fr} = \alpha_{v/w} \frac{\alpha_w}{\alpha_H^{0.5}}, \quad (3.42)$$

при этом скорость потока на модели будет увеличена в α_{Fr} раз и учтется выражением

$$\alpha_v = \alpha_{Fr} \sqrt{\alpha_H}. \quad (3.43)$$

Из (3.40) и (3.42) следует, что

$$\alpha_I = m \alpha_{Fr}^2 = m \alpha_{v/w}^2 \alpha_w^2 \alpha_H^{-1}, \quad (3.44)$$

т. е. при искажении сил модель необходимо дополнительно наклонять на величину квадрата форсировки α_{Fr}^2 .

Искажение сил должно быть учтено масштабными соотношениями (3.40) и (3.42), где α_{Fr} и $\alpha_{v/w}$ определяются по зависимостям, представленным на рис. 1.2 и 3.3. Тогда при одном α_{Fr} будем иметь

$$\frac{\alpha_w^2 \alpha_{v/w}^2}{\alpha_H} = \alpha_L \alpha_C^2. \quad (3.45)$$

При методическом исследовании, которое проводилось автором, при доводке предлагаемого метода было установлено, что

Fr

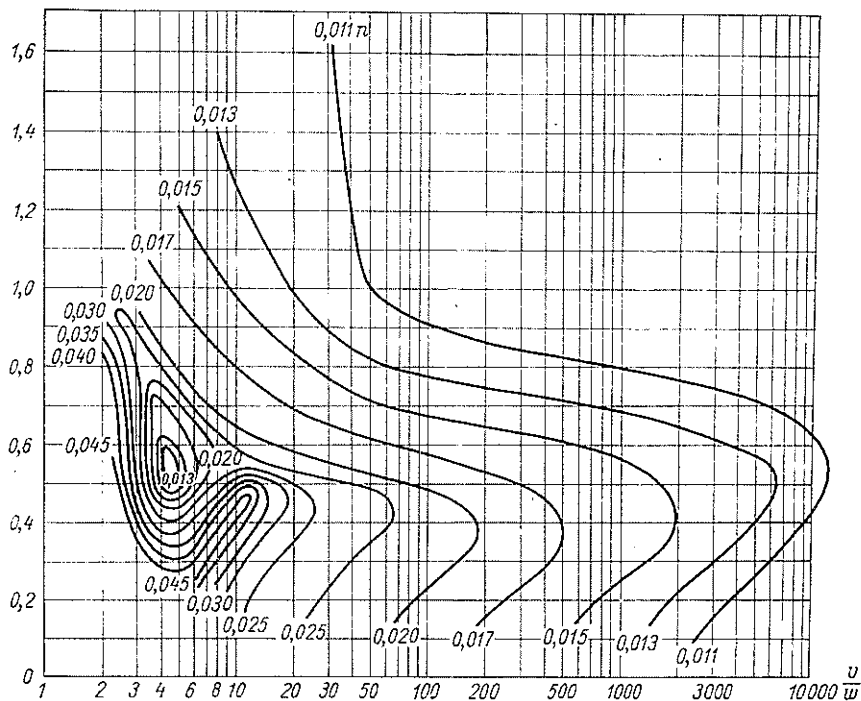


Рис. 3.3. Зависимость коэффициента шероховатости n от Fr и v/w .

масштаб времени русловых процессов, определяемый по смещению русловых форм, одинаков с масштабом времени гидравлических процессов, т. е.

$$\alpha_\tau = \alpha_t = \frac{\alpha_L}{\alpha_v} = \frac{\alpha_L}{\alpha_{Fr} \sqrt{\alpha_H}}, \quad (3.46)$$

а масштаб высоты гряд зависит от масштаба гидравлических параметров, от которых зависит высота гряд,

$$\alpha_\Delta = \alpha_{Fr} \alpha_H^{1/3} \alpha_{(v/v_0)} \alpha_H. \quad (3.47)$$

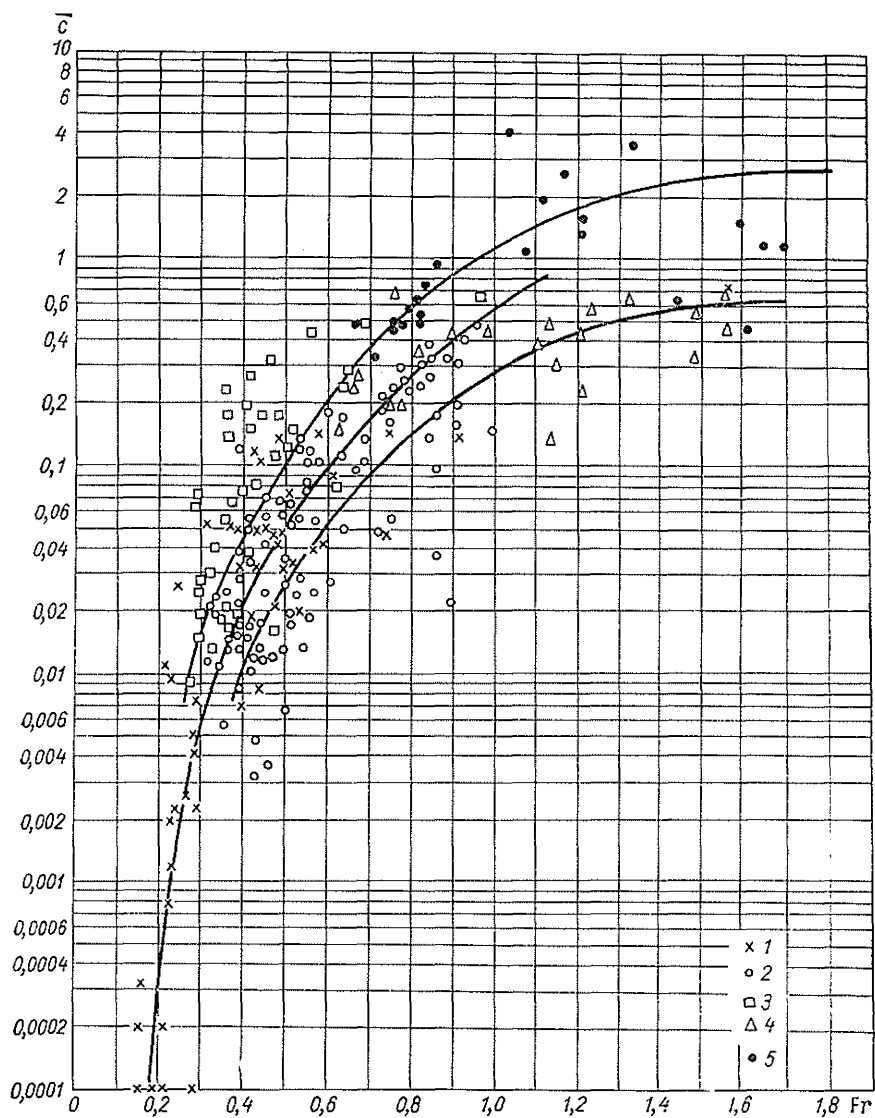


Рис. 3.4. Зависимость концентрации наносов от Fr и формы гряд, по Знаменской и Котловой.

1 — рифеля, 2 — плоские гряды, 3 — перекошенные гряды, 4 — смыв гряд, гладко, 5 — антидюны.

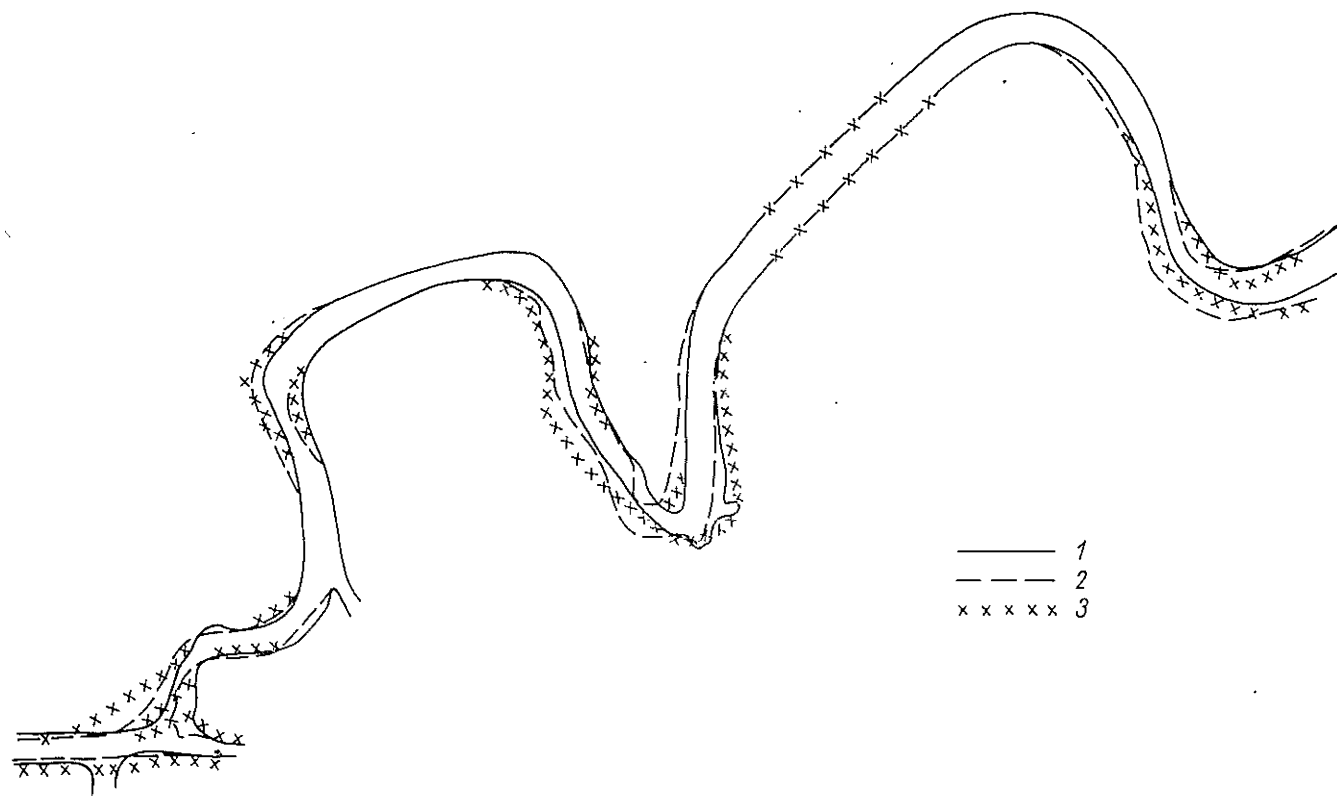


Рис. 3.5. Совмещение плановых деформаций р. Дона на модели и в натуре.
1 — 1966 г., 2 — 1970 г. (натура), 3 — 1970 г. (модель).

