

Н.Б.БАРЫШНИКОВ

РУКОВОДСТВО

**к лабораторным
работам**

**по динамике
русловых
потоков
и русловым
процессам**

Допущено Государственным комитетом СССР
по народному образованию в качестве учебного пособия
для студентов вузов, обучающихся
по специальности «Гидрология суши»



ЛЕНИНГРАД ГИДРОМЕТЕОИЗДАТ 1991

УДК 556.536

Рецензенты:

кафедра гидрологии суши Московского государственного университета
им. М. В. Ломоносова (д-р геогр. наук, проф. Р. С. Чалов)
Одесский гидрометеорологический институт (канд. геогр. наук, доц. С. А. Борик,
канд. геогр. наук М. П. Ехнич)

Приведено описание 26 расчетных и экспериментальных работ по четырем разделам курса: динамика потоков с жестким руслом, транспорт наносов, русловые процессы и воздействие гидротехнических сооружений на русловые процессы. Приведены примеры расчетов и программы для вычислений на ЭВМ.

Учебное пособие предназначено для студентов-гидрологов гидрометеорологических институтов и географических факультетов университетов. Пособие может быть полезно специалистам, работающим в области гидрологии, водного хозяйства, мелиорации, речной гидравлики и гидротехники.

In the book "The Students guide to Laboratory Works on Dynamics of Streams and Fluviomorphological Processes in rivers" by N. B. Baryshnikov the description of 26 experimental and rated works is taken for four following section of the course the dynamics of the flows with hard river-bed, the transport of the alluvium, the river-bed's processes and the influence of hydrotechnical structure on the river-bed's processes.

The examples of the calculations and the computer's programmes are taken.

The text-book is intened for students of hydrology at hydrological educational establishments and at geographical faculties of universities. It may be useful to specialists in hydrology, water management, melioration, river hydraulics and hydrotechnics.

Учебное пособие

Барышников Николай Борисович

**РУКОВОДСТВО
К ЛАБОРАТОРНЫМ РАБОТАМ
ПО ДИНАМИКЕ РУСЛОВЫХ ПОТОКОВ
И РУСЛОВЫМ ПРОЦЕССАМ**

Редактор Л. А. Чепелкина. Художник И. А. Мазур. Художественный редактор Б. А. Бураков. Технический редактор Г. В. Ивкова. Корректор Л. А. Сандлер.

ИБ 2071. Сдано в набор 7.09.90. Подписано в печать 6.02.91. Формат 60×90^{1/16}. Бумага книжная. Литературная гарнитура. Печать высокая. Печ. л. 14,0. Кр.-отт. 14,0. Уч.-изд. л. 15,31. Тираж 1700 экз. Индекс ГЛ-77. Заказ № 223. Цена 3 р. 10 к.

Гидрометеиздат. 199226, Ленинград, ул. Беринга, 38.

Ленинградская типография № 8 ордена Трудового Красного Знамени Ленинградского объединения «Техническая книга» им. Евгении Соколовой Государственного комитета СССР по печати. 190000, Ленинград, Прачечный переулок, 6.

Б-1805040700-021 28—91
069(02)-91

ISBN 5—286—00623—X

© Н. Б. Барышников, 1991 г.

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие	5
Условные обозначения	6
Введение	8
1. Оценка точности величин, измеренных различными методами	11
2. Динамика потоков с жестким руслом	16
2.1. Общие положения	—
2.2. Лабораторные работы	18
№ 2.1. Расчет параметров плоского потока турбулентного режима	—
№ 2.2. Расчет статистических характеристик турбулентности . .	21
№ 2.3. Расчет поля скоростей потока и касательных напряжений	—
в русле прямоугольного сечения	31
№ 2.4. Расчеты распределения скоростей по сечению руслового	—
потока и пропускной способности естественных русел	35
№ 2.5. Расчет параметров потоков под ледяным покровом	37
№ 2.6. Расчет пропускной способности русел с поймами	40
2.3. Экспериментальные работы	47
№ 2.7. Процесс отделения вихрей от стенки	—
№ 2.8. Режим потока при обтекании выступов на стенке	50
№ 2.9. Поведение потока на одиночном изгибе жесткого русла . .	55
№ 2.10. Деление и слияние потоков	61
№ 2.11. Взаимодействие руслового и пойменного потоков	71
3. Транспорт наносов русловыми потоками	81
3.1. Общие положения	—
3.2. Лабораторные работы	82
№ 3.1. Расчет критических скоростей потока	—
№ 3.2. Вычисление транспортирующей способности потока	87
3.3. Экспериментальные работы	89
№ 3.3. Режимы перемещения наносов	—
№ 3.4. Деформации русла на прямолинейном участке и на изгибе	—
.	94
4. Русловые процессы	100
4.1. Общие положения	—
4.2. Лабораторные работы	101
№ 4.1. Определение типа руслового процесса и его измерителей	—
№ 4.2. Расчет деформаций дна методом характеристик	106
5. Воздействие гидротехнических сооружений на русловые процессы . .	113
5.1. Общие положения	—
5.2. Лабораторные работы (расчетные)	116
№ 5.1. Расчет заиления водохранилища	—
№ 5.2. Расчет основных параметров местного размыва за плоти-	—
ной ГЭС	122

№ 5.3. Деформации русла в нижних бьефах ГЭС	126
№ 5.4. Местный размыв у опор мостов	133
№ 5.5. Общий размыв подмостовых русел	137
№ 5.6. Гидравлический расчет крупных земляных каналов	143
5.3. Экспериментальные работы	149
№ 5.7. Динамика кривых подпора и занесение верхнего бьефа (плоская задача)	—
№ 5.8. Местный размыв за гидротехническими сооружениями	154
№ 5.9. Местный размыв у мостовой опоры	157
Приложения	161
Список литературы	223

ПРЕДИСЛОВИЕ

Предлагаемое руководство является обобщением 35-летнего опыта преподавательской работы автора в Ленинградском гидрометеорологическом институте. В его основу положены «Лабораторные работы по курсу «Динамики потоков и русловые процессы»» в двух частях, изданные в ЛГМИ в 1978 и 1981 годах, и методические пособия по лабораторным работам Одесского гидрометеорологического института и Ленинградского института водного транспорта, изданные в 1988 г. Приведенные в этих пособиях лабораторные работы прошли тщательную проверку. В то же время интенсивное развитие прикладных вопросов динамики русловых потоков в последние годы привело к необходимости разработки дополнительных лабораторных работ, посвященных проблеме расчетов и прогнозов русловых деформаций для обеспечения научно обоснованного проектирования различных гидротехнических сооружений.

В настоящем учебном пособии приведено 26 расчетных и экспериментальных лабораторных работ, для выполнения которых необходимо несколько большее время, чем предусмотрено учебным планом. Однако, учитывая, что вузы и университеты переходят на целевую подготовку студентов для различных предприятий и организаций, представляется целесообразным исходя из запросов заказчиков и возможностей лабораторной базы предоставить возможность студентам и преподавателям право выбора тех или иных лабораторных работ. Остальные работы могут быть выполнены студентами при углубленном изучении курса или по линии НИРСа.

При отсутствии учебных лабораторий целесообразно выполнение экспериментальных работ перевести на воздушные модели или ограничиться выполнением только расчетных работ. В связи с этим ряд наиболее интересных лабораторных работ в пособии приведен в двух вариантах: экспериментальном и расчетном.

В 1988 г. вышло из печати учебное пособие Н. Б. Барышникова и И. В. Попова «Динамика русловых потоков и русловые процессы» [3], в котором освещены практически все теоретические вопросы, включенные в программу этого курса. Данное руководство является дополнением к теоретическому курсу и посвящено описанию методики проведения экспериментальных и расчетных лабораторных работ, поэтому основные ссылки в нем сделаны именно на указанное учебное пособие, а также приведен краткий перечень дополнительной литературы, позволяющий студентам расширить свои знания по данной дисциплине.

Автор выражает искреннюю благодарность доцентам кафедры гидрометрии А. А. Левашову и Г. Н. Угренину, оказавшим большую помощь в подготовке и редактировании рукописи, а также сотрудникам кафедры Т. В. Даниловой, Л. В. Матыгулиной, Т. В. Перовой и Ю. И. Тарасову за помощь в оформлении рукописи.

УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

- A_v — коэффициент турбулентного обмена между взаимодействующими отсеками потока
 A_t — коэффициент турбулентной вязкости (турбулентного обмена)
 B — ширина
 $B_{п}$ — ширина поймы
 B_p — ширина русла
 b — ширина опоры моста (элемент ширины)
 C — коэффициент Шези
 c_r — скорость перемещения гряды
 $c_{п. б}$ — скорость перемещения побочня
 $c_{ос}$ — скорость перемещения осередка или острова
 $C_{ун}^H$ — усталостная прочность на разрыв для мелкозернистых грунтов
 C_v — коэффициент вариации
 c — постоянная
 $k_{отм}$ — крупность наиболее крупных частиц, которых в смеси более 5 %
 F — площадь поперечного сечения
 F_x и F_y — продольная и поперечная составляющие действующей силы
 F_r — число Фруда
 f — элемент площади
 G — сила тяжести
 g_v — транспортирующая способность потока (донных наносов)
 H — уровень воды
 $H_{п. б}$ — уровень затопления бровок прирусловых валов
 h — глубина потока
 $h_{п. б}$ — глубина потока при уровнях затопления бровок прирусловых валов
 h_d и $h_{л}$ — глубина потока соответственно у дна и подо льдом
 h_k — критическая глубина потока
 h_v — гидравлический центр эпюры скоростей — расстояние от дна до точки, где располагается максимальная скорость
 I — уклон водной поверхности
 $I_{п}$ — поперечный уклон водной поверхности
 i — порядковый номер
 $k_{ф}$ — коэффициент формы опоры моста
 k — средняя крупность частиц
 k_5 — 5 %-ная крупность частиц
 $L(\Delta l)$ — длина участка
 l_r — длина донной гряды
 l_p — длина водохранилища
 m — коэффициент Базена
 n — коэффициент шероховатости

P — давление
 Q — расход воды
 Q_s — расход наносов
 q — удельный расход воды, расход воды на единицу длины или ширины потока
 R — гидравлический радиус
 Re — число Рейнольдса
 r — радиус закругления
 S — концентрация наносов
 St — число Струхала
 T — отрезок времени
 t — время
 x, y, z — координаты
 v — средняя скорость течения потока
 v_v — средняя скорость на вертикали
 v_d — динамическая скорость
 v_n — неподвижная критическая скорость
 $v_{p.б}$ — средняя скорость руслового отсека потока при затоплении бровок прирусловых валов
 $v_{см}$ — скорость смещения
 v_* — вертикальная составляющая скорости вихря
 v_{*0} — начальная вертикальная составляющая скорости вихря
 v_k — критическая скорость
 V_s — объем годового притока наносов в водохранилище
 W — объем водохранилища
 W_a — объем аккумуляции
 w — поперечная составляющая скорости течения
 $\mathcal{E}$ — удельная энергия сечения
 α — угол пересечения динамических осей руслового и пойменного потоков, приравнивается углу пересечения геометрических осей русла и поймы
 α_B — коэффициент Буссинеска
 α_K — коэффициент Кориолиса
 α_s — коэффициент, учитывающий неравномерность распределения концентрации наносов по сечению потока
 Δ — высота выступов шероховатости
 Δ_T — наибольшая высота донной гряды
 λ_T — шаг гряды
 $\lambda_{пб}$ — шаг побочня
 μ — динамическая вязкость
 ν — кинематическая вязкость
 ρ — плотность воды
 $\rho_{гр}$ — плотность грунта, слагающего русло
 ρ_1 — плотность наносов
 τ — касательное напряжение
 φ — параметр турбулентности поведения наносов (по В. Н. Гончарову)
 χ — смоченный периметр
 ω — гидравлическая крупность

ВВЕДЕНИЕ

Дисциплина «Динамика русловых потоков и русловые процессы» органически подразделяется на четыре раздела: динамика потоков с жестким деформируемым руслом, механизм перемещения наносов, русловые процессы в бытовых условиях и русловые процессы под воздействием гидротехнических сооружений. В соответствии с этим в пособии также выделены соответствующие разделы.

Лабораторные работы, как известно, направлены на закрепление и углубление знаний, получаемых студентами при изучении теоретического курса.

Все лабораторные работы подразделены на две группы: расчетные и экспериментальные. Расчетные лабораторные работы выполняются каждым студентом индивидуально по заданному преподавателем варианту. В тех случаях, когда для выполнения расчетного задания необходим углубленный анализ полученных результатов, сопровождаемый большим объемом вычислений, рекомендуется использование различных видов ЭВМ. Учитывая ограниченный объем времени для выполнения лабораторных работ, в отдельных расчетных заданиях приведены программы на языке «Бейсик» или других языках. В остальных случаях студентам рекомендуется составлять программы расчетов самостоятельно.

Экспериментальные лабораторные работы выполняются в гидравлических лабораториях бригадами, состоящими из 2—10 студентов (в зависимости от сложности и трудоемкости работы). Итоговым документом является общий отчет, в котором приводятся результаты эксперимента, обработки и анализа полученных данных; знание всех его разделов, включая методы измерений, обработки и анализа результатов, каждым студентом является обязательным.

Значение экспериментальных работ в процессе обучения трудно переоценить. С помощью экспериментальных работ студенты знакомятся с процессами, происходящими в руслах и на поймах рек. По своей наглядности и информативности экспериментальные работы на гидравлических моделях не имеют аналогов.