Масштаб расхода донных наносов, поэтому, может быть определен как

$$\alpha_{q_T} = \alpha_c \alpha_\Delta = \alpha_{Fr} \alpha_H^{1/2} / d \alpha_{v/w} \alpha_H \alpha_c. \quad (3.48)$$

При расчете модельных расходов наносов использовался также график концентрации наносов $\bar{c}$ в функции от модельного числа Фруда (рис. 3.4). Аналогичная зависимость, как мы помним, для расчета α_{q_T} модели была предложена Хербертсоном.

Совместное решение выражений (3.40) и (3.42) позволяет взаимоувязать крупность донных наносов, искажение масштабов и сил в виде изменения числа Фруда на модели α_{Fr} с изменением подвижности наносов на модели $\alpha_{v/w}$ при обеспечении

требуемой формы гряд и равенства отношения $\frac{B}{H} \lambda$ в натуре и на модели. По сути дела, это означает объединение условий подобия, принятых в «режимной» теории и морфометрических методах «натурного моделирования», с условиями, обеспечивающими подобие транспорта наносов и гидравлических сопротивлений.

Этот метод был использован автором: 1) при моделировании заносимости судоходной прорези в устье р. Невы в плоской и пространственной постановке задачи; 2) при моделировании деформаций русла и поймы р. Дона у г. Нововоронежа. В результате был сделан вывод, что он удобен для практического применения, так как позволяет выбирать наиболее удобные и экономичные варианты моделей в зависимости от имеющихся в распоряжении донных наносов, мощности установок и плановых размеров площадок и позволяет получить удовлетворительный количественный пересчет модельных деформаций на натуру (рис. 3.5).

3.5. Обобщение рассмотренных методов моделирования

Разработанные в последнее десятилетие методы расчета размываемых моделей отмечены попытками ряда авторов обобщить имеющиеся достижения в области моделирования и акцентировать внимание на противоречиях существующих методик. Эти исследования характерны повышенным вниманием к существующему независимо закону искажения натуральных характеристик потока при уменьшении их размеров, а также к удовлетворению тем или иным путем одинаковости конфигураций гряд в натуре и на модели. Высказываются мысли о том, что единый закон, свойственный для рек, в существующей практике

моделирования принято делить на два не увязанных между собой закона гидравлических сопротивлений и транспорта наносов. Высказываются также мысли о том, что нецелесообразно заменять донные отложения натурной плотности легкими заменителями. Среди существующих методов всегда можно найти такие два (или более), в которых совпадают масштабные соотношения одних характеристик при существенном различии масштабов других параметров. Это говорит о необходимости разработки более обобщенного метода моделирования.

3.6. Обоснование критериальных условий искаженного моделирования

Как мы установили в начале главы, критериальное условие (3.4) не предназначено для описания потоков, характеризующихся искажением характеристик при уменьшении их размеров.

Как же должно измениться критериальное условие для формулирования подобия таких потоков? Для этой цели рассмотрим отдельно число Эйлера как критерий, который может быть записан с учетом искажения геометрических масштабов

$$Eu = \frac{\Delta p 2gHL}{\rho v^2 2gHL} = \frac{\lambda L}{2H}, \quad (3.49)$$

где $\lambda = \frac{2gHI}{v^2}$ — гидравлические сопротивления потоку. В масштабных соотношениях это приведет, как мы видели выше, к выражению

$$\alpha_{Eu} = \frac{\alpha_\lambda}{m} = 1, \quad (3.50)$$

откуда при $\alpha_{Eu} = 1$

$$\alpha_\lambda = m. \quad (3.51)$$

Получим новые критериальные комплексы, учитывающие искажение масштабов. Для этой цели используем связь критериев, входящих в выражение (3.4), с гидравлическими сопротивлениями, а через них, учитывая (3.51), и с искажением геометрических масштабов m . При этом будем помнить, что искажение масштабов должно повлечь за собой $\alpha_{Fr} \neq 1$, $\alpha_{Re} \neq 1$ и $\alpha_I \neq 1$.

Как было показано А. П. Зегждой

$$\lambda = f\left(Re, \frac{R}{k}\right), \quad (3.52)$$

где $k = f(d)$:

В. А. Знаменский [17] получил аналитическое выражение этого закона для водоемов, рек и быстотоков, которое в масштабных коэффициентах имеет вид

$$\alpha_\lambda = \frac{\alpha_{H/d}^p}{\alpha_{Re}}. \quad (3.53)$$

Формула (3.40) показывает, что $\frac{\alpha_I}{\alpha_{Fr}^2} = \alpha_\lambda = m$. Учитывая это, а также формулы (3.50), (3.51) и (3.53), запишем новые критериальные комплексы:

$$\frac{\alpha_I}{\alpha_{Fr}^2 m} = 1, \quad \frac{\alpha_{H/d}^p}{\alpha_{Re} m} = 1, \quad \frac{\alpha_\lambda}{m} = 1. \quad (3.54)$$

Поскольку число Струхала или критерий гомохронности не зависит от гидравлических сопротивлений, постольку в критериальный комплекс, включающий число Но, величина m не должна вводиться. Однако этот комплекс все же будет отличаться от числа Но членом, учитывающим изменение масштаба скорости при моделировании «искаженных» потоков. Прежде чем записать новый комплекс, учитывающий гомохронность процессов, напомним, что масштаб скорости в этом случае по условию Фруда выражается формулой (3.43), а масштаб скорости, по Рейнольдсу, — $\alpha_v = \frac{\alpha_{Re}}{\alpha_H}$. Тогда при моделировании с учетом искажения имеем

$$\alpha_v = \alpha_{Fr} \sqrt{\alpha_H} = \frac{\alpha_{Re}}{\alpha_H}. \quad (3.55)$$

Выражение (3.55) не приводит к парадоксальному требованию равенства масштабов модели размеру натуры и может быть обеспечено при моделировании. В то же время оно показывает, что все масштабные соотношения, куда входит масштаб скорости, должны учитывать форсировку расходов (или, что то же, — α_{Fr}). Так как в критерий Но входит α_v , следует привести его с учетом (3.55) к виду

$$\alpha_{Ho} = \frac{\alpha_v \alpha_I}{\alpha_L} = \frac{\alpha_{Fr} \alpha_I m}{\alpha_H^{1/2}}. \quad (3.56)$$

Теперь можно составить критериальное условие, справедливое для потоков, которые с уменьшением размеров искажают свои геометрические пропорции и действующие силы

$$\frac{\alpha_H^{1/2}}{\alpha_{Fr} \alpha_I m} = \frac{\alpha_I}{\alpha_{Fr} m} = \frac{\alpha_{H/d}^p}{\alpha_{Re} m} = \frac{\alpha_\lambda}{m} = 1. \quad (3.57)$$

Выражение (3.57) получено при условии $\alpha_{Eu}=1$. Принятие этого условия совпадает с широко распространенным в теории и практике моделирования критерием $\frac{B}{H}\lambda=idem$, обычно используемым при решении задач плановой гидравлики (И. И. Леви, В. М. Лятхер, М. А. Михалев и др.).