Экспериментальные работы выполняются для решения двух основных задач: вскрытия физической сущности процесса и выбора наивыгоднейшего варианта компоновки конкретного сооружения или средств его защиты. Эти группы имеют принципиальные отличия. Действительно, первая группа задач не привязана к конкретному объекту, поэтому проведение исследований на таких моделях не требует введения критериев моделирования, расчета параметров модели и потока на ней. В этом случае необхо-

димо лишь качественное их соответствие. При решении же второй группы задач, относящихся к моделированию конкретных гидротехнических сооружений или участков рек, необходим строгий расчет моделей и параметров потоков на них на основе критериев моделирования.

Выполнение экспериментальных работ студентами позволяет решать задачи первой группы, т. е. вскрыть физическую сущность процесса, расчет же параметров моделей и потоков на них рассматривается в работе «Гидравлическое моделирование» [30].

Как известно, все измерения параметров потоков, русел, в которых они протекают, и наносов, ими перемещаемых, осуществляются с определенной степенью точности. Значение погрешности при этом зависит как от типа и качества применяемых приборов и оборудования, так и от других причин. При этом погрешности измерений могут оказать существенное влияние на объективность выводов. Именно поэтому изложение начато с анализа причин возможных погрешностей при проведении экспериментов и обработке полученных данных.

В соответствии с учебным планом дисциплина «Динамика русловых потоков и русловые процессы» изучается студентами в течение VIII и IX семестров. Традиционно сложилось такое положение, при котором в течение VIII семестра выполняются лабораторные работы, посвященные изучению параметров потоков и сопротивлению их движению в недеформируемых, так называемых жестких руслах. В IX семестре в процессе лабораторных работ изучаются (измерение и расчет) параметры потоков и сопротивление их движению в деформируемых руслах, формы перемещения наносов и русловые процессы в реках в их естественном состоянии и при интенсивном антропогенном воздействии на них.

Изложение расчетных и экспериментальных работ унифицировано. Так, в каждой расчетной работе приведены контрольные вопросы, которые необходимы для лучшего усвоения и закрепления теоретического материала, особенно на семинарских занятиях. В отдельных лабораторных работах (№ 2.3, 5.3 и др.) расчеты рекомендуется выполнять по упрощенным методикам, применяемым для ориентировочных расчетов. Это обусловлено сложностью детальных методов, применяемых в ряде проектных организаций. В частности, метод расчета русловых деформаций в нижних бьефах ГЭС, применяемый в Гидропроекте, довольно сложен, требует большого объема исходной информации и значительных затрат времени на ее анализ и расчеты, существенно превышающих время, отведенное учебным планом на расчетные работы по курсу.

Выполнена также унификация отчетных документов к расчетным заданиям. В лабораторной работе № 2.1 приведен краткий перечень этих документов. Аналогичные требования предъявляются и к отчетным документам по другим расчетным работам, поэтому в описании отдельных расчетных работ их состав не приводится.

Отчеты по экспериментальным работам должны состоять из записки, в которой приведены задачи работы, краткое описание экспериментальной установки, принятая методика обработки и анализа экспериментальных данных и выводы. В приложениях приводятся журналы опытов с данными экспериментов и графический материал. Однако, учитывая разноплановость этих работ, приложения к ним существенно отличаются, поэтому полное содержание отчетных документов приведено в лабораторных работах № 2.7 и 2.8, а в остальных в разделе отчетные документы приведен только перечень приложений, а содержание записки опущено.

Требования к оформлению графического материала регламентированы ГОСТом и являются обязательными для всех отчетных документов по лабораторным работам, поэтому в тексте рукописи в дальнейшем внимание читателей на этом вопросе не акцентируется.

1 ОЦЕНКА ТОЧНОСТИ ВЕЛИЧИН, ИЗМЕРЕННЫХ РАЗЛИЧНЫМИ МЕТОДАМИ

В гидрометеорологии [27, 37] обычно различают три группы погрешностей: систематические, случайные и грубые.

Систематические погрешности обусловлены несовершенством приборов и методов производства наблюдений и измерений. Например, низкое качество градуировки вертушки приводит к систематическим погрешностям определения скорости. Такого рода погрешности следует выявлять и устранять путем сравнения результатов наблюдений с показаниями приборов-эталонов, введением поправок, учитывающих особенности условий производства гидрометрических работ, совершенствованием методики измерений и т. д.

Случайные погрешности наблюдений, измерений и расчетов связаны с неточностью отсчетов по приборным шкалам, с различными отклонениями от плановых и высотных координат при установке приборов, с необходимостью всевозможных округлений результатов, со схематизацией сложных явлений и процессов. Иногда случайные погрешности вызваны недостаточно учтенными пульсациями измеряемой величины.

Случайные погрешности гидрологических наблюдений, измерений и расчетов подлежат количественной оценке для определения доверительных интервалов, в которые попадают измеренные или вычисленные значения тех или иных величин: уровней, глубин, скоростей течения, расходов воды и др.

Грубые погрешности (промахи) возникают как результат невнимательности наблюдателя, серьезной неисправности прибора, ошибочного выбора метода измерения и расчета. Грубые погрешности обнаруживаются в процессе анализа полученных результатов. Наблюдения, измерения и расчеты, выполненные с такими погрешностями, подлежат повторению, а ошибочные результаты бракуются.

С целью соблюдения преемственности для оценки случайных погрешностей использована теоретическая база, принятая в учебном пособии «Гидрологическое лабораторное моделирование» [30]. Точность гидрометрических лабораторных работ будем характеризовать двумя параметрами: предельной абсолютной и предельной относительной погрешностями.

Предельная абсолютная погрешность функции нескольких переменных представляет собой сумму абсолютных значений частных дифференциалов этой функции. При замене дифференциалов на конечные разности, принимаемые за абсолют-

ные погрешности, последним приписывается одинаковый знак (обычно плюс).

Предельная относительная погрешность функции нескольких переменных — это дифференциал натурального логарифма упомянутой функции. Рассмотрим точность наблюдений за различными элементами потока.

Точность наблюдений за уровнями воды зависит от особенностей изучаемого явления и от типа применяемого оборудования и приборов. Предельная абсолютная погрешность уровня (ΔH_c) при использовании масштабных сеток в виде полосок миллиметровой бумаги, наклеиваемой на остекленные стенки лотков, при спокойной поверхности воды достигает 0,001 м.

Прямые и крючковые мерные иглы с делениями на штанге или трубке через 10^{-3} м и нониусом позволяют производить отсчет уровня с погрешностью до 0,0001 м, однако в связи с некоторыми трудностями фиксации момента касания иглой поверхности воды из-за волнения, скоростного набега на иглу, поверхностного натяжения воды и т. д. в [27, 30, 37] рекомендуется абсолютная предельная погрешность $\Delta H_{\pi} = 0,0002$ м.

Отсчеты уровня воды с помощью пьезометра выполняются с абсолютной предельной погрешностью $\Delta H_{\pi} = 0,0005$ м, а при наличии специальной лупы — до 0,0001 м. С такой же погрешностью определяются отметки спокойной воды с применением лабораторного нивелира.

Измерения глубин в лабораторных условиях включают определение двух отметок: поверхности воды и дна, т. е. абсолютная предельная погрешность промера составляет

$$\Delta h = \Delta H + \Delta z, \quad (1.1)$$

где ΔH и Δz — соответственно абсолютные предельные погрешности наблюдения за уровнем и измерения отметки дна; примем $\Delta H = 0,0002$ м, $\Delta z = 0,0001$ м, следовательно, $\Delta h = 0,0003$ м. Повидимому, такой точности измерения глубины можно добиться в исключительно благоприятных условиях: неразмываемое гладкое дно, ровная поверхность воды, применение мерной иглы с нониусом и т. п. Обычно $\Delta h = 0,0005 \div 0,0001$ м.

Предельная относительная погрешность промера $\Delta h/h$ зависит также от глубины h и в обычном для лаборатории диапазоне изменения глубин от 0,02 до 0,50 м составляет

$$\frac{\Delta h}{h} = \left(\frac{0,001}{0,50} \div \frac{0,001}{0,02} \right) \cdot 100 = 0,2 \div 5 \%. \quad (1.2)$$

В соответствии с рекомендациями Г. В. Железнякова и В. В. Данилевича [14] предельная абсолютная погрешность определения площади водного сечения (ΔF) вычисляется по формуле

$$\Delta F = \Delta h B + \Delta b \sum_1^n h, \quad (1.3)$$

где Δb — показатель точности оценки расстояний между промерными вертикалями; n — число промерных вертикалей; B — ширина потока.

Примем $\Delta h = 0,001$ м, $\Delta b = 0,002$ м, тогда при $B = 2$ м и $\sum_{i=1}^{i=20} h_i = 2$ м, $\Delta F = 0,006$ м².

Предельная относительная погрешность определения площади водного сечения в данном примере составляет

$$\Delta F/F = 0,006 : 0,20 \cdot 100 = 3 \%. \quad (1.4)$$

Погрешность расчета средней глубины потока в лотке оценивается по формуле

$$\Delta h_{\text{ср}} = \frac{\Delta h B + \Delta b \sum_1^n h}{B} + \frac{\Delta B}{B} h_{\text{ср}}, \quad (1.5)$$

где ΔB — предельная абсолютная погрешность ширины потока (пусть $\Delta B = 0,002$); $h_{\text{ср}}$ — средняя глубина (предположим, $h_{\text{ср}} = 0,10$ м).

С учетом принятых ранее данных получим

$$\Delta h_{\text{ср}} = \frac{0,006}{2} + \frac{0,002}{2} 0,10 = 0,0031 \text{ м.}$$

Предельная относительная погрешность расчета средней глубины в данном случае составляет

$$\Delta h_{\text{ср}}/h_{\text{ср}} = 0,0031 : 0,10 \cdot 100 = 3,1 \%.$$

Предельная относительная погрешность определения скорости течения с применением поверхностных поплавков оценивается по формуле

$$\Delta u_{\text{п}}/u_{\text{п}} = \Delta l_{\text{п}}/l_{\text{п}} + \Delta t_{\text{п}}/t_{\text{п}}, \quad (1.6)$$

где $\Delta u_{\text{п}}$, $\Delta l_{\text{п}}$ и $\Delta t_{\text{п}}$ — соответственно предельные абсолютные погрешности скорости движения поплавка ($u_{\text{п}}$), измерения пути поплавка ($l_{\text{п}}$), времени его движения ($t_{\text{п}}$).

Аналогично [30] примем $\Delta l \approx 0,005 \div 0,01$ м (среднее значение $\Delta l_{\text{п}} \approx 0,007$ м); $\Delta t_{\text{п}} = 0,1$. Оценим погрешность при $l_{\text{п}} = 4,0$ м и $t_{\text{п}} = 20$ с.

$$\Delta u_{\text{п}}/u_{\text{п}} = 0,007 : 4,0 + 0,1 : 10 \cdot 100 = 1,2 \%.$$

Оценка погрешности измерения местной скорости течения с помощью гидрометрических трубок типа Пито—Дарси осуществляется по формуле

$$\Delta u/u = 0,5 \Delta H/\Delta h_{\text{и}}, \quad (1.7)$$

где ΔH — предельная абсолютная погрешность отсчета уровня воды в трубке ($\Delta H = \Delta H_{\pi} = 0,0005$); $\Delta h_{\pi} = u^2/(2g)$ — скоростной напор (пусть $\Delta h_{\pi} = 0,02$ м).

Итак,

$$\frac{\Delta u}{u} = \frac{1}{2} \cdot \frac{0,0005}{0,02} \cdot 100 = 1,25 \text{ \%}.$$

Нетрудно показать, что нижний предел измерения скорости трубками типа Пито—Дарси довольно высок: $u_{\min} \approx 0,10 \div 0,15$ м/с. При таких скоростях предельная относительная погрешность превышает 5 %, что недопустимо в лабораторных исследованиях.

Погрешности измерения местных скоростей течения микроввертушками зависят от типа вертушек (например, X-6; вертушка М. И. Бирицкого и т. д.). Предельная относительная погрешность измерения скорости течения $\Delta u/u \approx 2 \text{ \%}$, диапазон измеряемых скоростей 0,03—3,00 м/с. В ряде случаев (вертушка Бирицкого) максимально допустимая скорость меньше и составляет $u_{\max} = 2,30$ м/с.

Основным способом контроля за расходами воды в лотке является объемный метод. При этом предельная относительная погрешность равна

$$\Delta Q/Q = \Delta h/h + \Delta t/t, \quad (1.8)$$

где Δh и Δt — соответственно предельные абсолютные погрешности измерения глубины h в мерном баке и времени наполнения бака t .

Ввиду особенностей выполнения измерения глубины h в баке [29] примем $\Delta h = 0,002$ м; как и прежде, $\Delta t = 0,1$ с. Тогда при $h = 1,20$ м и $t = 10$ с

$$\Delta Q/Q = (0,002 : 1,20 + 0,1 : 10) \cdot 100 = 1,2 \text{ \%}.$$

Г. В. Железняков и Б. Б. Данилевич [14] оценивают погрешность измерения расхода воды треугольным незатопленным водосливом по формуле

$$\Delta Q/Q = 2,5 \Delta H_{\pi}/H_{\pi}, \quad (1.9)$$

где ΔH_{π} — предельная абсолютная погрешность измерения напора воды (обычно принимают $\Delta H_{\pi} = 0,001$ м); H_{π} — напор.

При $H_{\pi} = 0,5$ м погрешность $\Delta Q/Q$ равна

$$\Delta Q/Q = 2,5 \cdot 0,001 : 0,5 \cdot 100 = 0,5 \text{ \%}.$$

Опыт применения треугольных водосливов показывает, что в действительности погрешности измерения расходов несколько больше.

По мнению автора, уравнение (1.9) лишь приближенно отражает достаточно сложные закономерности формирования погрешностей $\Delta Q/Q$.

Предельная абсолютная погрешность измерения расхода воды методом «скорость—площадь» вычисляется, в частности, по формуле

$$\Delta Q = q_{u_B} \Delta h + F \Delta u_B + \Delta b \sum_{j=1}^{j=N} q_j, \quad (1.10)$$

где Δu_B — предельная абсолютная погрешность определения средней скорости на вертикали; N — число скоростных вертикалей; q_j — элементарный расход на j -й вертикали;

$$q_{u_B} = k u_{B1} b_0 + \frac{u_{B1} + u_{B2}}{2} b_1 + \dots + \frac{u_{B,n-1} + u_{B,n}}{2} b_{n-1} + k u_{B,n} b_n;$$

$$F = k h_1 b_0 + \frac{h_1 + h_2}{2} b_1 + \dots + \frac{h_{n-1} + h_n}{2} b_{n-1} + k h_n b_n$$

($k = 0,7$ при нулевой глубине на урезах воды, $b_0, \dots, b_n$ — расстояния между скоростными вертикалями, h_j — рабочая глубина; u_{Bj} — средняя скорость на j -й скоростной вертикали).

Предельные абсолютные погрешности, как и выше, примем $\Delta h = 0,001$ м, $\Delta b = 0,002$ м, а Δu_B определим приближенно исходя из $\Delta u/u \approx 2\%$, т. е. $\Delta u_B = 0,02v$, где v — средняя скорость потока.

Предельная относительная погрешность измерения расхода воды методом «скорость—площадь» в лабораторных условиях составляет обычно $\Delta Q/Q = 3 \div 5\%$.

В настоящее время применяются и другие методы определения точности гидрологических наблюдений, измерений и расчетов. Например, в качестве показателя точности довольно широко используется средняя квадратическая погрешность измерения или оценка «уменьшения энтропии вследствие опыта или другого акта познания» [20].

2 ДИНАМИКА ПОТОКОВ С ЖЕСТКИМ РУСЛОМ

2.1. Общие положения

Как известно, движение потоков в речных руслах обычно происходит при турбулентном режиме, однако разработка теории турбулентности еще не завершена. Система уравнений гидромеханики для турбулентного потока, основанная на фундаментальных законах сохранения массы и энергии или количества движения, не замкнута и для ее решения необходимы частные гипотезы. При их реализации в зависимости от принятых допущений получаются те или иные виды расчетных зависимостей, иногда весьма существенно отличающиеся по своей форме.

До настоящего времени не ослабевают споры о том, какой вид формулы наилучшим образом соответствует натурному распределению скоростей по глубине потока: логарифмический, степенной, эллиптический или какой-либо иной. Несмотря на то что многие исследователи [11 и др.] считают, что лучшее соответствие с натурными данными имеет логарифмический вид кривой, большее распространение имеет и степенная кривая. Поэтому студентам предлагается лабораторная работа, посвященная расчету профиля распределения скоростей по глубине потока на основе различных формул.

Исторически в ОГМИ сложилось и достигло определенных результатов научное направление по изучению пульсационных составляющих скоростей. Одной из форм реализации научных достижений является внедрение в учебный процесс результатов научных разработок. Поэтому именно в ОГМИ поставлена работа по расчету статистических характеристик турбулентности. Эта работа приведена ниже без существенных изменений.

Более сложными и имеющими большое практическое значение являются задачи расчета полей скорости естественных водотоков на основе морфометрических характеристик русел при заданном расходе воды. Близкой к ней является задача о расчете распределения скоростей равномерного потока по прямоугольному сечению русла.

Движению потока на изгибе русла посвящены как экспериментальная, так и расчетная работы. Следует отметить, что расчеты распределения скоростей выполняются по упрощенной методике, основанной на законе площадей, применяемом для идеальной жидкости. Это обусловлено тем, что методики, основанные на системе уравнений гидромеханики (И. Л. Розовского, В. М. Маккавеева и др.), очень трудоемки и их использование приведет к боль-

шим затратам времени, выходящим за нормы, отведенные данной дисциплине. Тем более что по этой же теме студентам предлагается выполнить экспериментальные работы как на жесткой, так и на полужесткой моделях, в которых предусматривается измерение как продольных, так и поперечных составляющих скоростей в нескольких створах на одиночном изгибе русла. Анализ полей этих скоростей дает студентам возможность реально осознать пространственный характер течений на изгибе, однако студенты должны четко представлять, что эти потоки протекают в узких руслах ($B/h < 10$), а на естественных широких реках ($B/h > 20 \div 40$) характер распределения, особенно поперечных, скоростей значительно отличается от полученного в лабораторных условиях.

Действительно, трудно предположить существование одного устойчивого винта циркуляции на больших реках с $B/h > 100$. Такие винты будут неустойчивыми и распадутся на более мелкие, занимающие только часть поперечного сечения, что часто приводит к образованию островного типа руслового процесса.

Особенно сложные процессы происходят при движении потоков в руслах с поймами, когда морфологические особенности строения расчетных участков определяют гидравлику руслопойменных потоков в них. Однако эта проблема является одной из наиболее сложных в научном плане и наиболее важной для практических расчетов, так как почти на всех равнинных реках высокие паводки, а тем более катастрофические, проходят по затопленным поймам. В то же время, как показали исследования, проведенные в ЛГМИ, при использовании стандартной методики, основанной на формуле Шези [2], т. е. на теории равномерного движения, погрешности расчетов могут достигать 100 % и более. Поэтому данному разделу посвящена одна расчетная и одна экспериментальная лабораторные работы. В расчетной надлежит с помощью разработанной на кафедре гидрометрии ЛГМИ методики определить пропускную способность пойменного русла и сравнить результаты расчетов с полученными по стандартной методике, основанной на формуле Шези.

Самостоятельным, тесно соприкасающимся с курсом гидрофизики, является раздел, посвященный расчетам сопротивлений движению потоков под ледяным покровом. Следует отметить, что методика расчетов этих сопротивлений разработана значительно хуже, чем для открытых потоков. В частности, в ее основу положен расчет осредненных для сечения в целом коэффициентов шероховатости по данным о их значениях в русле (на дне) и у нижней поверхности льда. Как известно, для определения коэффициентов шероховатости русел на основе их описательных характеристик разработаны таблицы коэффициентов шероховатости. Наиболее распространены в СССР таблицы М. Ф. Срибного и И. Ф. Карасева [18], а также приведенная в приложении 10 таблица, разработанная на кафедре гидрометрии ЛГМИ. Из зарубежных наибольшее распространение получили таблицы В. Т. Чоу и Дж. Бредли (приложения 11 и 12). Этому вопросу, учитывая его

большое практическое значение, посвящена работа по расчету осредненных коэффициентов шероховатости для определения сопротивления движению потоков под ледяным покровом.

2.2 Лабораторные работы

№ 2.1. Расчет параметров плоского потока турбулентного режима

Речные потоки, как правило, протекают при турбулентном режиме. В межледные периоды возможно их движение в переходной области. На малых же водотоках, особенно перед их пересыханием или замерзанием, а также при интенсивном зарастании русел, может наблюдаться даже ламинарный режим движения.

Как уже указывалось, система уравнений гидромеханики, применяемая для описания полей скоростей и сопротивлений движению потоков при турбулентном режиме, является незамкнутой. Это требует применения частных гипотез и разного рода допущений, обычно основанных на экспериментальных данных, полученных как на жестких, так и на размываемых моделях или в натуральных условиях. Учитывая, что точность исходной, особенно натурной, информации об измеренных скоростях составляет 3—5 %, частные зависимости, получаемые различными исследователями для замыкания системы уравнений, могут существенно отличаться друг от друга. В то же время все они независимо от окончательного вида их математической интерпретации являются аппроксимацией натуральных эпюр распределения осредненных скоростей по глубине потока.

Особенно остро стоит вопрос изучения изменения скоростей по глубине в придонной области натуральных потоков. Это обусловлено тем, что именно в этой области измерения скоростей течений обычно не производятся, так как гидрометрические вертушки, применяемые для измерений, имеют значительные размеры лопастей ротора. К тому же сложный, часто подвижный, рельеф дна естественных водотоков резко ограничивает возможности исследования скоростей в этой области.

Несмотря на эти трудности, имеется большое количество формул различного вида, применяемых для описания эпюры распределения скоростей по глубине потока (логарифмическая, степенная, параболическая и др.).

В последние годы наибольшее распространение получили формулы логарифмического и степенного вида. Однако доказательства неприменимости формул другого вида отсутствуют. Поэтому в данной работе студентам необходимо выполнить расчет распределения скоростей по глубине потока по формулам различного вида, произвести анализ полученных результатов и самим сделать обобщения и выводы о применимости формул того или иного вида.

Задачи работы: а) расчет параметров плоского равномерного потока с турбулентным режимом, б) самостоятельный анализ полученных результатов.

Исходные данные: заданы глубины потока h_1 и h_2 , уклон водной поверхности I и шероховатость дна $\Delta = 0,7 k_5$. Температура воды в потоке принимается равной 20°C (соответствующее ей значение кинематической вязкости $0,01 \text{ см}^2/\text{с}$).

В приложении 1 приведена исходная информация для расчетов, однако студенты могут использовать натурные данные по любому конкретному объекту. В приложении 2 приведена программа расчетов на языке «Бейсик».

Литература¹:

Барышников Н. Б., Попов И. В. Динамика русловых потоков и русловые процессы, гл. 1, п. 1.2—1.6.

Караушев А. В. Речная гидравлика, гл. 3, с. 73—85.

Порядок выполнения работы

1. Вычислить среднюю и максимальную скорости потока по формулам:

$$v = 4 \lg \frac{6,15h}{\Delta} \sqrt{2ghI}, \text{ ср.}$$

$$u_0 = v \lg \frac{16,7h}{\Delta} / \lg \frac{6,15h}{\Delta}, \text{ max}$$

а также по формуле Шези

$$v = C \sqrt{hI}. \quad (2.1)$$

Расчет коэффициента Шези C выполнить по формуле Павловского

$$C = h^y/n,$$

где $y \approx 1,5 \sqrt{n}$ при $h < 1$ м и $y = 1,3 \sqrt{n}$ при $h > 1$ м.

Значение коэффициента шероховатости n определить по эмпирической формуле Гончарова

$$n = 0,044\Delta^{1/6} \quad (2.2)$$

(где Δ — высота выступов шероховатости, м) или по гидравлическим справочникам. Произвести анализ и сравнение результатов.

2. Рассчитать и построить эпюры распределения местных скоростей по глубине потока в абсолютных $u = f(y)$ и относительных $u/v = f(y/h)$ координатах по формулам:

¹ Полное библиографическое описание литературы приведено в конце книги, на с. 223—224.

логарифмической Гончарова

$$u = v \lg \left(\frac{16,7y}{\Delta} + 1 \right) / \lg \frac{6,15h}{\Delta}, \quad (2.3)$$

эллиптической Караушева

$$u = u_0 \sqrt{1 - (0,57 + 3,3/C)(1 - y/h)^2},$$

параболической Базена

$$u = u_0 - \frac{24v}{C} (1 - y/h)^2.$$

Расчет выполнить для значений y , равных Δ ; (0,1; 0,2; 0,4; 0,5; 0,6; 0,8; 0,9; 1,0) h .

Произвести сравнение и анализ полученных результатов.

3. Определить глубину, на которой местная скорость равна средней.

4. Вычислить значения:

а) числа Рейнольдса потоков,

б) коэффициента сопротивления λ

$$\lambda = \frac{1}{\left(4 \lg \frac{6,15h}{\Delta}\right)^2},$$

в) коэффициента Шези

$$C = 4 \lg \frac{6,15h}{\Delta} \sqrt{2g} \approx 17,7 \lg \frac{6,15h}{\Delta},$$

г) полного касательного напряжения

$$\tau = 0,5\rho\lambda v^2 = \rho ghI.$$

5. Определить скорости вихрей у дна по формуле

$$v_{*0} = v / \lg \frac{6,15h}{\Delta}$$

и изменение относительных скоростей вихрей по глубине потока

$$v_*/v_{*0} = c/(y + c)$$

(при $c = 0,06 \Delta$) в точках, находящихся от дна на расстоянии y , равном Δ ; (0,2; 0,4; 0,5; 0,6; 0,8; 1,0) h . Полученные результаты представить в виде графика

$$v_*/v_{*0} = f(y/h).$$

6. Вычислить коэффициенты сопротивления потока при турбулентном режиме для тех же глубин и средних скоростей, но в предположении, что дно потока является гладким. Для этого предварительно определить расчетную высоту выступов шерохо-

ватой стенки, равнозначную по сопротивлению гладкой $\Delta_{гг}$, по формуле

$$\Delta_{гг} = h / \left(\frac{Re + 41}{800} \right)^{0,92} \quad \Delta_{гг} = h / \left(\frac{Re + 800}{41} \right)^{0,92}$$

7. Определить толщину пристенного слоя потока по Гончарову. Для этого необходимо предварительно определить местную скорость на его поверхности. Определить толщину придонного слоя по Никитину $\delta = 5,6\nu/\sqrt{ghI}$. Произвести сравнение и анализ данных расчетов для потоков с зернистошерховатой и гладкой стенками.