Можно показать, что $\alpha_{Eu}=1$ есть частный случай моделирования. Для этой цели рассмотрим зависимости, изображенные на рис. 2.11, которые объединили в себе как точки, соответствующие всем типам русловых процессов, так и точки, соответствующие разномасштабным потокам в природе и в лаборатории. По оси ординат рис. 2.11 отложено число $\frac{B}{H}\lambda$, меняющееся в пределах 5 порядков для каждого типа руслового процесса, определяемого условием $z=idem$. Поскольку выше уже было показано, что в масштабных соотношениях $\frac{B}{H}\lambda$ совпадает с числом Эйлера, можно считать, что зависимость на рис. 2.11 показывает, что в природе при одном и том же типе процесса не обязательно $\alpha_{Eu}=1$. Рассмотрим, как должно измениться условие (3.57) при $\alpha_{Eu} \neq 1$. Прежде всего это условие изменит последний член

$$\alpha_\lambda = \alpha_{Eu} m, \quad (3.58)$$

тогда все члены условия (3.57), где α_λ заменялась на m , должны быть преобразованы с учетом (3.58). В результате получим

$$\frac{\alpha_{H/d}^{1/2}}{m \alpha_{Fr} \alpha_t} = \frac{\alpha_f}{\alpha_{Fr}^2 \alpha_{Eu} m} = \frac{\alpha_{H/d}^p}{\alpha_{Re} m \alpha_{Eu}} = \frac{\alpha_\lambda}{m \alpha_{Eu}} = 1. \quad (3.59)$$

В выражении (3.59) идентичность руслового процесса не задавалась каким-нибудь специальным критерием. Для этой цели рассмотрим аналитическое выражение, отображающее зависимость на рис. 2.11. Если выражение (2.63) записать в масштабных коэффициентах, то получим

$$\alpha_z = \frac{\alpha_\lambda}{m} \alpha_{H/d}. \quad (3.60)$$

Заменим в (3.60) значение α_λ по выражению (3.53), тогда

$$\alpha_z = \frac{\alpha_{H/d}^p \alpha_{H/d}}{m \alpha_{Re}} = 1. \quad (3.61)$$

Выражение (3.60) может быть записано и в виде

$$\alpha_z = \alpha_{Eu} \alpha_{H/d}. \quad (3.62)$$

Тогда при $\alpha_z=1$, что соответствует, исходя из рис. (2.11), условию подобия руслового процесса, имеем

$$\alpha_{Eu} = \frac{1}{\alpha_{H/d}}. \quad (3.63)$$

Подставляя (3.63) в (3.61), получаем

$$\alpha_z = \frac{\alpha_{H/d}^p}{m \alpha_{Re} \alpha_{Eu}} = 1, \quad (3.64)$$

где, по данным Знаменского, для водоемов $p=0,75$, а для быстротокров $p=2$, для русловых потоков $p \approx 1$. Выражение (3.64) показывает, что третий член критериального условия (3.59) есть не что иное, как критерий подобия руслового процесса z .

Таким образом, критериальное условие отображает единый закон гидравлических сопротивлений и транспорта наносов, который приводит к подобию руслового процесса с учетом естественного искажения масштабов и сил, свойственного натурным русловым потокам.

Поскольку выше было показано, что z может быть выражено через основные определяющие русловой процесс параметры, полученное критериальное условие (3.59) позволяет рассчитать размываемую модель со всеми необходимыми ее характеристиками.

В разработанном ранее автором методе расчета использовалось, как можно видеть, критериальное условие (3.57) при $\alpha_{Eu}=1$. Оказалось, как видно из сопоставления плановых и глубинных деформаций модельного русла с деформациями в натуре за 5-летний период, что этот метод позволяет получить искомое подобие модели и природы даже при частном случае критериального условия (3.59), каковым является (3.57).

4. ГИДРАВЛИЧЕСКИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ

4.1. Существующие затруднения и противоречия в области гидравлических сопротивлений русла

Долгое время единственной зависимостью для расчета гидравлических сопротивлений служила формула Шези. Появление графика Зегжды явилось знаменательным событием, которое позволило упорядочить гидравлические расчеты каналов, русел и моделей рек, уподобляя гидравлические сопротивления русел сопротивлению от равномерно размещенной по поверхности дна зернистой закрепленной шероховатости.

Долгое время определение λ , по Зегжде, являлось классическим и не оспаривалось. Однако единый закон развития русел, состоящий из взаимосвязанных закономерностей гидравлических сопротивлений и транспорта наносов, вступил в противоречие с раздельным использованием закономерности для λ вне связи со структурным транспортом донных наносов.

Попытки изучить влияние гряд на сопротивление русел по схеме, использованной А. П. Зегждой, показали, что закономерность, полученная Зегждой, является в значительной степени условной, поскольку при движении гряд имеется уже не одна система линий, а серия кривых, каждое семейство которых связано с данным типом донных форм (рис. 4.1). (Аналогичные зависимости были получены для резиновых шлангов и рукавов Шевелевым.) Каждое семейство линий $\lambda = f\left(\text{Re}, \frac{H}{\Delta}\right)$ свидетель-

ствовало о том, что оси координат этих семейств зависят в свою очередь от формы и характеристик гряд, которая, как мы видим из главы 1, сама является функцией характеристик потока и наносов. Круг замкнулся.

Таким образом, не найдя того единого закона, по которому развивается русло, по-видимому, нельзя и успешно решить задачу о гидравлических сопротивлениях.

Д. Кеннеди [94] назвал проблему гидравлических сопротивлений русла тем «камнем преткновения, о который споткнулся не один исследователь». Способность руслового потока менять свои границы и гидравлические сопротивления, взаимосвязывая те и другие для пропускания заданного расхода наносов, является тем качеством, которое отличает русла от каналов с жесткими стенками. По мнению Д. Кеннеди, прогноз зависимости $Q =$

$=f(H)$ для аллювиальных русел проблема первостепенной важности, которая упирается в незнание закона сопротивлений для естественных русел.

Давно установлено, что движение гряд (микроформ) в русле увеличивает сопротивления потоку в несколько раз. Поэтому исследованию гидравлических сопротивлений при грядовом движении наносов посвящено наибольшее количество работ в рассматриваемой области. Однако, как было показано еще Бруксом, одна и та же шероховатость может наблюдаться при нескольких расходах воды и при том же соотношении глубины и уклона, что приводит к формированию петель связи $Q=f(H)$. В то же время Сентюрк показал, что для рифелей и дюн (рифелей и баров) наблюдаются противоположные зависимости для λ от характеристик потока (см. рис. 1.4). Поэтому без учета специфики поведения микро- и мезоформ нельзя использовать те или иные зависимости для λ . Эти петли и связанное с ними явление принято называть «гистерезисом». Попытки объяснить гистерезис переформированием гряд все же недостаточно убедительно раскрывают физику этого явления и не объясняют, почему появляются иногда прямые, а иногда обратные петли.

Формула Шези, как известно, справедлива для равномерного установившегося потока. Однако отсутствие иных формул и иных исследований в этой области заставляет пользоваться формулой Шези и для непредусмотренных случаев. Сколь это справедливо, до сих пор является предметом умозрительных дискуссий. При обсуждении проблемы гидравлических сопротивлений русла можно встретиться с дискуссиями по поводу определяющих критериев. Поскольку перевод энергии в тепло осуществляется с помощью сил вязкости, роль числа Рейнольдса в этой проблеме очевидна.

Обнаружение рядом исследователей зависимости λ от числа Фруда и уклона свободной поверхности казалось бы противоречит вышесказанному. Но факт остается фактом. Поэтому возникает вопрос, какому же из критериев отдать предпочтение?

Среди исследователей долгое время было единодушное мнение по поводу того, что законы гидравлических сопротивлений спокойных и бурных потоков принципиально различны. Исследования Гогиберидзе [11] поколебали это мнение.

За последнее время появились работы, в которых оспаривается существование зоны квадратичного сопротивления

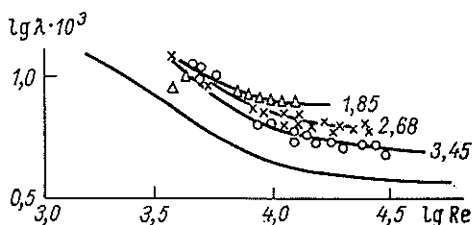


Рис. 4.1. $\lambda=f\left(\text{Re}, \frac{H}{\Delta}\right)$ для разных форм гряд, по Знаменской. (Для $\Delta/\lambda=0,04$.)

и выявляется масштабный эффект абсолютной шероховатости (вывод, противоречащий современным представлениям теории подобия). Обнаруженное Аккерсом и описанное в главе 2 увеличение гидравлических сопротивлений извилистого русла той же ширины и при тех же условиях выглядит парадоксальным и требует объяснения. Как видно из сказанного, в области гидравлических сопротивлений еще много «подводных камней, которые требуют чтобы их убрали с фарватера».

4.2. Влияние русловых форм на гидравлические сопротивления русла

Подробный критический обзор состояния науки по этому вопросу изложен в докладе Д. Кеннеди по линии ТАСК-комитета [94]¹. Д. Кеннеди рассмотрел главнейшие работы и достижения в области гидравлических сопротивлений. Среди них рассмотрены работы английской школы представителей режимной теории, разработавших морфометрические эмпирические соотношения между основными характеристиками потоков (в том числе и уклоны), использование которых при проектировании искусственных каналов Индии оказалось столь удачным, что обеспечило динамическую устойчивость этих каналов в течение многих лет их эксплуатации, и исследования Эйнштейна—Барбароссы, предложивших идею разделения сопротивления русла на сопротивление дна и сопротивления берегов. В дальнейшем эта идея была использована многими исследователями, в том числе и применительно к разделению донного сопротивления на сопротивления зернистой шероховатости и сопротивления гряд. Д. Кеннеди рассматривает также работы Гарде и Раджи, Саймонса—Ричардсона и Хаяши, попытавшихся экспериментально исследовать гидравлические сопротивления при грядовом дне разной формы и разработавших на этой основе методы определения λ для аллювиальных русел, носящих название «приспособление уклона» и «приспособление глубины». В том и другом методах либо уклон, либо глубина делятся (как у Эйнштейна λ) на две составляющие величины, одна из которых учитывает зернистую шероховатость, а другая — донные формы. Аналогичный способ для «приспособления скорости» в дальнейшем был разработан Хайни и Саймонсом.

Исследование Энгелунда основано на использовании теории подобия. Уклон энергии снова рассматривается в виде двух составляющих, далее от уклона Энгелунд переходит к рассмотрению касательных напряжений при зернистой шероховатости

¹ Все упоминающиеся в этом разделе работы без специальных ссылок на литературу можно найти в библиографическом списке упомянутой статьи [94].