Контрольные вопросы

1. На основе какой системы уравнений гидромеханики осуществляется вывод формулы для расчета распределения местных скоростей по глубине турбулентного потока?
2. В чем суть закона Лоренца и какие основные допущения приняты при его выводе?
3. Чем объяснить наличие большого количества разнообразных формул для расчета распределения местных скоростей по глубине потока (логарифмической, степенной и др.)?
4. Какова точность измерения скоростей в речных потоках, особенно в придонном слое? От чего она зависит?
5. Какие пути решения системы уравнений гидромеханики для турбулентного потока Вам известны? В чем их недостатки?

Отчетные документы

Отчет по работе представляет краткую записку, которая составляется по следующему плану:

1. Цель и задачи работы, ее практическое значение.
 2. Методика обработки исходной информации, полученные результаты и их критический анализ.
 3. Выводы.
- Приложения к отчету — таблицы, в которых приведены результаты расчетов.

№ 2.2. Расчет статистических характеристик турбулентности

При измерениях расходов воды необходимо определять осредненные значения скорости в точках, поэтому для измерений обычно применяют приборы, интегрирующие их значения за длительный промежуток времени. Наиболее часто для этих целей используют гидрометрические вертушки, в зависимости от конструкции которых фиксация сигнала производится через 1; 20 или 50 оборотов лопастного винта.

Одной из важнейших для практической гидрометрии задач является определение периода, в течение которого следует выполнять измерения, достаточного для получения близкого к истинному значения осредненной скорости в точке. В разные годы продолжительность этого периода рекомендовалась различной, в частности длительное время [4] она составляла 120 с, а в настоящее время принята равной 100 с [28]. По-видимому, этот период,

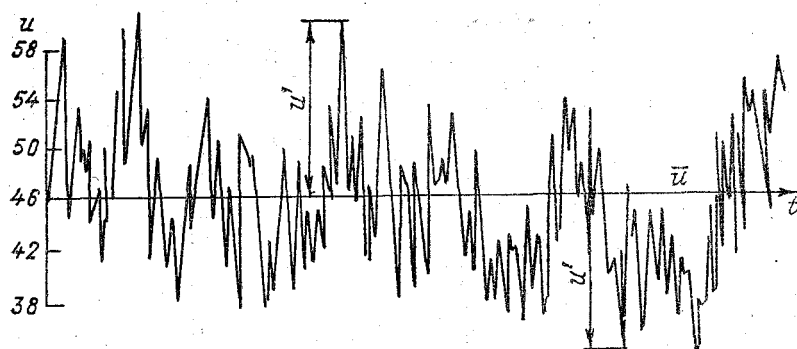


Рис. 2.1. Эпюра изменения мгновенной скорости во времени.

зависящий от интенсивности турбулентности и скорости потока, является величиной переменной. При малых скоростях он должен быть увеличен, а при больших — уменьшен. Его пределы могут быть научно обоснованы только на основе анализа закономерностей изменения пульсационных составляющих скорости.

Рассмотрим, как измеряются и определяются пульсационные составляющие. Вектор скорости изменяется во времени как по величине, так и по направлению. Отклонения значений скорости от осредненных называют пульсационными добавками, которые могут быть определены по данным специальных измерений многокомпонентными датчиками.

Ограничивая задачу плоским потоком, получим пульсационную добавку для продольной скорости

$$u' = u - \bar{u}, \quad (2.4)$$

где u и $\bar{u}$ — мгновенное и осредненное значения скорости в точке.

Эпюра изменения мгновенной скорости во времени (рис. 2.1) является наглядной иллюстрацией выражения (2.4). Как видно на рисунке, частота изменения мгновенной скорости около среднего значения довольно большая. Аналогичным образом изменяются и пульсационные добавки. В практических целях высокочастотные колебания скорости допустимо описывать с помощью теории вероятности и математической статистики.

Имеется несколько концепций, объясняющих причины пульсации скорости. Рассмотрим одну из них. Так, В. Н. Гончаров, осно-

вываясь на разработанной им гипотезе макромасштабной турбулентности, получившей подтверждение в экспериментальных исследованиях зарубежных ученых, объясняет возникновение пульсаций вихревой структурой турбулентных потоков. Вихри, образуясь на стенке, перемещаются вверх, перенося массы жидкости из придонных слоев, имеющих небольшую скорость, в толщу потока. Эти вихри имеют различные размеры. Большие вихри, иногда достигающие поверхностных слоев, вызывают наибольшее уменьшение скорости, а мелкие — небольшое.

Таким образом, мгновенная и пульсационная скорости в турбулентных потоках являются случайными величинами. Следовательно, при их обработке оправдано использование методов математической статистики и теории вероятности.

Задачи работы: по данным натурных измерений мгновенных скоростей в точках, приведенным в приложении 3, рассчитать различные характеристики турбулентности:

- 1) интенсивность турбулентности,
- 2) временную корреляционную функцию продольной составляющей скорости,
- 3) временную нормированную корреляционную функцию,
- 4) продольный масштаб турбулентных возмущений,
- 5) внешний масштаб турбулентных вихрей,
- 6) структурную функцию продольной составляющей скорости,
- 7) коэффициент турбулентной вязкости,
- 8) энергетический спектр и диссипацию энергии турбулентности,
- 9) генерацию турбулентной энергии.

Исходные данные: см. приложения 3—4.

Литература:

Барышников Н. Б., Попов И. В. Динамика русловых потоков и русловые процессы, п. 1.2 и 1.3.

Гончаров В. Н. Динамика русловых потоков, гл. 1, § 3 и 4.

Гринвальд Д. И., Никора В. А. Речная турбулентность, гл. 1.

Мозгунов Г. И., Лобода Н. С. Методические указания к практическим занятиям «Расчет статистических характеристик турбулентности».

Порядок выполнения работы

1. Определить интенсивность турбулентности. В качестве меры рассеяния случайной величины относительно ее среднего арифметического значения в математической статистике широко используют понятие среднего квадратического отклонения, или стандарта:

$$\bar{\sigma}_u = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (u_i - \bar{u})^2}{n-1}},$$

где σ_u — стандарт случайной величины u ; u_i — мгновенная скорость в точке в i -й момент времени; $\bar{u}$ — осредненная за длительный интервал времени скорость в рассматриваемой точке; n — число измерений мгновенных скоростей, которое принято равным длительности интервала осреднения ($n = 300$).

Применительно к турбулентному движению разность $u_i - \bar{u}$ представляет собой пульсационную скорость, а величина σ_u определяет интенсивность турбулентных пульсаций

$$\bar{\sigma}_u = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (u')^2}{n-1}}.$$

Для сопоставления изменчивости статистических рядов обычно используют отношение среднего квадратического отклонения к среднему, которое носит название коэффициента вариации:

$$C_v = \bar{\sigma}_u / \bar{u}. \quad (2.5)$$

В гидромеханике данный коэффициент называют интенсивностью турбулентности и обозначают k . Число k характеризует степень общей возмущенности поля скоростей.

По формуле (2.5) рассчитать интенсивность турбулентности для точек измерения скорости на р. Турунчук. Построить график распределения интенсивности турбулентности по глубине потока. Дать критический анализ этого распределения.

Примечание. Значения $\bar{u}$, $\bar{\sigma}_u$ и k рассчитывают по программе, составленной для микрокалькулятора МК-56 (приложение 4.1).

2. Определить временную корреляционную функцию продольной составляющей скорости.

Рассматривая ряд мгновенных скоростей, измеренных в любой точке живого сечения реки, как одну реализацию стационарной эргодической функции, можно на основании данной выборки получить такую характеристику турбулентности, как временная корреляционная функция продольной составляющей скорости.

Временные корреляционные функции оценивают степень связи значений скорости в различные моменты времени и тем самым позволяют судить о временных масштабах колебаний скорости в потоке.

Временная корреляционная функция может быть представлена в виде

$$B(t_1, t_2) = u'(t) \cdot u'(t + \tau),$$

где $u'(t)$, $u'(t + \tau)$ — пульсации продольной составляющей скорости в моменты времени t_1 и t_2 , при этом $t_2 = t_1 + \tau$, τ — временной сдвиг.

Если стационарная функция задана в дискретном виде, то

$$B(\tau) = \frac{1}{n-\tau} \sum_{i=1}^{n-\tau} u'_i \cdot u'_{i+\tau}, \quad (2.6)$$

где n — длина статистического ряда; u'_i — значение пульсации продольной составляющей скорости, зафиксированной в i -й момент времени; $u'_{i+\tau}$ — значение пульсации в момент $i + \tau$.

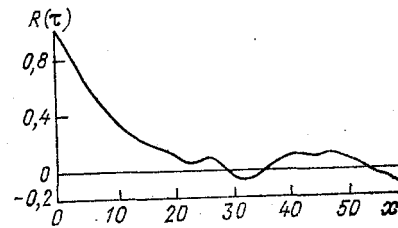


Рис. 2.2. Нормированная временная корреляционная функция.

При временном сдвиге $\tau = 0$ величина $B(\tau)$ становится равной дисперсии ряда

$$B(\tau = 0) = \sum_{i=1}^n (u_i - \bar{u})^2 / n = \sigma_u^2. \quad (2.7)$$

На практике чаще всего используют нормированную на дисперсию корреляционную функцию, расчетное выражение для которой

$$R(\tau) = B(\tau) / \sigma_u^2. \quad (2.8)$$

Программы расчета нормированной корреляционной функции даны в приложениях 4.II и 4.III.

3. Рассчитать и построить график нормированной временной корреляционной функции в зависимости от временного сдвига τ . Используя полученный график, определить τ_0 — расстояние от начала координат до первого пересечения кривой $R(\tau)$ оси x . Эта величина называется *временем нулевой корреляции*. Дать анализ полученным кривым. Типичная кривая нормированной корреляционной функции показана на рис. 2.2.

4. Определить продольный масштаб турбулентных возмущений. Турбулентный поток представляет собой совокупность наложенных на осредненное движение вихрей (возмущений) различных масштабов. Самые крупные вихри получаются вследствие неустойчивости осредненного движения. Эти вихри распадаются на более мелкие и т. д. Процесс последовательного измельчения турбулентных возмущений ограничен мельчайшими вихрями. При изучении движения больших вихрей молекулярной вязкостью жидкости можно пренебречь, при движении же малых вихрей учет молекулярной вязкости необходим. Очевидно, что максимальный масштаб вихрей определяется размерами рассматриваемого по-

тока, а минимальный — вязкостью жидкости. Понятие «масштаб турбулентности» выражает характерный размер имеющихся в потоке турбулентных образований. Вычисленные масштабы, которые характеризуют размеры наиболее крупных низкочастотных вихрей, можно назвать еще внешним масштабом турбулентности (в отличие от «внутреннего масштаба», определяющего размер самых малых вихрей).

Используя гипотезу о «замороженной турбулентности» Д. Тейлора, сущность которой заключается в том, что индивидуальные изменения турбулентных возмущений, переносимых средним потоком, малы, можно предположить, что вихри перемещаются со средней скоростью потока. В соответствии с этим

$$l = \bar{u} \tau_0, \quad (2.9)$$

где l — внешний масштаб турбулентных возмущений; $\bar{u}$ — осредненная скорость в данной точке; τ_0 — время нулевой корреляции.

Следует отметить, что таким образом определяют продольные размеры крупномасштабных вихрей, для характеристик мелких возмущений используется «внутренний масштаб турбулентности».

5. Рассчитать внешний масштаб турбулентных вихрей по (2.9) и графику корреляционной функции (см. рис. 2.2).

6. Структурная функция продольной составляющей скорости. Для характеристики локальной структуры турбулентности А. Н. Колмогоров ввел понятие структурной функции. Она представляет собой дисперсию разности значений скорости потока в двух точках, находящихся на расстоянии Δx друг от друга:

$$M_u(\Delta x) = [\overline{u(x) - u(x + \Delta x)}]^2. \quad (2.10)$$

Разность скорости в двух точках возникает в тех случаях, когда в потоке имеются турбулентные образования, масштаб которых меньше или соизмерим с Δx . Если размер возмущения существенно больше Δx , то точки оказываются внутри турбулентного образования и разность скорости в указанных точках будет незначительной. Если же Δx велико, $u(x)$ и $u(x + \Delta x)$ становятся независимыми, а сама структурная функция достигает состояния насыщения и при дальнейшем увеличении интервала Δx изменяется незначительно (рис. 2.3).

Пользуясь методом размерности, А. Н. Колмогоров пришел к закону «одной трети», согласно которому изменение скорости Δu на протяжении некоторого малого расстояния Δx пропорционально этому расстоянию в степени $1/3$, т. е.

$$\Delta u = c (\varepsilon \Delta x)^{1/3} \quad (2.11)$$

или

$$M_u(\Delta x) = c \varepsilon^{2/3} \Delta x^{2/3}, \quad (2.12)$$

что выражает закон двух третей, установленный А. Н. Колмогоровым и М. М. Обуховым.