и рифельно-дюнным дне. Принимая, что в двух динамически подобных потоках τ'_x имеет равные значения и увеличение τ'_x от аналогичных донных форм составляет одинаковую долю общих потерь энергии, Энгелунд получает расчетную формулу потерь энергии

$$\frac{v}{\sqrt{gH'I}} = 6 + 2,5 \ln \frac{H'}{2d_{65}}, \quad (4.1)$$

давшую неплохое соответствие с экспериментом Д. Кеннеди однако отмечает, что гипотеза Энгелунда, положенная им в основу расчетной формулы, к сожалению, не подтвердилась.

В. Ванони и Хванг экспериментально показали роль плотности размещения донных гряд на увеличение гидравлических сопротивлений.

В этом факте можно также убедиться при рассмотрении зависимости $n = f(Fr, v/\omega)$, изображенной на рис. 3.3, где области рифелей, характеризующей наибольшей густотой размещения донных форм, соответствуют наибольшие значения коэффициента шероховатости n , по Маннингу.

Д. Кеннеди рассматривает также исследование Знаменской, основанное на использовании мгновенного скоростного поля, позволяющего определить диссипацию энергии по формуле Стокса для скорости рассеяния энергии в точке. Расчет потерь энергии по разработанной формуле [15]

$$E = M\bar{\Phi} \Delta \lambda_r, \quad (4.2)$$

где E — потери энергии, г/с; $\bar{\Phi}$ — средняя скорость рассеяния энергии придонного слоя; Δ и λ_r — высота и длина гряды, был сопоставлен с независимыми лабораторными данными. Попытка распространить разработанную формулу на натурные условия показала, что при этих расчетах возникает неучтенный «масштабный эффект». Думается, что учет рассмотренного в предыдущей главе закона искажения масштабов позволит в дальнейшем усовершенствовать формулу (4.2), которая станет пригодной и для натуральных условий.

Ловер и Д. Кеннеди на основании лабораторных и натуральных данных получили графическую зависимость коэффициента гидравлических сопротивлений при гладком дне аллювиальных потоков для случая отсутствия поверхностных волн от числа Рей-

нольдса $\frac{vR_6}{\nu}$ и относительной гладкости $\frac{R_6}{d_{50}}$, где R_6 — гидравлический радиус сечения с учетом боковых стенок. Эта зависимость изображена на рис. 4.2. Условными знаками на этом рисунке обозначены данные по некоторым крупным и наиболее известным рекам Америки. (У Ловера и Кеннеди на графике (рис. 4.2) имеется существенно большее количество точек, как и на рис. 4.3. Для удобства пользования графиком многие

точки с этих рисунков нами сняты, поэтому отсылаем заинтересованного читателя к первоисточнику.) Алам и Кеннеди пытались получить обобщенную зависимость для коэффициента гидравлических сопротивлений как функцию тех величин, которые определяют возникновение и размеры донных форм, без разделения уклона или коэффициента трения на компоненты. В результате был получен график, изображенный на рис. 4.3, который позволяет рассчитать гидравлические сопротивления λ'' , вызываемые только грядами. Тогда общее сопротивление λ определяется суммой коэффициентов $\lambda_{гд}$ и λ'' , которые находятся по рис. 4.2 и 4.3. Искомой величиной является R_b , определяемая подбором и методом приближений.

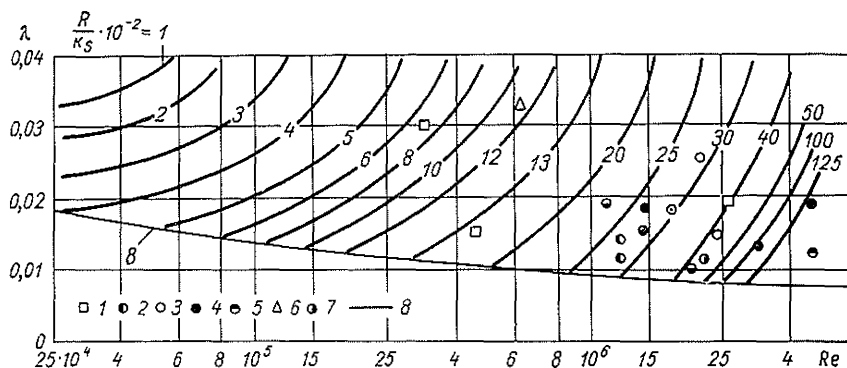


Рис. 4.2. Зависимость коэффициента гидравлических сопротивлений для гладкого дна от Re , по Ловеру и Кеннеди.

1 и 2 — р. Рио-Гранде у Берналилло, соответственно в разных створах, 3 — то же у сан. Антонио, 4 — р. Миссури у Омаха, 5 — р. Элхорн у Ватерлоо, 6 — р. Кангберо, 7 — р. Колорадо, 8 — кривая гладкостенного сопротивления, по Прандтлю.

Алам и Кеннеди показали, что для горизонтального участка кривых $F_{гд}$, где λ'' не зависит от R_b/d_{50} , оказывается справедливым решение, полученное Эйнштейном — Барбароссой,

$$\psi' = 1,68 \frac{8gd_{35}}{\lambda'v^2} \sim \frac{gd_{50}}{v^2}. \quad (4.3)$$

Это выражение можно было бы представить в виде

$$\psi' = \frac{1,68 Fr_d^2}{IF_d^2}, \quad (4.4)$$

из которого видно, что ψ' — есть функция тех же аргументов, что использованы Аламом и Кеннеди на рис. 4.2. Отсюда можно сделать вывод, что расчет сопротивлений, по Эйнштейну — Барбароссе, неприменим при малых значениях R_b/d_{50} , где λ'' зависит от R/d_{50} . Интересны выводы, которые сделал Кеннеди, анализируя существующие методы оценки гидравлических сопротивле-

ний аллювиальных потоков. С его точки зрения, неучет температуры воды ни в одной из формул является серьезным их недостатком, так как при некоторых состояниях потока изменение температуры всего на несколько градусов может привести к резкой смене форм дна. Влияние температуры потока сказывается на вязкости жидкости, гидравлической крупности, а значит на

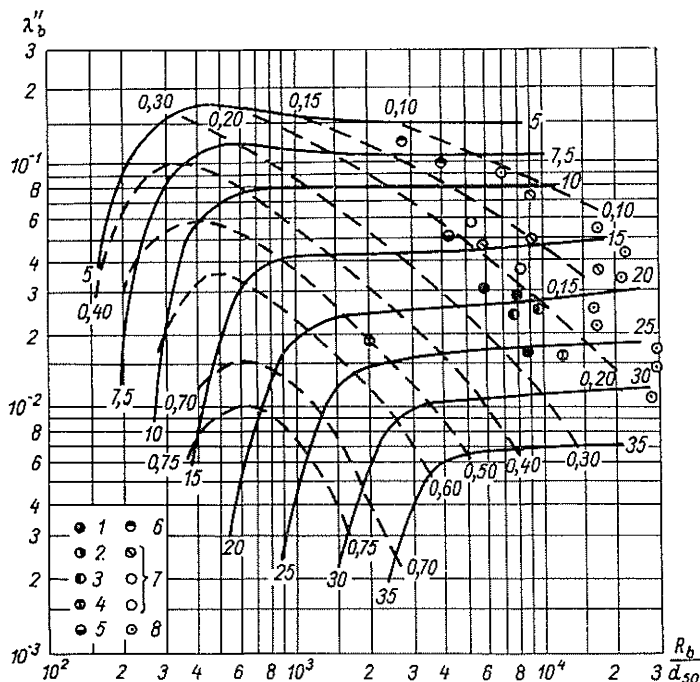


Рис. 4.3. Зависимость коэффициента λ_b'' для грядового дна, от числа Фруда и $\frac{R_b}{d_{50}}$, по Аламу и Кеннеди.

1 — р. Миссури — у Пирре, 2 — р. Миссури у Рондоли, 3 — р. Миссури у Омаха, 4 — р. Платта, 5 — р. Элхорн, 6 — Акроп, 7 — р. Рио-Гранде,

8 — каналы Пакистана, — $Fr_d = \frac{v}{\sqrt{g d_{50}}}$, - - - $Fr_b = \frac{v}{\sqrt{g R_b}}$.

подвижности частиц, что приведет и к изменению форм дна и вследствие этого к изменению λ . Другим важным недостатком рассмотренных методов расчета λ Кеннеди считает незамкнутость системы из семи уравнений, выражающих взаимосвязь транспорта наносов, формы русла и гидравлических сопротивлений.

Рассматривая равномерное установившееся течение в аллювиальном русле, Кеннеди устанавливает, что характеристики

потока и наносов могут быть объединены в семь принципиальных связей:

- 1) условие неразрывности $Q = BHv$;
- 2) зависимость для гидравлических сопротивлений потоку, которые, по Шези, определяются как

$$v = \sqrt{\frac{2g}{\lambda}} \sqrt{RI}^1;$$

3) соотношение шероховатости и λ , которое, как констатирует Кеннеди, пока еще не сформулировано точно;

4) формула расхода наносов, которая еще не найдена в «убедительном виде»;

5) связь соотношения ширины и глубины русла с другими характеристиками не найдена. Известно, что $B = \text{const}$ для данного лотка;

6) связь H и R с другими параметрами, характеризующими форму русла, точно не установлена;

7) связь соотношения между плановыми формами русла и потока и свойствами наносов не сформулирована.

Устанавливая, что для лотков количество связей уменьшается из-за неизменности ширины (условия 5 и 7 опускаются), Кеннеди выделяет также длинные и короткие участки и периоды развития речных аллювиальных потоков, для которых система независимых и зависимых переменных может приводить к разным условиям однозначности или многозначности связей, рассмотренных в главе 1 (табл. 1.2). Далее Кеннеди констатирует, что ни в одну из рассмотренных формул для λ не входит расход или концентрация донных наносов. Это допустимо только тогда, когда в формулу для λ входят все независимые переменные, от которых зависит Q_t , причем выбранные с учетом удовлетворения условиям однозначности по табл. 1.2. Д. Кеннеди считает также, что выбор независимых переменных должен учитывать скорость изменения зависимой величины от скорости изменения аргумента: ощутимым изменениям аргумента должно отвечать ощутимое изменение функции.