Используя гипотезу замороженной турбулентности, заменим $\Delta x = \bar{u}\tau$, т. е. перейдем к временной структурной функции:

$$M_u(\tau) = c\varepsilon^{2/3} u^{-2/3} \tau^{2/3}. \quad (2.13)$$

Обозначив $c\varepsilon^{2/3} u^{-2/3} = A_1$, получим

$$M_u(\tau) = A_1 \tau^{2/3}. \quad (2.14)$$

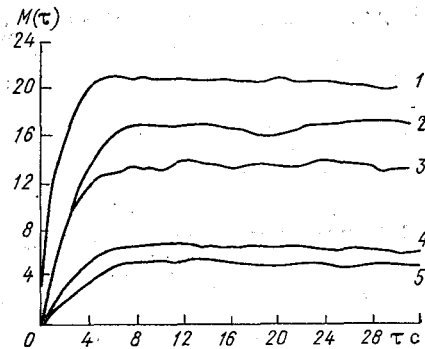


Рис. 2.3. Временные структурные функции.
1) дно; 2) 0,8h; 3) 0,6h; 4) 0,2h; 5) поверхность.

Здесь A_1 — коэффициент, характеризующий диссипацию энергии турбулентности; c — универсальная постоянная, равная 1,9.

Используя программы расчета, приведенные в приложении 4.IV, определить значения временной структурной функции продольной составляющей при различных временных сдвигах τ :

$$M_u(\tau) = \frac{\sum_{i=1}^{n-\tau} (u_i - u_{i+\tau})^2}{n - \tau}. \quad (2.15)$$

Построить графики распределения структурной функции во времени (см. рис. 2.3). Определить $\tau_{\text{хар}}$ — время, при котором структурная функция достигает своего насыщения и далее с ростом τ не увеличивается, а изменяется вокруг некоторого среднего значения. В логарифмических координатах зависимость $M(\tau) = A_1 \tau^m$ обычно представляется прямой линией в интервале $0 < \tau < \tau_{\text{хар}}$ (рис. 2.4). Определить показатель степени m и сравнить его с $2/3$, т. е. проверить выполнимость закона Колмогорова—Обухова для структурной функции. Графически определить значение A_1 (это отрезок, отсекаемый прямой на оси ординат). Программа вычисления структурной функции приведена в приложении 4.IV.

7. Рассчитать коэффициент турбулентной вязкости A_T . Вязкость (или внутреннее трение) — свойство жидкостей оказывать сопротивление перемещению одной части жидкости относительно другой. Благодаря вязкости происходит превращение кинетической энергии жидкости в теплоту.

Коэффициент турбулентной вязкости A_T является очень удобной количественной характеристикой турбулентности. Его значение зависит от сложного механизма турбулентного перемешивания; в отличие от молекулярного коэффициента вязкости, A_T изменяется в пространстве и во времени. Изучение этого коэффициента имеет большое практическое и теоретическое значение.

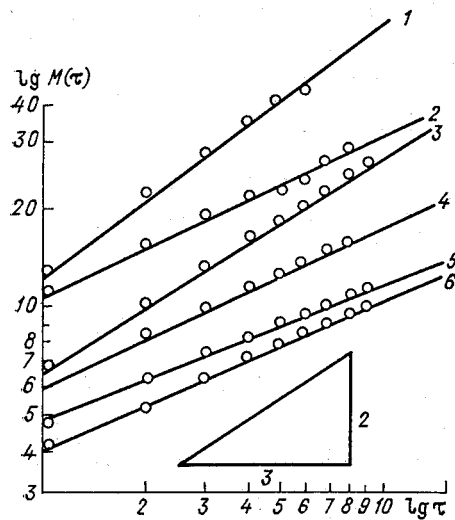


Рис. 2.4. Зависимость структурной функции от времени (в логарифмических координатах).

1) дно; 2) 0,9h; 3) 0,8h; 4) 0,6h; 5) 0,2h; 6) поверхность.

Значение коэффициента A_T определяется из уравнения для плоского движения — уравнения Лоренца

$$gl(h-y) = \mu \frac{du}{dy} + |\overline{u'v'}|, \quad (2.16)$$

где h — глубина на вертикали; y — расстояние от дна до точки измерения; μ — коэффициент молекулярной вязкости, который значительно меньше A_T ; u — местная скорость потока; $|\overline{u'v'}|$ — абсолютное значение касательного турбулентного напряжения;

$$\tau = -\rho \overline{u'v'};$$

$$\tau = \rho g h l (1 - y/h). \quad (2.17)$$

После некоторых преобразований и допущений с учетом логарифмического профиля распределения получим

$$A_T = \chi v_g y (1 - y/h), \quad (2.18)$$

где χ — постоянная Кармана, значение которой рекомендовано им равным 0,4. По результатам последних исследований ее значение изменяется в широких пределах (от 0,25 до 1,2).

Существует несколько гипотез определения турбулентных напряжений τ (Прандтля, Кармана, Тейлора, Фридмана, Колмого-

рова, Патрашева), однако до сих пор достаточно физически обоснованной теории или гипотезы не существует. Все гипотезы нуждаются в опытной проверке, а входящие в формулу коэффициенты необходимо определять непосредственно в процессе экспериментов.

Из формулы (2.17) видно, что касательное турбулентное напряжение в условиях плоского прямолинейного движения изменяется от поверхности ко дну пропорционально возрастанию глубины,

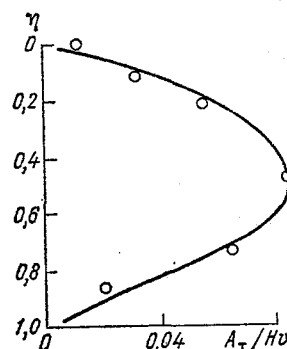


Рис. 2.5. Распределение коэффициента турбулентной вязкости по глубине.

а коэффициент турбулентной вязкости представляет некоторую функцию от y .

Е. М. Минский установил характер распределения турбулентной вязкости в цилиндрической трубе. При этом оказалось, что коэффициент турбулентной вязкости очень быстро возрастает от стенки к середине потока. При турбулентном движении допустимо пренебрегать вязкими напряжениями по всей толще потока, за исключением слоя, непосредственно прилегающего к стенке.

По формуле (2.18) рассчитать A_τ и построить график распределения коэффициента турбулентной вязкости по глубине. Дать анализ распределения A_τ по глубине. График распределения A_τ удобно строить в безразмерном виде (рис. 2.5).

8. Энергетический спектр $S(\omega)$ и диссипация энергии турбулентности ϵ .

Для расчета диссипации энергии турбулентности по структурным функциям используем зависимость вида

$$\epsilon_{\text{стр}} = (A_1/c)^{3/2}/\bar{u}, \quad (2.19)$$

где A_1 — коэффициент, характеризующий диссипацию энергии турбулентности; c — универсальная постоянная, равная 1,9.

Следует отметить, что по зависимости (2.19) ϵ можно рассчитывать в том случае, если для структурной функции при $\tau < \tau_{\text{хар}}$ выполняется закон «двух третей».

Теоретические работы А. Н. Колмогорова и М. М. Обухова показали, что на кривой спектральной плотности, представляющей собой распределение кинетической энергии по частотам, можно выделить так называемый инерционный интервал. В этом инерци-

онном интервале естественным определяющим параметром является диссипация кинетической энергии в теплоту.

Спектральная плотность рассчитана на ЭВМ и представлена в приложении 4.V.

В логарифмических координатах необходимо построить зависимость спектральной плотности от частоты (рис. 2.6); проверить, выполняется ли закон «минус пять третей» для спектральной плотности.

При выполнении этого закона зависимость $S(\omega) = f(\omega)$ может быть аппроксимирована уравнением вида

$$S(\omega) = \alpha_1 \omega^{-n},$$

где α_1 — параметр, определяющий диссипацию энергии турбулентности; ω — частота. Если $\omega = 1$, то $\alpha_1 = S(\omega)$. Следовательно, значение α_1 может быть определено графически, для чего на оси абсцисс откладываем $\omega = 1$ и проводим вертикальную линию до пересечения

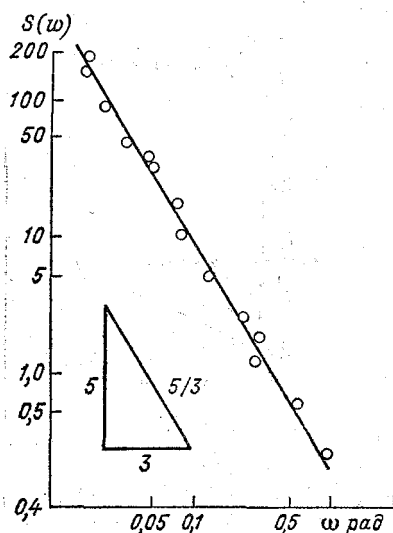


Рис. 2.6. Зависимость спектральной плотности от частоты (в логарифмических координатах).

с прямой линией. Из точки пересечения опускаем перпендикуляр на ось ординат. Отрезок, отсекаемый на оси ординат $\lg S(\omega)$, будет представлять α_1 .

Если выполняется закон «минус пять третей», то

$$\epsilon_{\text{ср}} = (\alpha_1 / c_1)^{3/2} / \bar{u}, \quad (2.20)$$

где c_1 — универсальная постоянная, равная 0,48.

Известно, что скорость диссипации энергии турбулентности относится к числу важнейших физических и статистических характеристик турбулентности и характеризует переход кинетической энергии от движений больших масштабов к движениям меньших масштабов.

Кроме этого, имея данные о скорости диссипации энергии турбулентности, можем определить такие характеристики турбулентности, как внутренний масштаб турбулентности, коэффициент турбулентной вязкости, напряжения Рейнольдса, кинетическую энергию турбулентности.

По зависимостям (2.19) и (2.20) рассчитать диссипацию энергии турбулентности. Сравнить полученные данные. Если расхождение будет не более 25 %, то за расчетную ϵ следует принять среднее значение, полученное по двум формулам. При расхожде-

нии более 25 % за расчетное значение ε следует принимать значение, вычисленное по спектральной функции.

Построить график распределения ε по глубине потока. Дать анализ этого распределения.

Контрольные вопросы

1. Какие Вы знаете концепции макромасштабной турбулентности?

2. От чего зависит продолжительность измерения местной скорости гидрометрической вертушкой?

3. Объясните причины пульсации скоростей в турбулентном потоке.

4. Чем объяснить наличие нескольких, иногда существенно отличающихся друг от друга гипотез макромасштабной турбулентности?

Отчетные документы — см. работу № 2.1 на с. 21.

№ 2.3. Расчет поля скоростей потока и касательных напряжений в русле прямоугольного сечения

Разработка методики расчета полей скорости и сопротивлений движению потоков в руслах прямоугольных форм сечений ограниченной ширины — сложная задача, так как в этом случае необходимо учитывать тормозящее воздействие стенок при движении потока. Этот вопрос имеет большое практическое значение, в частности при расчетах неукрепленных земляных каналов.

Большинство исследователей [7 и др.] рассматривают такие потоки как симметричные, тем самым допуская, что на их струи, находящиеся на осевой вертикали, боковые стенки, имеющие одинаковую шероховатость, оказывают одинаковое тормозящее воздействие. Таким образом обоснована возможность применения для расчетов параметров потоков математического аппарата, разработанного для плоского потока.

Сравнение результатов расчетов по такой методике с натурными данными показывает, что при больших значениях относительной ширины русел (B/h) наблюдается вполне удовлетворительная сходимость расчетных данных с экспериментальными. Некоторым отклонением является волнистый характер изотех, причем места их подъема соответствуют восходящим течениям, а опускания — нисходящим.

В то же время при малых значениях параметра формы сечения ($B/h < 10$) поля скорости, полученные расчетным методом, значительно, и не только количественно, отличаются от натурных данных. Наибольшие скорости при этом заглубляются под поверхность и рассчитанная эпюра резко отличается от полученной по экспериментальным данным. Такой режим В. Н. Гончаров [7]

назвал пространственным. Его причиной является неравенство действующих сил и сил сопротивления по периметру сечения. Неуравновешенные силы вызывают вторичные течения, являющиеся компенсационными. Они и заглубляют массы жидкости, перемещающиеся с большими скоростями, в тех местах, где действующие силы больше сил сопротивления, и, наоборот, поднимают их там, где действующие силы меньше сил сопротивления, тем самым достигая их равенства при безусловном равенстве полных действующих сил и сил сопротивления.

До настоящего времени отсутствуют научно обоснованные критерии деления потоков на потоки пространственного и плоского режимов. В общем виде эта зависимость имеет вид

$$h_v/h = f(B/h, \Delta_d/h, \Delta_c/B \text{ и др.}),$$

где h_v — расстояние от дна до точки, в которой находится максимальная скорость; Δ_d и Δ_c — соответственно шероховатость дна и стенок.

Наиболее часто применяется критерий, предложенный Гончаровым [7] в виде

$$h_v/h = 1,13 \sqrt[3]{\frac{2B}{h} \sqrt{\frac{\Delta_d}{h}}}. \quad (2.21)$$

Анализируя экспериментальные и лабораторные данные, Гончаров пришел к выводу, что пространственный режим переходит в плоский при относительной ширине русла $B/h = 10$. В то же время И. Ф. Карасев [18], выполнив анализ натурных данных, установил, что эффект пространственности проявляется даже при B/h , достигающем 30.