По мнению Кеннеди, было бы слишком оптимистичным ожидать, что коэффициент гидравлических сопротивлений в естественных руслах окажется функцией лишь одного параметра. Простой анализ размерностей может показать, что λ должно быть функцией нескольких безразмерных комплексов величин, из которых ни один не является преобладающим. В то же время отыскание отдельных связей λ , специфичных как для каждого песка, так и для каждой формы дна, предлагаемых некоторыми иссле-

¹ По Кеннеди, $v = \sqrt{\frac{8g}{\lambda}} \sqrt{RI}$.

дователями, кажутся Кеннеди плохо обоснованными, поскольку естественные процессы обычно не столь беспорядочны или лишены общих тенденций.

4.3. Гидравлические сопротивления меандрирующих рек

Как мы рассматривали в главе 2, специальные экспериментальные исследования гидравлических сопротивлений, возникающих при побочном процессе и при ограниченном меандрировании, были проведены А. Аккерсом и Ф. Чарльтоном. Эти исследователи получили выводы об увеличении уклона свободной поверхности в меандрирующем русле, которые они связывают с отрывом потока за поворотом. Этот вывод совпадает с мнением Леопольда, который вместе с соавторами считает, что сопротивление меандрирующих и разбросанных русел (осередкового типа) больше, чем прямолинейных русел (при побочном и ленточногрядовом типе руслового процесса). К этому же выводу можно прийти, анализируя рис. 2.11 и 3.3. При усовершенствовании типизации руслового процесса было показано, что прямолинейные русла при ленточногрядовом и побочном процессах, а также осередковые русла относятся к активным русловым процессам, в период осуществления которых на основных формах отсутствуют вторичные гряды и микроформы высших порядков. Меандрирование (в том числе и ограниченное) является пассивным процессом, который происходит при наличии вторичных русловых форм, увеличивающих сопротивление русла. Увеличение гидравлических сопротивлений активных типов руслового процесса происходит по аналогии с грядами от ленточных гряд к побочным и осередкам (рис. 3.3).

Выводы, полученные Аккерсом, касающиеся этой проблемы, подробно изложены в главе 2. Отметим, что Аккерс получил формулу для прямых русел (для ограниченного меандрирования)

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 2 \lg 12,3 \frac{H}{\Delta}, \quad (4.5)$$

где Δ меняется от 3 до 15 см для прямых русел и от 2 до 15 см для слабоизвилистых рек. Как видим, эта формула не отвечает требованиям, предъявленным Д. Кеннеди к формулам подобного типа, и по-видимому отражает взаимосвязь гидравлических характеристик исследованного модельного русла, в котором такие критерии как Fg , Re_d , Fg_d менялись мало или не менялись совсем, а поэтому их влияние завуалировано и учтено числовым коэффициентом.

4.4. Исследование определяющих критериев зоны квадратичного сопротивления и масштабного эффекта

В последние годы был выдвинут ряд гипотез и соображений, по-новому освещающих природу гидравлических сопротивлений открытых равномерных турбулентных потоков (В. Н. Гончаров, А. Д. Альтшуль, И. К. Никитин, О. М. Айвазян и др.). Были также предприняты попытки экспериментальной проверки выдвинутых гипотез, среди которых остановимся на работе А. А. Алекперова [1], показавшего, что между положениями и рекомендациями полуэмпирической теории сопротивления и результатами экспериментальных исследований имеются существенные расхождения.

Важный вывод, к которому пришел Алекперов заключается в том, что наличие квадратичного закона сопротивления не было установлено ни в экспериментах Алекперова, ни в большинстве предыдущих, проанализированных Алекперовым исследований, несмотря на широкий диапазон изменения чисел Re . Другим важным выводом работы Алекперова является обнаружение масштабного эффекта при анализе экспериментальных данных. Гидравлические сопротивления оказались пропорциональны не только относительной высоте выступов, но и их абсолютным размерам. Этот вывод, приведший самого исследователя в некоторое недоумение, является подтверждением всеобщности закона искажения масштабов, распространяющегося и на потоки с жесткими стенками.

А. А. Алекперов установил определяющие параметры, в числе которых, кроме Δ/R и уклона, оказалось и число Фруда. Заметим, что к аналогичному выводу пришла и Н. Д. Касьянова [23], включившая в число определяющих критериев еще параметр формы русла и параметр шероховатости (рис. 4.4).

Обнаруженная Алекперовым неидентичность гидравлических сопротивлений установившихся и плавноизменяющихся потоков является чрезвычайно важным обстоятельством.

При исследовании гидравлических сопротивлений по длине иногда исходят из рассмотрения уравнений движения Рейнольдса и энергии турбулентности (О. Ф. Васильев и В. К. Квон, Е. В. Еременко, С. Б. Марков и др.). Однако отсутствие экспериментальных данных по неустановившимся течениям не позволяет в полной мере использовать это гидродинамическое направление.

Другое направление исследования интегрально оценивает физические процессы при неустановившемся режиме течения (Н. А. Панчурин и Н. Н. Лимарь [32]).

Рядом ученых первого направления, в том числе Марковым [36], было получено, что ускорение потока вызывает увеличе-

ние $\lambda_{\text{пу}}$, а замедление ведет к его уменьшению. Н. Н. Лимарь установил, что гидравлические сопротивления при неустановившемся режиме $\lambda_{\text{пу}}$ могут быть выражены через соответствующее эквивалентное значение λ_y для установившегося режима с учетом параметров нестационарности Π' и Π''

$$\lambda_{\text{пу}} = \lambda_y [1 - (\Pi' + \Pi'')], \quad (4.6)$$

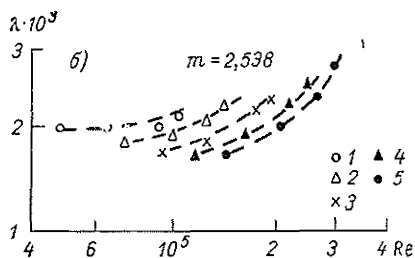
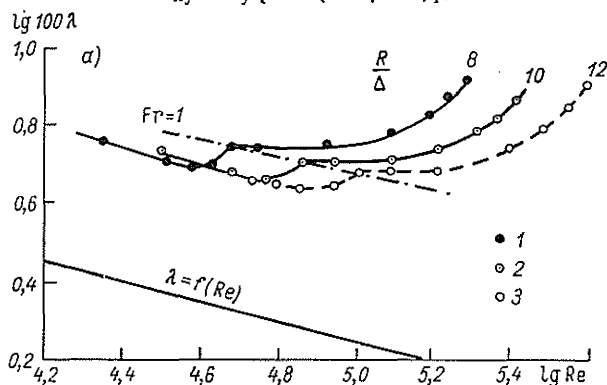


Рис. 4.4. Зависимость $\lambda = f(\lg Re, \frac{R}{\Delta}, Fr, m)$.

a — по данным Алекперова: 1 — $\frac{R}{\Delta} = 8,0$, 2 — $\frac{R}{\Delta} = 10$, 3 — $\frac{R}{\Delta} = 12$; b — по данным Касьяновой: 1 — $R = 2,0$ см, 2 — $R = 2,5$ см; 3 — $R = 3,0$ см; 4 — $R = 3,5$ см; 5 — $R = 4,0$ см.

где $\Pi' = \frac{2\beta d}{\lambda_y v^2} \frac{dv}{dt}$ характеризует энергию инерционных сил,

связанных с разгоном жидкости; $\Pi'' = \frac{d}{\lambda_y v} \frac{d\beta}{dt}$ характеризует энергию инерционных сил, вызванных деформацией кинематической структуры потока; β — коэффициент количества движения, d — диаметр трубы.

Как видно из сказанного, выводы Маркова, Лимарь и Алекперова в основном совпадают.

Однако этими исследованиями также нельзя еще объяснить причину образования прямых или обратных петель в кривой связи $Q = f(H)$, природа которых, по нашему мнению, находится

в природе изменчивости донных форм в связи с изменением гидравлических характеристик. Причем ускорение потока на подъеме ведет к перестройке русловых форм, а замедление потока на спаде ведет к сохранению унаследованных форм, созданных предыдущим режимом. Конкретное сочетание условий при учете вызываемых этими формами сопротивлений может привести к появлению петель разного знака.

Интересными представляются и полученные Алекперовым системы кривых, построенных в классических координатах $\lambda = f\left(\text{Re}, \frac{H}{\Delta}\right)$. Результаты исследований Алекперова подтвердили данные Шевелева, Знаменской и др. о смещении линии гладкостенного сопротивления в зависимости от формы донной шероховатости. Аналогичный вывод был получен Н. А. Касьяновой, обнаружившей смещение линии гладкостенного сопротивления при изменении формы сечения (рис. 4.4). Специфический вид кривых в области больших значений числа Re с изломом при значении $\text{Fr}=1,0$, позволили Алекперову сделать вывод о существовании разного закона гидравлических сопротивлений для спокойных и бурных потоков (к аналогичному выводу пришла и Касьянова). Вместе с тем Алекперов утверждает, что по данным других исследователей можно обнаружить в области бурных потоков не только восходящие, но и нисходящие кривые, на основании чего делается вывод о том, что область квадратичного сопротивления, по-видимому, справедлива лишь для узкого диапазона B/H . К такому заключению Алекперов пришел на основании анализа изменения λ в плоских и пространственных потоках. Оказалось, что в плоских потоках при малых значениях B/H гидравлические сопротивления с увеличением Re убывают, а для пространственных потоков наблюдается обратная зависимость. Этот вывод, как нам кажется, очень интересен, поскольку он подтверждает выводы, полученные при рассмотрении возникновения поперечной неустойчивости потока, ведущей к развитию рифелей, и возникновению продольной неустойчивости, ведущей к появлению баров. Гидравлические сопротивления рифелей растут с увеличением Re , а гидравлические сопротивления баров уменьшаются. По-видимому, этот закон является всеобщим.