Вторая часть работы посвящена расчету параметров потоков на одиночном изгибе. Как известно [3, 21], в настоящее время имеются два принципиально отличных подхода к трактовке этого вопроса: классический, основанный на концепции движения частиц по криволинейным траекториям, следствием чего является необходимость учета дополнительной центростремительной силы, и подход, основанный на принципе отражения. В соответствии с ним струи жидкости, двигаясь прямолинейно, ударяются о выпуклый берег и отражаются от него, как луч солнца от зеркала. Причем это отражение рассматривается не в плоскости, а в пространстве.

Первый подход математически обеспечен значительно лучше, чем второй. Однако применение второго дает лучшие результаты при расчетах деформаций излучин. Следует отметить нецелесообразность противопоставления этих подходов. В этом, как, впрочем, и в ряде других естественных процессов, проявляется дуализм в решении ряда проблем.

Аналитические методы, разработанные В. М. Маккавеевым, И. Л. Разовским и другими, не доведены до окончательных решений, слишком сложны и нуждаются в большом объеме исходной информации, которой обычно расчетчики не располагают. Поэтому

для расчетов распределения параметров потока на изгибе в работе использованы упрощенные способы. В то же время преподаватель имеет возможность усложнить задачу и в рамках НИРС дать возможность студентам выполнить расчеты по более сложной методике (И. Л. Розовского или другим).

Задачи работы: 1) овладение методикой и аппаратом расчета параметров турбулентного потока прямоугольного сечения при непространственном (плоском режиме); 2) освоение методики расчета ряда характеристик потока, протекающего в условиях пространственного режима; 3) выяснение на конкретном расчетном примере особенностей полей скорости, сопротивлений и уровней потока при его движении на изгибе.

Исходные данные: средняя скорость потока v , глубина русла h , ширина русла $2B$ и средняя крупность частиц k равнозернистой шероховатости, слагающих стенки и дно русла. Варианты расчетного задания приведены в приложении 5.

Литература:

Барышников Н. Б., Попов И. В. Динамика русловых потоков и русловые процессы, п. 1.9.

Порядок выполнения работы

Для прямолинейного русла.

1. Вычислить максимальную скорость всего потока по формуле

$$u_{00} = v \frac{\lg(16,7h/\Delta_d)}{\lg(6,15h/\Delta_d)} \frac{\lg(16,7B/\Delta_c)}{\lg(6,15B/\Delta_c)}, \quad (2.22)$$

имея в виду, что $c_d = c_c = 0,06 \Delta$, и на отдельных скоростных вертикалях по формуле

$$u_{0i} = v \frac{\lg(16,7y/\Delta_d + 1)}{\lg(6,15h/\Delta_d)} \frac{\lg(16,7z/\Delta_c + 1)}{\lg(6,15B/\Delta_c)}, \quad (2.23)$$

расположенных на расстоянии от стенок z , равном Δ_c ; (0,1; 0,2; 0,4; 0,6; 1,0) B , где z — координата, имеющая нулевое значение на боковых стенках русла и направленная к его середине, изменяется от 0 до B .

2. Рассчитать и построить эпюры распределения местных скоростей на каждой из этих вертикалей по формуле (2.3). Расчет выполнить для значений y , равных Δ_d ; (0,1; 0,3; 0,5; 0,6; 0,8; 1,0) h .

3. Определить средние для указанных вертикалей скорости по формуле

$$v_{Bi} = u_{0i} \frac{\lg(6,15h/\Delta_d)}{\lg(16,7h/\Delta_d)}$$

и построить эпюры их распределения по ширине потока.

4. Вычислить по формулам:

$$\tau_d = \frac{\rho}{[4 \lg (16,7h/\Delta_d)]^2} \frac{u_{0i}^2}{2},$$

$$\tau_c = \frac{\rho}{[4 \lg (16,7B/\Delta_c)]^2} \frac{u_{Bi}^2}{2}. \quad (2.24)$$

Построить эпюры распределения касательных напряжений сопротивлений на стенке и дне потока (u_{Bi} — местная скорость на осевой вертикали, расположенной на расстоянии B от стенок). Расчет произвести для значений z и y , указанных в предыдущих пунктах.

5. Какие качественные изменения произойдут в скоростном поле потока и распределении касательных напряжений на его дне при уменьшении его ширины до значения $2B = 3h$ при прочих равных условиях? Указать основные причины, вызывающие переход из непространственного режима потока в пространственный. Ответ иллюстрировать схемами.

6. Определить положение гидравлического центра сечения по формуле (2.21), местные скорости обтекания выступов шероховатости дна и касательное напряжение на дне для условий, приведенных в п. 5.

Для изгиба русла с углом поворота $3/4 \pi$.

7. Рассчитать и начертить эпюры распределения средних скоростей по ширине потока в основном створе изгиба:

а) по закону площадей

$$v_i = 1,08 \frac{v_0 r_0}{r_i} (b/B)^{0,08},$$

где $b_i = r - 4B$, до значений $r_0 = 5B$ и $b_i = 6B - r$ при $r > 5B$; по номограммам, приведенным в [3, с. 104]. Расчет выполнить для значений r , равных $4B + \Delta$; (4,1, 4,2, 4,4, 4,6, 5,0, 5,4, 5,6, 5,8, 5,9) B ; $6B - \Delta$ (радиус изгиба оси потока $r_0 = 5B$).

8. Вычислить поперечный уклон водной поверхности и превышение уровня у наружной стенки по сравнению с внутренней (по формулам, приведенным в [3, с. 110]) на изгибе русла.

Контрольные вопросы

1. Указать причины появления поперечных скоростей смещения и циркуляции и створы, где они достигают наибольших значений. Ответ иллюстрировать схемами.

2. В какой системе координат надо учитывать центробежную силу?

3. Какие аналитические методы расчета параметров потока на изгибе русла Вам известны? На каких уравнениях они основаны? Какие допущения сделаны при их решении?

4. Каковы особенности поведения потоков на изгибах на малых и больших реках?

5. Дать краткую оценку дополнительных сопротивлений на изгибе.

Отчетные документы

Аналогичны приведенным в лабораторной работе № 2.1.

№ 2.4. Расчеты распределения скоростей по сечению руслового потока и пропускной способности естественных русел

При возведении некоторых гидротехнических сооружений важно знать не только максимальный расход воды определенной обеспеченности, но и эпюру распределения средних на вертикалях скоростей по ширине потока, а также уметь рассчитать распределение местных скоростей по глубине естественных потоков. В частности, такая задача стоит при расчетах глубин местного размыва при проектировании мостовых переходов и критических скоростей в больших земляных каналах трапецидальной, полигональной или другой формы сечения.

В данной лабораторной работе рассмотрены методы расчета полей скорости в сечениях простых форм, к которым относятся русла без переломов поперечного профиля. Сечения сложных форм частным случаем которых являются русла с поймами, характеризуются резко выраженной неравномерностью движения и массообменом между русловым и пойменным потоками, вызывающим эффект их взаимодействия. Методы расчета характеристик последних рассмотрены в лабораторной работе № 2.6.

Методика расчета скоростей в руслах простых форм основана на гипотезе о равномерном движении, т. е. на применении формулы Шези. Ввиду того что сведения об уклонах водной поверхности обычно отсутствуют, что приводит к необходимости весьма приближенного определения значений коэффициента шероховатости по общеизвестным таблицам М. Ф. Срибного, И. Ф. Карасева, В. Т. Чоу, Дж. Бредли или др., как правило, применяют метод последовательного приближения.

В качестве расчетной примем методику, разработанную А. В. Караушевым [3, 18] и основанную на применении формул Шези—Павловского или Шези—Маннинга.

Задача работы: освоение методики А. В. Караушева, В. Н. Гончарова и Г. В. Железнякова учета влияния формы сечения на его пропускную способность, методов расчета полей скорости и пропускной способности естественных русел, а также учет влияния на нее формы сечения.

Исходные данные: ширина русла B , максимальная глубина h_0 , уклон водной поверхности I , 5 %-ная крупность наиболее крупных частиц, слагающих русло k_5 (шероховатость русла не из-

меняется по ширине потока). Профиль поперечного сечения русла задается преподавателем. Индивидуальные задания приведены в приложении 6.

Литература:

Барышников Н. Б., Попов И. В. Динамика потоков и русловые процессы, п. 1.10.

Железняков Г. В. Теория гидрометрии, гл. 8.

Караушев А. В. Речная гидравлика, § 5.

Порядок выполнения работы

1. Определить площадь живого сечения.
2. Рассчитать расход воды в русле прямоугольного сечения, принимая режим движения наносов безгрядовым, используя для этого формулу Шези—Маннинга. Коэффициент шероховатости n в первом приближении определить по формуле (2.2).
3. По формулам

$$r = h_{\max}/h_c - 1, \quad \beta_* = \frac{1}{F \sqrt{h_c}} \int_0^B h_i^{3/2} db$$

с погрешностью до 0,1 определить параметры формы сечения по методикам В. Н. Гончарова и Г. В. Железнякова. Используя полученные значения, рассчитать пропускную способность русла естественной формы

$$Q = \beta Q_{\text{пр}},$$

где Q и $Q_{\text{пр}}$ — пропускная способность русел естественной и прямоугольной форм сечения;

$$\beta = (1 + r)^{1,67} / (1 + 1,67r).$$

4. Используя методику А. В. Караушева, рассчитать распределение средних на вертикалях скоростей по ширине руслового потока [3, с. 75—76], принимая в качестве расчетного значение расхода Q , полученное с учетом параметра формы сечения по Гончарову. Затем по формуле (2.3) определить местные скорости на каждой из пяти скоростных вертикалей.

5. Построить поле изотих и эпюры распределения средних на вертикалях скоростей по ширине руслового потока.

Контрольные вопросы

1. Какие режимы движения жидкости и в какие периоды наблюдаются на реках?
2. В какую фазу года и на каких участках течение в реках можно принимать квазиравномерным и квазиустановившимся?

3. Когда и где на реках в наиболее полной форме проявляется неустановившееся движение и движение потока с массообменом по длине?

4. Чем объяснить недостаточную эффективность методов учета влияния формы сечения на пропускную способность русел (В. Н. Гончарова, Г. В. Железнякова, М. А. Мосткова и др.)?

5. Какие формы сечения русел при прочих равных условиях имеют наибольшую пропускную способность?

6. Какова роль вторичных течений?

№ 2.5. Расчет параметров потоков под ледяным покровом

Большинство рек на территории Советского Союза покрыто ледяным покровом в течение продолжительного периода. Характер их замерзания зависит от размеров реки, направления течения (с севера на юг или, наоборот, с юга на север) и других факторов. Причем в период замерзания коэффициенты шероховатости нижней поверхности льда $n_{\text{л}}$ достигают наибольших значений. Так, измерения на реках Енисее и Ангаре показали, что значения $n_{\text{л}}$ могут достигать 0,08 и даже 0,12 довольно быстро (в течение одного-полутора месяцев), уменьшаясь до 0,030—0,035. В последующий период значения $n_{\text{л}}$ продолжают медленно уменьшаться под влиянием речного потока и в предвесенний период составляют 0,016—0,025. В весенний период начинается разрушение ледяного покрова и как следствие некоторое увеличение $n_{\text{л}}$ до 0,030.

Измерения расходов воды в этот период сопряжено с рядом трудностей, к которым следует отнести наличие мощного ледяного покрова, отрицательные температуры воздуха, приводящие к обледенению приборов и другой измерительной техники. Особенно сложно измерять расходы воды в переходные периоды, т. е. осенью во время замерзания и весной во время вскрытия рек, когда выход на лед и использование большинства плавательных средств (лодки, плоты и прочие), обычно применяемых при измерениях, запрещены. Все это привело к развитию методов расчетов параметров речных потоков под ледяным покровом, которые можно разделить на две группы. К первой относятся методы, основанные на теории плоского потока, что накладывает определенные ограничения на их применение. В этих методах поток рассматривается как плоскопараллельный, имеющий две тормозящие поверхности: дно и нижнюю поверхность ледяного покрова. Исходя из этого расчетные методы этой группы применяются только к тем рекам, где ледяной покров полностью покрывает весь русловой поток. Следовательно, из расчетов исключаются реки в период их замерзания или тогда, когда происходит истощение водных запасов, что вызывает провисание ледяного покрова и он покрывает только часть водной поверхности руслового потока. По этой методике можно рассчитывать параметры потоков, протекающих по полностью затопленному многослойному льду.

Ко второй группе относятся методы, основанные на расчетах осредненных для сечения в целом значений коэффициентов Шези или шероховатости, называемого *приведенным коэффициентом шероховатости*. Эти методы основаны на следующих допущениях:

1. Движение потоков под ледяным покровом считается равномерным, что позволяет использовать для расчетов формулу Шези.

2. Живое сечение потока принимается состоящим из двух частей, скорости в каждой из которых определяются сопротивлением соответствующей части смоченного периметра (дна или ледяного покрова). Деление сечения на эти части осуществляется пропорционально длине соответствующей части смоченного периметра: или по линии раздела, соединяющей точки, соответствующие положению максимальных на вертикалях скоростей потока. Это приводит к субъективизму при определении частей живого сечения. В частности, принимают $F_{\text{л}} = F_{\text{д}}$ или $R_{\text{л}} = R_{\text{д}} = R$.

3. Большинство исследователей при выводе формул рассматривают живое сечение между двумя тормозящими поверхностями с различной шероховатостью (дно и нижняя поверхность ледяного покрова). Однако некоторые для открытого русла считают дополнительные сопротивления от льда равномерно распределенными по смоченному периметру.