Сделанный Алекперовым вывод о существовании различных закономерностей трения для спокойных и бурных потоков кажется нам спорным. Ложкообразный характер кривых сопротивления, как было показано Моррисом [86], возникает при равномерно размещенной равно размера зернистой шероховатости. Такая шероховатость использовалась и в опытах Алекперова. Шероховатость при смешанном песке, неоднородно размещенная по поверхности, равно как шероховатость гряд ведет к появлению нисходящих кривых $\lambda = f(\text{Re})$ в переходной области без образования характерной впадины. Сопряжение таких

кривых с кривыми бурного режима происходит без излома линий. По крайней мере такой излом не был обнаружен другими исследователями. Тогда вывод Гогиберидзе [11] о наличии единого закона сопротивления, полученный на основании широкого диапазона чисел Фруда от малых его значений до 8, является более убедительным. Во всяком случае, вопрос этот требует дополнительного рассмотрения. Сам же факт восходящих кривых в области больших чисел Re и Fr не может служить доказательством разного закона λ , если при переходе от спокойных потоков к бурным не было разрыва функции λ .

В. А. Знаменский [17], как уже упоминалось в главе 3, попытался обобщить данные лабораторных и натурных исследований, относящихся к гидравлическим сопротивлениям водоемов, рек и быстротоков. Эта зависимость представлена на рис. 4.5, а ее аналитическое выражение может быть представлено в виде

$$\lambda = \frac{I}{Fr^2} = \frac{\left(\frac{H}{\Delta}\right)^p}{Re}, \quad (4.7)$$

где $p=0,75$ для водоемов, $p=2,0$ для быстротоков, для рек значение p не было определено. Как было показано в главе 3, использование выражения (4.6) привело к совпадению критериального комплекса, вытекающего из условия (3.4) и полученного независимым путем по экспериментальным данным (см. рис. 2.11).

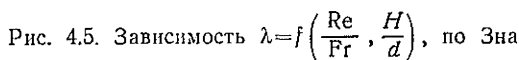
Рассмотрение выражения (4.6) свидетельствует о том, что λ является функцией как числа Фруда и уклона, так и относительной шероховатости и числа Re . Это означает, что анализ λ должен производиться как в координатах Fr и I , так и в координатах Re и H/Δ или в некоторых комплексных координатах.

Поскольку форма связи λ , Re и H/Δ для русловых потоков детально не исследовалась, что выразилось также отсутствием рекомендуемого значения для p , возникает мысль о том, что для этой цели может быть использована также и зависимость, изображенная на рис. 2.11, и аналитическое выражение этой зависимости. Поэтому из (2.63) и (2.69) получим

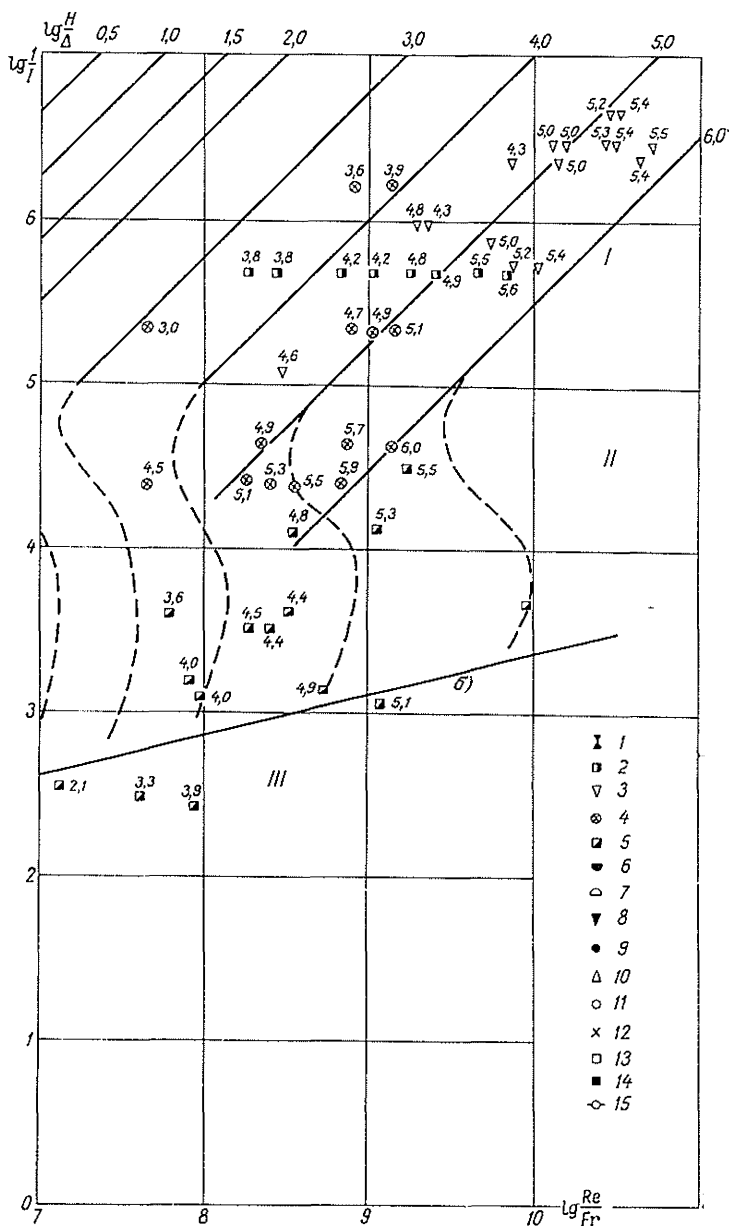
$$\lambda = \eta g \frac{Q}{Q_\tau} Fr^2 Fr_d^2 \frac{H}{d} = \eta g \frac{Q}{Q_\tau} Fr^4 \frac{H}{d}. \quad (4.8)$$

Как видно из выражения (4.8), гидравлические сопротивления здесь связаны как с расходом наносов Q_τ , так и с числом Фруда и критерием подвижности, по Великанову, так и с относительной шероховатостью дна.

Коэффициент $\eta=2\xi$, где ξ определяется по формуле (2.70) и зависит от свойств жидкости и наносов. Его величину для известных λ и других переменных можно определить либо по формуле (4.8), либо, определив величины коэффициентов пропорциональности α и β в функциях $N=f(C)$ и $\Gamma=f\left(\frac{v}{w}\right)$, по (2.70).



α — граница ламинарной зоны, δ — граница гладкого течения, γ — натурные данные по Невской губе, β — натурные данные по Бирскому водохранилищу, ε — натурные данные по риманальным данным (по Никитину), ζ — по Саймон, η — по Яхтас и Теперну, θ — по Пушкареву, ι — цифры у точек —



менскому, для водоемов (I), рек (II) и быстротоков (III).

для (по Блазиусу); 1 — опытные данные (по Знаменскому), 2 — натур-
по Куйбышевскому водохранилищу, 4 — натурные данные по Новоси-
рекам (по Антроповскому), 6 — натурные данные по рекам и экспе-
су и Ричардсону, 8 — по Цзубаки и Синухара, 9 — по Знаменской,
по Базену, 13 — по Айвазяну; 14 — по Пикалову, 15 — по Абесадзе;
величина $\lg \frac{H}{\lambda}$.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алекперов А. А. Исследование закономерностей сопротивления равномерных и плавно изменяющихся спокойных и бурных потоков в руслах с искусственной равнозернистой шероховатостью.— Автореферат. дисс. Изд. ВНИИГиМ, М., 1974. 22 с.
2. Алтунин В. С. Моделирование руслового процесса при стеснении потока сооружением мостового перехода.— «Сб. ЦНИИС», 1969. № 26, 166 с.
3. Андреев О. В. и Ярославцев И. А. Вопросы учета руслового процесса при проектировании мостовых переходов. М., Трансжелдориздат, 1953. 40 с.
4. Анциферов С. М. О механизме образования песчаных волн.— «Метеорология и гидрология», 1969, № 3, с. 79—86.
5. Векслер А. Б., Доненберг В. М. Механика русел и седиментация. Л., «Энергия», 1974. 70 с.
6. Великанов М. А. Морфометрия равнинных рек как основа моделирования руслового процесса.— «Тр. III Всесоюз. гидрол. съезда», 1960, т. 5, с. 262—270.
7. Гвоздев В. С. Пропуск паводка на пойме при низконапорных плотинах. М., Госстройиздат, 1956. 80 с.
8. Гергов Г. И. Русловые процессы рек Болгарии.— Автореферат, дисс. Изд. ВНИГЛ ГГИ, 1974, 24 с.
9. Гидравлично-морфологические исследования рек и водоемов.— «Тр. ГГИ», 1969, вып. 169, 208 с.
10. Гидроморфологические исследования пойменного и руслового процессов.— «Тр. ГГИ», 1970, вып. 183, 212 с.
11. Гогиберидзе Л. Г. Экспериментальное исследование открытого бурного потока.— Автореферат дисс. Изд. ГрузНИИЭГС, Тбилиси, 1972. 28 с.
12. Гришанин К. В. Устойчивость русел рек и каналов. Л., Гидрометеоздат, 1974. 144 с.
13. Железняков Г. В. Гидравлическое обоснование методов речной гидрометрии. М.—Л., Изд. АН СССР, 1950. 164 с.
14. Железняков Г. В., Дебольский В. К. О грядовом движении наносов при их различной плотности.— «Докл. Всесоюз. Акад. с.-х. наук им. В. И. Ленина», М., «Колос», 1971, с. 42—45.
15. Знаменская Н. С. Грядовое движение наносов. Л., Гидрометеоздат, 1968. 186 с.
16. Знаменская Н. С. Влияние грядового движения наносов на формирование русла.— В кн.: Актуальные вопросы регулирования рек и движение наносов. Будапешт, 1968, с. 1—5.
17. Знаменский В. А. Сравнительная оценка потерь энергии в водоемах спокойных и бурных потоках.— «Тр. ГГИ», 1973, вып. 203, с. 186—199.
18. Зубков Н. С. Некоторые особенности гидрологического режима реки Амударьи.— «Тр. ГГИ», 1976, вып. 234.
19. Исследование морфологии и гидравлики рек и водоемов.— «Тр. ГГИ», 1973. Вып. 209, с. 168.

20. Карасев И. Ф. Распределение продольных скоростей течений в руслах и поймах рек.— «Тр. ГГИ», 1973, вып. 202, с. 1—18.
21. Караушев А. В. Подобие открытых потоков при турбулентном режиме.— «Тр. ГГИ», 1948, вып. 4, с. 159—174.
22. Караушев А. В. Речная гидравлика. Л., Гидрометеониздат, 1969. 416 с.
23. Касьянова Н. Д. Влияние заложения откосов русел на кинематику потока и потери напора.— Автореферат дисс. КАДИ, Киев, 1974. 24 с.
24. Кнороз В. С. Влияние макрошероховатости русла на его гидравлическое сопротивление.— «Изв. ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева», 1959, т. 62, с. 54—75.
25. Кондратьев Н. Е. и Попов И. В. Теоретические основы фонового прогноза руслового процесса на реке Дунай.— «Труды 6-й конференции Придунайских стран». Киев, 1971, с. 1—18.
26. Кондратьев Н. Е. Основы гидрометеорологической теории руслового процесса.— В кн.: Влияние водохранилищ на поверхностный и подземный сток. МГД., М., ЮНЕСКО, 1972, с. 85—105.
27. Кондратьев Н. Е., Трахтенберг Б. К. Гидравлический расчет плёсовой ложбины.— «Тр. ГГИ», 1974, вып. 216, с. 5—18.
28. Копалиани З. Д. Лабораторные исследования грядового движения крупных наносов.— «Тр. ГГИ», 1972, вып. 204, с. 61—75.
29. Кривошей М. И. Применение статистических и вероятностных методов исследования к анализу плановых деформаций свободномеандрирующих рек.— «Тр. ГГИ», 1972, вып. 195, с. 33—52.
30. Кудряшов А. Ф. Опыт исследования закономерностей русловых процессов на размываемых моделях.— Автореферат дисс. Изд. Лен. ин-та инж. водного транспорта, 1958. 22 с.
31. Леви И. И. Моделирование гидравлических явлений. Л., «Энергия», 1967. 246 с.
32. Лимарь Н. Н. Теоретическо-экспериментальное исследование местных гидравлических сопротивлений в неустановившихся напорных потоках.— Автореферат дисс. Изд. ЛИВТ, 1973. 36 с.
33. Лосиевский А. И. Лабораторные исследования процессов образования перекатов.— «Тр. ЦНИИВГ», 1934. 128 с.
34. Лятхер В. М. и Прудовский А. М. Исследование открытых потоков на напорных моделях.— М., «Энергия», 1971. 168 с.
35. Маккавеев В. М. Поперечные течения в призматическом русле и их возбуждение.— «Тр. ГГИ», 1947, вып. 2(56), с. 115—133.
36. Марков С. Б. Исследование кинематических характеристик и гидравлических сопротивлений в неустановившихся напорных турбулентных потоках.— Автореферат дисс. Киев. Изд. АН УССР, 1971. 18 с.
37. Михайлова Н. А. Перенос твердых частиц турбулентными потоками воды. Л., Гидрометеониздат, 1966. 234 с.
38. Михалев М. А. Гидравлический расчет потоков с водоворотной областью. Л., «Энергия», 1971. 184 с.
39. Морфология речных русел и их моделирование.— «Сб. работ Госстрой СССР ВОДГЕО», 1972. 113 с.
40. Ныrkов Н. Теория речных потоков и вообще о потоках материальных частиц. Вильна, 1906, тип. «Русский почин», 213 с.
41. Офицеров А. С. Река и вторичные течения.— В кн.: Русловые процессы. М., Изд. АН СССР, 1958, с. 58—69.
42. Попов И. В. Деформация речных русел и гидротехническое строительство. Л., Гидрометеониздат, 1969. 363 с.
43. Россинский К. И., Кузьмин И. А. Закономерности формирования речных русел.— В кн.: Русловые процессы. М., Изд. АН СССР, 1958, с. 5—15.
44. Ржаницы Н. А. Морфологические и гидрологические закономерности строения речной сети. Л., Гидрометеониздат, 1960. 238 с.
45. Розовский И. Л., Еременко Е. В., Базилевич В. Н. Неустановившееся движение водного потока ниже гидроэлектростанций и его влияние на русло. Киев, «Наукова Думка», 1967. 187 с.

46. Романовский В. В. Экспериментальное исследование гидравлической крупности наносов.— «Тр. ГГИ», 1972, вып. 191, с. 111—137.
47. Руслевой процесс. Под редакцией Н. Е. Кондратьева. Л., Гидрометеониздат, 1959. 371 с.
48. Скородумов Д. Е. Вопросы гидравлики пойменных русел в связи с задачами построения и экстраполяции кривых расходов воды.— «Тр. ГГИ», 1965, вып. 128, с. 17—23.
49. Чернышев Ф. М., Борщевский Ю. Г. Определение расхода влеко-
мых наносов через параллельные песчаные гряды.— «Тр. НИИВТ», 1968,
вып. 39, с. 3—21.
50. Шарашкина Н. С. О периодическом расширении речных русел.— В кн.:
Руслевые процессы. М., Изд. АН СССР, 1958, с. 140—154.
51. Шатберашвили П. А. О моделировании руслового процесса.— «Тр.
ГрузНИИГиМ», вып. 26, 1968, с. 49—55.
52. Шуляк Б. А. Физика волн на поверхности сыпучей среды и жидкости.
М., «Наука», 1971. 400 с.
53. Яковлева Т. И. Скоростное поле потока на одиночном изгибе.— Авто-
реферат дисс. Изд. ЛГМИ, 1968. 15 с.
54. Ярославцев И. А. Особенности руслового процесса на излучине ре-
ки в паводок.— «Тр. ГГИ», 1966, вып. 136, с. 77—81.
55. Ярославцев И. А. Исследование работы транспортных сооружений на
жестких искаженных моделях.— «Тр. МИИЖТ», вып., 1957, с. 115—138.
56. Ackers P. Similarity criteria for Mobile Bed Models. Proc. of XV con-
gress IAHR. Istanbul Türkiye, 1973, vol. 5, p. 61—64.
57. Ackers P., Charlton F. The slope and Resistance of small meandering
channels. Proc. The Institute of Civil Engineers, 1970. Suppl. (XV) Paper
7362 S, pp. 349—370.
58. Ackers P., Charlton F. G. The geometry of small meandering streams.
The Institute of Civil Engineers. Proc. Paper 7328 S, 1970 Supplement
(xii) pp. 289—317.
59. Ackers P. Experiments on small streams in alluvium. Jour. Hydraul. Div.
Proc. ASCE. 1964, HY4 pp. 1—37.
60. Ackers P., Charlton F. Dimensional analysis of alluvial channels with
special reference to meander length. Jour. Hyd. Res., 1970, vol. B, N 3,
p. 287—314.
61. Allen J. R. L. On the geometry of current ripples in relation to stability
of fluid flow. Geografiska Annaler, 1969, A51, N 1—2, p. 61—96.
62. Ashida K., Tanaka J. An experimental study on sand waves. Rep.
DPRJ, N 9, March 1966, Kyoto, Japan, pp. 445—456.
63. Ashida K., Narai S. The Structure of Movable Bed Configuration.
Repr. from Bull. Disaster Prevention Research Inst. Kyoto University,
vol. 19, 1969, pp. 15—29.
64. Bogardi J. Sediment transport in Alluvial Streams. Akademiai Kiado
Budapest 1974, 826 p.
65. Callander. Instability and river channels. J. of Fluid Mechanics. 1968,
v. 36, N 3, pp. 465—480.
66. Carlston R. The relation of free meander geometry to stream discharge
and its geomorphic implications. Amer. Journ. of Sci., vol. 263, Dec. 1965,
pp. 864—885.
67. Chabert J. et JL Chauvin. Formation des dunes et des rides les
modeles fluviaux. Bulletin du centre de recherches et d'essais de Chatou,
N 4 juin, 1963, pp. 31—51.
68. Chitale, S. V. River Channel Patterns S. of H. D. ASCE. v-96. HY-1.
1970, pp. 201—220.
69. Colby B. and Scott K. Effects of Water temperature on the Discharge
of Bed Material. Geol. Survey Prof. Paper 462—6. U. S. Government Print
office, Washington, 1965, 25 p.
70. De Vries D. M. Solving River problems by hydraulic and mathematical
models Polish Academy of Sciences Institute of Hydro-Engineering,
Gdansk, 1969, 47 p.