4. Общим недостатком для всех методов является отсутствие таблиц для определения значений коэффициента шероховатости нижней поверхности льда $n_{\text{л}}$, аналогичных таблицам Срибного или Чоу.

Задача работы: расчет параметров потоков под ледяным покровом различными методиками.

Исходные данные: глубина потока при открытом русле h_0 ; высота выступов шероховатости дна $\Delta_{\text{д}}$; отношение $\Delta_{\text{л}}/\Delta_{\text{д}}$, где $\Delta_{\text{л}}$ — высота выступов шероховатости льда; параметр $\alpha_2 = \chi_{\text{л}}/\chi_{\text{д}}$, характеризующий соотношение смоченных периметров нижней поверхности льда ($\chi_{\text{л}}$) и дна ($\chi_{\text{д}}$); уклон водной поверхности при открытом русле I_0 (принимается равным уклону под ледяным покровом I , т. е. $I_0 = I$); расход воды при открытом русле равен расходу воды под ледяным покровом. Варианты расчетного задания приведены в приложении 7.

Л и т е р а т у р а:

Барышников Н. Б., Попов И. В. Динамика русловых потоков и русловые процессы, п. 1.12.

Готлиб Я. Л., Донченко Р. В., Пехович А. И., Соколов И. Н. Лед в водохранилищах и нижних бьефах ГЭС, п. 9.4.

Порядок выполнения работы

1. По методике В. Н. Гончарова напорный поток рассматривается как плоскопараллельный, протекающий между двумя тормозящими стенками (льдом и дном). Этот поток делится на линии

максимальных скоростей на два (подо льдом и у дна). Параметры потока подо льдом обозначаются индексом л, а у дна — д.

Рассчитать глубину потока, протекающего в зимний период при наличии сплошного ледостава, в предположении, что его расход равен расходу воды в летний период:

$$h_3/h_0 = [1 + (\Delta_l/\Delta_d)^{0,2}]^{0,385},$$

где h_0 и h_3 — средние глубины потока в летний период и подо льдом с учетом, что $h_l/h_d = (\Delta_l/\Delta_d)^{0,2}$.

Определить глубины потока подо льдом h_l , у дна h_d и полную глубину потока H под ледяным покровом (при условии неизменности уровня воды).

2. Рассчитать скорости потока под ледяным покровом по формуле

$$v = v_l = v_d = 4 \lg \frac{6,15 h_d}{\Delta_d} \sqrt{2 g h_d I}.$$

3. Определить касательные напряжения сопротивления движению потока подо льдом $\tau_{л.с}$ и у дна $\tau_{д.с}$. Для условий равномерного движения действующая сила равна силе сопротивления. Следовательно, $\tau_{д.д} = \tau_{д.с}$ и $\tau_{л.д} = \tau_{л.с}$ и значения действующих касательных напряжений можно рассчитать по формулам $\tau_l = \gamma h_l I$ и $\tau_d = \gamma h_d I$.

4. Определить значения коэффициентов шероховатости и Шези у дна C_d и n_d и подо льдом C_l и n_l по формулам:

$$n = 0,044 \Delta^{1/6}; C = h^y/n,$$

используя данные о глубинах, полученные в п. 1.

5. Рассчитать осредненные значения коэффициентов Шези и шероховатости по методикам Н. Н. Павловского:

$$n_c = \sqrt{\frac{n_d^2 + \alpha_2 n_l^2}{1 + \alpha_2}};$$

$$C_c = C_d C_l \sqrt{\frac{1 + \alpha_2}{\alpha_2 C_d^2 + C_l^2}}, \quad (2.25)$$

В. И. Синотина для всего смоченного периметра

$$n_c = \frac{n_d}{1,67 \left[\left(0,6 \lg \frac{n_d}{n_l} + 0,5 \right)^{1,75} + \frac{n_d}{n_l} \left(0,5 - 0,6 \lg \frac{n_d}{n_l} \right)^{1,75} \right]} \quad (2.26)$$

и для смоченного периметра без учета нижней поверхности льда

$$n_c = \frac{n_d}{\left(0,6 \lg \frac{n_d}{n_l} + 0,5 \right)^{1,75} + \frac{n_d}{n_l} \left(0,5 - 0,6 \lg \frac{n_d}{n_l} \right)^{1,75}}.$$

6. Выполнить сравнение и анализ результатов расчетов.

Контрольные вопросы

1. Объяснить, почему по методике В. Н. Гончарова нельзя рассчитывать параметры потоков в период ледохода?
2. Как зависит коэффициент шероховатости нижней поверхности ледяного покрова от характера замерзания и размеров реки?
3. Почему происходит увеличение коэффициентов шероховатости перед вскрытием реки в весенний период?
4. В каких случаях можно рассчитывать параметры потоков, протекающих по многослойному ледяному покрову?
5. Как влияет работа ГЭС на ледяной покров в ее нижнем бьефе?

№ 2.6. Расчет пропускной способности русел с поймами

Методы расчетов пропускной способности русел основаны на определении их морфометрических характеристик по результатам экспедиционных работ или по крупномасштабным планово-высотным материалам и описательной характеристике сопротивлений русел, служащих для определения коэффициентов шероховатости по соответствующим таблицам (М. Ф. Срибного, И. Ф. Карасева, В. Т. Чоу, Дж. Бредли или ЛГМИ). Используя эти данные и принимая априори движение потока равномерным, рекомендуется расчет пропускной способности выполнять на основе формулы Шези, т. е. по формуле

$$Q = Q_p + Q_n = F_p C_p \sqrt{R_p I_p} + F_n C_n \sqrt{R_n I_n}.$$

Для широких водотоков ($R \approx h$)

$$Q = Q_p + Q_n = F_p C_p \sqrt{h_p I_p} + F_n C_n \sqrt{h_n I_n}. \quad (2.27)$$

Как показали исследования последнего периода [2, 16 и др.], движение потоков в руслах с поймами нельзя рассматривать как равномерное, так как оно неравномерное, неустановившееся, с переменным по длине расходом воды. Поэтому расчет пропускной способности русел с поймами следует выполнять на основе системы уравнений движения потоков с переменным по длине расходом воды и неразрывности:

$$I_p = \frac{v_p^2}{C_p^2 h_p} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\alpha_K v^2}{2g} \right)_p + \frac{(q_1 + q_n) v_p}{g F_p} + \frac{\partial}{g \partial t} (\alpha_{Br} v_p), \quad (2.28)$$

$$I_n = \frac{v_n^2}{C_n^2 h_n} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\alpha_K v^2}{2g} \right)_n + \frac{(q_2 + q_n) v_n}{g F_n} + \frac{\partial}{g \partial t} (\alpha_{Br} v_n), \quad (2.29)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial F}{\partial t} = q_1 + q_2, \quad (2.30)$$

где I — уклон водной поверхности; v — средняя скорость потока; α_K и α_B — коэффициенты Кориолиса и Буссинеска; C — коэффициент Шези; q_1 , q_2 и q_v — расходы воды на единицу длины потока за счет склонового стока (1, 2) и взаимодействия руслового и пойменного потоков; F — площадь поперечного сечения; индексы p и n означают, что параметры относят к руслу или пойме.

Решая уравнения (2.28) и (2.29) относительно скорости, получаем:

$$v_p = C_p \sqrt{h_p I_p \left(1 - \frac{\sum \varepsilon_{ip}}{I_p}\right)}, \quad (2.31)$$

$$v_n = C_n \sqrt{h_n I_n \left(1 - \frac{\sum \varepsilon_{in}}{I_n}\right)}. \quad (2.32)$$

Выражения (2.31) и (2.32) отличаются от (2.27) на величину радикала $\sqrt{1 - \frac{\sum \varepsilon_i}{I}}$, учитывающего неравномерность движения ($\varepsilon_1 = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\alpha_K v^2}{2g} \right)$), массообмен между русловым и пойменным потоками ($\varepsilon_2 = \frac{qv}{gF}$) и нестационарность движения ($\varepsilon_3 = \frac{\partial}{\partial t} (\alpha_B v)$).

Как показал анализ, выполненный по данным специальных наблюдений на реках Луге и Пьяне, которые производились в двух смежных створах и по границе раздела между русловым и пойменным потоками, величины ε_1 и ε_2 значимы и составляют соответственно 55 и 19,5 % уклона водной поверхности, а величина ε_3 мала и составляет только доли процента от уклона водной поверхности. Поэтому величиной ε_3 в расчетах пренебрегают. Следовательно, (2.31) и (2.32) можно представить в виде:

$$v_p = C_p \sqrt{h_p I_p \left(1 - \frac{\varepsilon_{1p} + \varepsilon_{2p}}{I_p}\right)}, \quad (2.33)$$

$$v_n = C_n \sqrt{h_n I_n \left(1 - \frac{\varepsilon_{1n} + \varepsilon_{2n}}{I_n}\right)}. \quad (2.34)$$

Расчетные значения скоростей, полученные по (2.33) и (2.34), оказались близко соответствующими натурным данным. Однако для массовых расчетов эти выражения в настоящее время не приемлемы из-за отсутствия ряда исходных параметров (данных по смежным створам, расходов массообмена между русловым и пойменным потоками, уклонов пойменных потоков и др.). Учитывая это, в последние годы были предложены полуэмпирические методы (в основном для условий параллельности динамических осей потоков), разработанные по экспериментальным или натурным данным с учетом теории движения потоков с переменной массой. Основным их преимуществом является учет эффекта взаимодейст-

вия руслового и пойменного потоков с помощью различных определяющих параметров.

Рассмотрим методику, разработанную в Ленинградском гидрометеорологическом институте и основанную на расчетной зависимости

$$v_p/v_{p.б} = f(h_p/h_{p.б}, \alpha), \quad (2.35)$$

где v — средняя скорость руслового потока; h — средняя глубина русла; индексы p и $p.б$ означают, что параметр определяется для русловой части потока при расчетном уровне или уровне

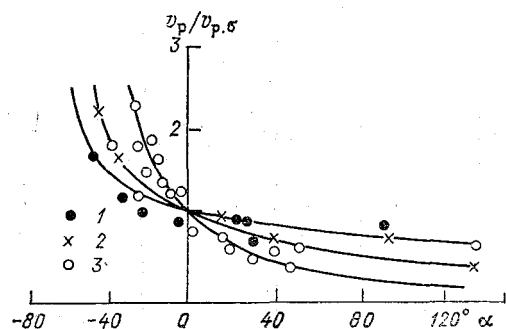


Рис. 2.7. Кривые $v_p/v_{p.б} = f(h_p/h_{p.б}, \alpha)$
1) $h_p/h_{p.б} = 1,10$; 2) $h_p/h_{p.б} = 1,25$; 3) $h_p/h_{p.б} = 1,50$.

затопления бровок прирусловых валов; α — угол между динамическими осями руслового и пойменного потоков.

Зависимость (2.35) представлена в графической форме (рис. 2.7), причем отрицательные значения угла α соответствуют второму типу взаимодействия потоков [2, 3], а положительные — третьему.

В этой методике значение $v_{p.б}$ рекомендуется определять исходя из предположения, что движение потока в основном русле, до выхода воды на пойму, является равномерным, т. е. с учетом формулы Шези.

Аналогичным образом были получены расчетные графические зависимости (рис. 2.8 и 2.9) вида:

$$I_p/I_{p.б} = f(h_p/h_{p.б}, \alpha), \quad (2.36)$$

$$n_p/n_{p.б} = f(h_p/h_{p.б}, \alpha), \quad (2.37)$$

где I — уклон водной поверхности; n — коэффициент шероховатости.

Наибольшие трудности представляет определение значений $I_{p.б}$ и $n_{p.б}$. Так, при определении значений $n_{p.б}$ по таблицам Срибного, Карасева, Чоу или другим и описательной характеристике русла среднее значение погрешности составляет 25—30 %, наибольшее 60—70 %.

Анализ таблиц, рекомендуемых для определения коэффициента шероховатости, показал, что в них влияние ряда определяю-

ших параметров учитывается недостаточно. В качестве таковых для определения поправки к табличным значениям приняты форма сечения, характеризуемая параметром B_p/h_p , и размеры русла, характеризуемые его шириной B_p .

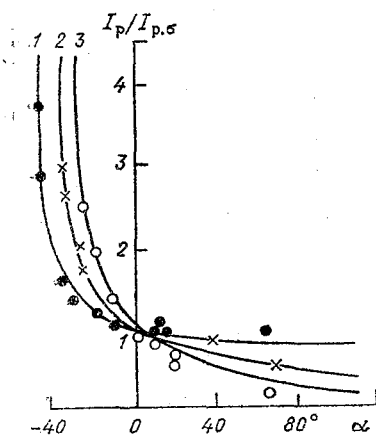


Рис. 2.8. Кривые $I_p/I_{p,с} = f(h_p/h_p, \alpha)$
1—3 — см. рис. 2.7.

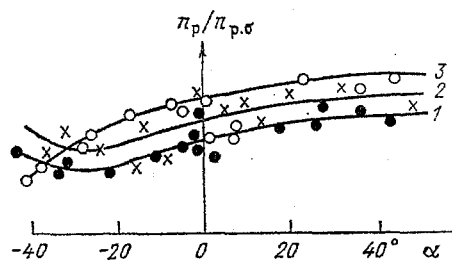


Рис. 2.9. Кривые $n_p/n_{p,с} = f(h_p/h_p, \alpha)$
1—3 — см. рис. 2.7.