71. Einstein H. A. Impact of the environment on hydraulic research. Lecture on the XIV Congress of IAHR 1971, Paris, France, vol. 6, pp. 7—16.
72. Engelund F. Hydraulic Resistance of alluvial streams. Proc. ASCE (J. Hydr. Div.), 1966, v. 92, N HY-2, pp. 315—326.
73. Galay V. J. Observed forms of bed roughness in an unstable gravel river. Proceedings of XII congress IAHR, vol. 1 Fort Collins, USA, 1967, pp. 85—95.
74. Garde R. J. Analysis of distorted river models with movable beds. "Irrigat. and Power", 1958, N 4, pp. 421—431.
75. Gill M. A. Height of sand dunes in open channel flows. J. of the Hydraul. Div. Proc. of the ASCE, 1971, vol. 97, HY2 12.
76. Harrison A. and Melema W. Movable Bed Model for Alluvial Channel Studies. Proc. of the XII Congress IAHR Fort Collins USA, 1967, pp. 202—269.
77. Hayashi T. Formation of dunes and antidunes in open channels. Proc. ASCE. Jour. Hydraul. Div., 1970, vol. 96, NHY 2, pp. 357—366.
78. Herbertson J. Scaling Procedures for mobile bed hydraulic models in terms of similitude theory. J. of Hydraulic research, vol. 7, N 3, 1969, pp. 315—353.
79. Hill H. M., Robinson A. I., et al. On the occurrence of bed forms in alluvial channels. Proc. of XIV Congress of IAHR, v. 3, 1971, Paris, France, pp. 91—100.
80. Inokuti S., Sukegawa N. et al. On the characteristics of flow in alluvial channels. Proc. 12th HEC, JSCE, 1968, pp. 131—136.
81. Kennedy J. F. The formation of sediment ripples, dunes and antidunes. Annual review of fluid mechanics. 1969. Palo alto, Calif., vol. 1, pp. 147—168.
82. Komura S. and Shen H. W. Meandering tendencies in straight Alluvial Channels. J. the Hydraulics Div. Proc. of Amer. Soc. of Civ. Eng., 1968, vol. 94, HY-Y. pp. 997—1016.
83. Koryukin S. N. and others. Interrelationship of Riverbed and floodplain's formation of the Oka part. Proc. of XIV Congr. IAHR, 1971, Paris, vol. 5, pp. 153—159.
84. Leopold L. B. and Wolman M. River channel patterns: braided, meandering and straight. U. S. Geol. Survey Proc. Paper 262-B, 1957, 48 p.
85. Mercer A. G. and Haque M. J. Ripple profiles modeled mathematically. J. of the Hydraul. Div. Proc. of ASCE. 1973, NHY3, 460, vol. 99, pp. 441—460.
86. Morris H. M. A new concept of flow in rough conduits. J. Pr. ASCE, 1950, vol. 50, N 390, pp. 95—114.
87. Nordin C. F., Algert S. M. Spectral analysis of sand waves. Proc. ASCE. (S. Hydr. Div.). 1966. v. 92, HY 5, pp. 95—114.
88. Neill C. R. Bed forms in the Lower Red Deer River, Alberta S. of Hydrology, vol. VII, N 1, 1968, Amsterdam, pp. 61—67.
89. Outline of Recent Hydraulic Research in Japan. Guide book to the thirteenth Congress of the IAHR. Kyoto. Japan, 1969, 192 p.
90. Pratt C. and Smith K. Ripple and dune phases in narrowly graded sand. J. of the Hydraul. Div. Proc. of the ASCE, 1972, vol. 98, NO HY5, pp. 859—874.
91. River Mechanics. Edited and Published by Hsien Wen Shen. Fort Collins, Colorado, USA, 1971, vol. 1, p. I.—XIX—79.
92. Sahgal P. and Singh B. Mechanism of Ripple Formation on Granular Beds. J. Irrigation and Power October 1973, pp. 387—396.
93. Sediment Control Methods reports by Task Committee on Preparation of Sedimentation. Hydraulic Div. Pr. of ASCE, 1972, vol. 98, No. HY7, pp. 1295—1326.
94. Sediment transportation mechanics: F. Hydraulic relations for alluvial streams. by TASK Committee for preparation of the Sedim. Manual, Com-

- mittee on Sedim. of HD. Jour. of the Hydraul. Div. Proc. of the ASCE. 1971, vol. 97, No. HY 1, pp. 101—141.
95. Sentürk F. A new category of bed configuration anti-ripples. Proc. of KV IAHR. 1973, vol. 5, pp. 95—100.
 96. Soliman M. M. Urbanization and the processes of erosion and sedimentation in the River Nile. Pr. of the Paris Symposium, Sept. 1974. No. 113, pp. 123—127.
 97. Sukegawa N. Conditions for the Occurrence of River Meanders. J. of the Faculty of Engineering University of Tokio (b) 1970, vol. XXX, N 4, pp. 289—308.
 98. Symbol J. Problematika podobnosti pri aerodynamickom modelovaní riechych procesov. Vysk. ustav vodo hosp. Bratislava. Prace studie, 38, 1966, p. 128.
 99. Tanaka J. Study on the flow over sand waves. Rep. DPRJ 1968, No. 1113, p. 281—289.
 100. Toebe G. and Sooky A. Hydraulics of Meandering Rivers with Flood Plains. J. of Waterways and Harbours Division. 1973.
 101. Tsubaki T., Kawasumi I. and Jasutomi T. On the influence of sand ripples upon the sediment transport in open channels. Kyushu Univ. Rept. Res. Inst. for applied Mechanism. 1953, vol. 2.
 102. Tsuchiya A. and Ishizaki K. The mechanics of dune formation in erodible bed channels. Proc. XII Congr. of IAHR, 1967, vol. 1, Colorado USA.
 103. Yalin S. Mechanics of Sediment Transport. Pergamon Press. Oxford New York, Toronto, Sydney, Braunschweig 1972, p. 290.
 104. Vinje J. J. Local scour caused by vortex streets. Ingenieur (Netherl.), 1968, 80, No. 47, pp. 143—163.
 105. Yano K., Daido A. The effect of bed-load movement of sand and gravel. Proc. XIII the Congress IAHR, 1969, v. 2, pp. 121—130.
 106. Yen C. L. Bed topography effect of flow in a meander. J. of HD ASCE, vol. 96, HY 1, pr. paper 7003.
 107. Zwamborn J. A. Similarity criteria for river models. La Houille Blanche, 1966, N 3.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	3
От автора	5
1. ГРЯДОВОЕ ДВИЖЕНИЕ НАНОСОВ	
1.1. Сущность основных противоречий	7
1.2. Терминология и классификация донных форм	9
1.3. Результаты некоторых экспериментальных и теоретических исследований	14
1.4. Разномасштабность песчаных гряд и русловых форм	28
1.5. Существующие формулы для параметров гряд	31
1.6. Анализ некоторых обобщающих исследований в области грядового движения наносов	35
1.7. О происхождении песчаных гряд	45
1.8. Формулы для расчета параметров гряд каждого класса	54
1.9. Анализ формул для параметров гряд по их принадлежности к тому или иному классу донных форм	58
1.10. Исследование зависимости для определения числа струй, определяющей класс гряд	60
2. РУСЛОВЫЕ ПРОЦЕССЫ	
2.1. Изученность руслового процесса. Сущность основных противоречий. Основные задачи дальнейших исследований	63
2.2. Основные направления изучения русловых процессов	68
2.3. Типизация руслового процесса	69
2.4. О причинах меандрирования рек	73
2.5. Экспериментальные исследования руслового процесса	82
2.6. Экспериментальные исследования осередкового типа процесса и русловой многоруканности	93
2.7. Исследование гидравлики пойм	95
2.8. Исследование движения потока в отдельной излучине	108
2.9. Морфометрические зависимости	117
2.10. Обобщение изученности в области руслового процесса	119
3. МОДЕЛИРОВАНИЕ РУСЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ	
3.1. Общие соображения	139
3.2. Теория подобия как основа моделирования	139
3.3. Противоречия в области моделирования	141
3.4. Систематизация существующих методов моделирования русловых процессов	144
3.5. Обобщение рассмотренных методов моделирования	167
3.6. Обоснование критериальных условий искаженного моделирования	168
4. ГИДРАВЛИЧЕСКИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ	
4.1. Существующие затруднения и противоречия в области гидравлических сопротивлений русла	172
4.2. Влияние русловых форм на гидравлические сопротивления русла	174
4.3. Гидравлические сопротивления меандрирующих рек	179
4.4. Исследование определяющих критериев зоны квадратичного сопротивления и масштабного эффекта	180
Список литературы	186

Нинель Сергеевна Знаменская

ДОННЫЕ НАНОСЫ И РУСЛОВЫЕ ПРОЦЕССЫ

Редактор З. М. Кожина. Художник В. В. Бабанов. Худож. редактор В. А. Баканов
Техн. редактор М. И. Брайнина. Корректор З. Т. Тимченко

Сдано в набор 19/III 1976 г. Подписано к печати 16/VI 1976 г. М-19745. Формат 60×90^{1/16}.
Бум. тип. № 1. Печ. л. 12. Уч.-изд. л. 12,71. Тираж 1800 экз. Индекс ГЛ-100. Зак. № 130.
Цена 1 руб. Гидрометеонздат. 199053. Ленинград, 2-я линия, д. 23. Ленинградская типо-
графия № 8 Союзполиграфпрома при Государственном комитете Совета Министров СССР
по делам издательства, полиграфии и книжной торговли. 190000, Ленинград, Прачеч-
ный пер., 6.