Представим значение поправки к табличным значениям коэффициента шероховатости в виде

$$\Delta n = n_{p,с} - n_t. \quad (2.38)$$

На основе данных натурных измерений более чем на 100 реках СССР получена графическая зависимость (рис. 2.10) вида

$$\Delta n = f(B_p/h_p, B_p). \quad (2.39)$$

Таким образом, расчет пропускной способности русла можно выполнять либо на основе графической зависимости (2.35) или по зависимостям (2.36), (2.37) с учетом поправки Δn к значению $n_{p,с}$, определяемой по (2.39).

Значительно труднее разработать методику расчета пропускной способности пойм, что в первую очередь обусловлено сложностью их морфологического строения, определяющего динамику затопления. В период пропуска паводков на поймах наблюдаются течения, направленные противоположно русловому потоку, застойные, нетранзитные зоны, многочисленные протоки и другие неоднородности, существенно затрудняющие определение расходов воды. К тому же, несмотря на сложность структуры пойменных течений, Наставление [28] рекомендует значительное, примерно вдвое, сокращение по сравнению с русловым потоком числа скоростных вертикалей на пойме. Помимо субъективных факторов,

существенным является неустановившийся характер движения пойменных потоков, когда увеличение продолжительности измерений может приводит к снижению точности получаемой информации. К сожалению, в практической деятельности эти рекомендации не выдерживаются и иногда число вертикалей сокращается до одной-двух даже на широких поймах. Все это резко снижает качество исходной информации и также затрудняет разработку

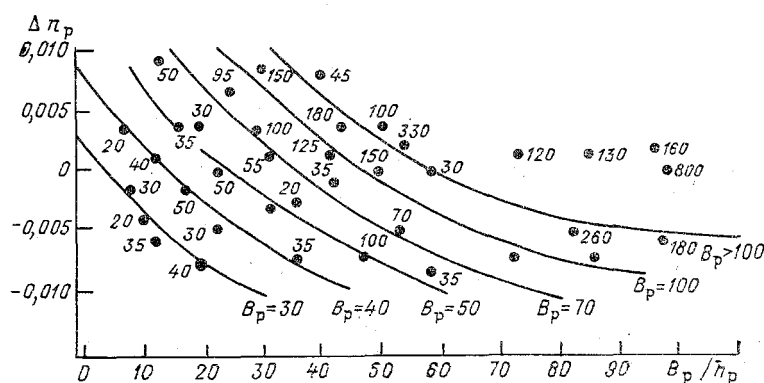


Рис. 2.10. Кривые зависимости $\Delta\pi_p = f(B_p/h_p, B_p)$.
Около точек — значения B_p .

надежной методики расчетов. Именно поэтому до настоящего времени применяется методика расчетов пропускной способности пойм, основанная на формуле Шези, т. е. на теории равномерного движения. В то же время очевидно, что движение пойменного потока неравномерное, неустановившееся, с переменным по длине расходом воды. Попытки разработки более совершенных методик были предприняты как в Советском Союзе, так и за рубежом, однако эти методики могут быть рекомендованы лишь для приближенных расчетов.

Задача работы: рассчитать пропускную способность русла с поймой по формуле Шези, т. е. на основе концепции равномерного движения, и по методикам, разработанным в ЛГМИ.

Литература:

Барышников Н. Б. Морфология, гидрология и гидравлика пойм, гл. 3 и 4.

Барышников Н. Б., Попов И. В. Динамика русловых потоков и русловые процессы, п. 1.15.

Порядок выполнения работы

1. По заданному преподавателем профилю поперечного сечения русла с поймой определить морфометрические характеристики русла (средние глубины и площади живого сечения) при уровнях

затопления бровок прирусловых валов, а также расчетных, соответствующих относительным глубинам $h_p/h_{p.б.}$, равным 1,10; 1,25 и 1,50.

Для этого необходимо построить кривую зависимостей $h_p = f(H)$ и по ней определить значение $h_{p.б.}$, т. е. среднюю глубину, соответствующую уровню затопления бровок прирусловых валов. Затем определить уровни, соответствующие значениям относительных глубин.

По данным профиля поперечного сечения построить кривую $F_p = f(H)$. По уровням воды и кривой $F_p = f(H)$ определяют значения площадей поперечного сечения русла при уровне затопления бровок прирусловых валов и расчетных.

2. По плану участка поста определить значение и знак угла α . Как известно [2, 3], положительные значения угла α соответствуют III типу взаимодействия руслового и пойменного потоков, а отрицательные — II типу. Поэтому прежде всего на плане участка поста, предоставленного преподавателем, студент должен наметить границы затопления поймы при каждом из расчетных уровней. Определить общее направление течения в русле и на пойме. Направление течения руслового потока, как правило, при повышении уровня воды не изменяется, а на пойме может изменяться (V тип взаимодействия потоков). Угол α определяется как угол между осредненными векторами, представляющими направление движения потока в русле и на пойме на участке, расположенном ниже расчетного створа.

3. Определить уклон водной поверхности потока при уровнях затопления бровок прирусловых валов ($I_{p.б.}$), который приравняется либо уклону водной поверхности руслового потока при меженных уровнях, либо усредненному уклону дна русла на расчетном участке.

4. По описательной характеристике русла получить табличное значение коэффициента шероховатости n_t , используя для этого таблицы Срибного, Карасева или ЛГМИ, приведенные в приложении 10. По кривой $\Delta n = f(B_p/h_p, B_p)$ (рис. 2.10) определить поправку Δn . Значение $n_{p.б.} = n_t + \Delta n$.

5. Рассчитать значение $v_{p.б.}$

$$v_{p.б.} = C_{p.б.} \sqrt{h_{p.б.} I_{p.б.}}$$

Учитывая, что по формуле Маннинга $C = h^{1/6}/n$, получим

$$v_{p.б.} = h_{p.б.}^{2/3} I_{p.б.}^{1/2} / n.$$

Вместо формулы Маннинга можно применять другую формулу (Павловского, Железнякова и тому подобные).

6. Используя графическую зависимость (2.35), приведенную на рис. 2.7, получим значения $v_p/v_{p.б.}$, соответствующие относительным глубинам $h_p/h_{p.б.} = 1,10; 1,25$ и $1,50$ и значения расчетных скоростей

$$v_p = (v_p/v_{p.б.}) v_{p.б.}$$

7. По графическим зависимостям (2.36) и (2.37), приведенным на рис. 2.8 и 2.9, значениям углов α и относительных глубин (1,10; 1,25; 1,50) определить расчетные значения относительных уклонов руслового потока ($I_p/I_{p.б}$) и коэффициентов шероховатости ($n_p/n_{p.б}$).

8. Определить расчетные значения уклонов водной поверхности руслового потока $I_p = (I_p/I_{p.б}) I_{p.б}$ и коэффициентов шероховатости русла $n_p = (n_p/n_{p.б}) \cdot n_{p.б}$.

9. Рассчитать пропускную способность русла для каждого значения относительных глубин по формуле (2.27):

а) по данным о скоростях руслового потока, полученных по графическим зависимостям (2.35) (см. п. 6);

б) по данным об уклонах водной поверхности и коэффициентах шероховатости, полученным в п. 7 и 8;

в) по таблицам Срибного, Карасева, ЛГМИ, Чоу и Бредли (приложения 8—12).

10. Сравнить результаты расчетов с данными измерений. Оценить погрешности расчетов и вскрыть их основные причины.

11. Рассчитать пропускную способность поймы. С этой целью по профилю поперечного сечения поймы определить ее средние глубины и площади поперечного сечения при расчетных уровнях. По описательной характеристике сопротивления поймы и соответствующим таблицам (Срибного, Карасева, ЛГМИ и др.) определить значение коэффициента шероховатости поймы. Приняв значения уклонов водной поверхности потока поймы равными уклонам водной поверхности русловых потоков, рассчитать по формуле (2.27) пропускную способность поймы при трех расчетных уровнях.

12. Оценить погрешности расчетов пропускной способности пойм, сравнить результаты расчетов с натурными данными. Выполнить анализ причин погрешностей этих расчетов.

Примечание. Из-за большого объема исходная информация не приводится, а выдается преподавателем.

В приложении 13 приведен пример выполнения расчетной работы.

Контрольные вопросы

1. Как пойменный поток воздействует на скоростное поле и другие гидравлические характеристики руслового потока?

2. Какие типизации процессов взаимодействия руслового и пойменного потоков Вам известны?

3. В чем сущность процесса взаимодействия руслового и пойменного потоков?

4. Какое воздействие русловой поток оказывает на пойменный поток?

5. Как происходит процесс затопления и опорожнения пойм?

2.3. Экспериментальные работы

№ 2.7. Процесс отделения вихрей от стенки

В открытых русловых потоках обычно наблюдается турбулентный режим или движение потоков в переходной области. Однако на ручьях и малых реках перед их пересыханием, перемерзанием или при сильном зарастании растительностью возможно движение воды при ламинарном режиме. В ламинарном равномерном потоке действующие силы уравниваются силами вязкости, т. е. молекулярными силами. При возрастании действующих сил наступают критические условия, при которых они уже не могут быть уравновешены только силами вязкости. В связи с этим наступает кризис ламинарного режима. При этом наряду с сохранением молекулярного обмена возникает и «молярный» обмен, т. е. перемешивание крупных масс потока. Внутри и на периферии таких масс также развивается сопротивление сил вязкости, которые совместно с сопротивлениями молярного обмена уравнивают действующие силы. Режим потока, при котором возникает молярный обмен, и называется *турбулентным*.

При турбулентном режиме возникают вихри двух видов. Из них решающими по значению в процессе турбулизации потока являются вихри, порожденные стенкой и затем вторгающиеся в толщу потока. Именно этими вихрями, которые называются *основными*, осуществляется торможение потока, турбулентный так называемый молярный массообмен, перемешивание водных масс, теплообмен и процессы транспорта тяжелых зерен в потоке. Этот механизм торможения и взаимодействие таких вихрей со смежными массами и определяют профиль скоростей руслового потока.

Процесс образования вихрей при плоском дне и грядовой форме перемещения наносов имеет существенные различия. Обычно рассматривается плоская задача, однако при возникновении гряд необходимо перейти к рассмотрению пространственной задачи. Действительно, зона, где генерируются вихри, располагается в подвалье гряды, которая, как известно, является пространственным образованием. Следует отметить, что многочисленные концепции, объясняющие причины возникновения донных гряд, не полностью вскрывают физическую картину этого сложного процесса. Это обусловлено как недостатками самих концепций, так и недостаточной точностью и надежностью экспериментальных данных о внутренней структуре потока при грядовой и безгрядовой формах перемещения наносов. Отсутствие надежных методов исследований и аппаратуры для вскрытия внутренней структуры потока, в частности недостатки метода фотокиносъемки, приводят к необходимости широкого использования визуальных наблюдений.

Задачи работы: визуальное изучение процессов зарождения на стенке и распространения в толщу потока основных вихрей как на гладкой стенке, так и при наличии на ней одиночной

гряды, измерение гидравлических характеристик потока и характеристик сечения трубы для последующего расчета критериальных чисел, характеризующих режим потока.

Л и т е р а т у р а:

Барышников Н. Б., Попов И. В. Динамика русловых потоков и русловые процессы, п. 1.3.3.

Гончаров В. Н. Динамика русловых потоков, гл. 1, с. 7—17.

Гришанин К. В. Динамика русловых потоков, гл. II, п. 5, с. 66—89.

Описание установки и методика выполнения эксперимента

Экспериментальная установка может быть выполнена в двух вариантах и по своему устройству близка к установке Рейнольдса (рис. 2.11) с той лишь разницей, что красящее вещество подводится не в середину круглой трубы, а на внутреннюю поверхность трубы квадратного сечения. В другом варианте предусматривается параллельная установка двух труб квадратного сечения.

В первой половине трубы монтируется одиночный выступ шероховатости в виде штифта, который представляет собой винт, ввернутый в нижнюю стенку трубы, что позволяет менять высоту выступа. Во второй половине трубы (или во второй трубе) устанавливается одиночная гряда высотой 1 см и длиной 10 см. Эта гряда подвижная и может перемещаться (выниматься) внутри трубы.

Такая установка позволяет изучать различные режимы движения потока: ламинарный, турбулентный и в переходной области, проводя параллельные измерения скоростей и других параметров потока. На установке также изучается процесс образования вихрей на гладком и шероховатом дне, причем как при одиночном выступе шероховатости, так и при наличии одиночной гряды.

Методика проведения эксперимента основана на визуальных наблюдениях и измерениях расходов воды объемным способом и других параметров потока.

Как известно [3, 11], при возникновении донных гряд резко увеличиваются сопротивления движению потока, что приводит к уменьшению его скоростей. Этот вопрос изучен недостаточно. Известно, что сопротивление движению потока при донногрядовом режиме перемещения наносов значительно больше, чем при тех же грядах, но неподвижных, закрепленных с помощью цементного молока. Поэтому визуальное изучение процесса позволяет наблюдать изменение режима сопротивлений при различных шероховатостях дна.

Экспериментальная работа выполняется следующим образом:

1. Регулируя поступление и сброс воды, необходимо добиться установившегося режима движения ее в первой трубе. При малых

открытиях задвижки в трубе устанавливается ламинарный режим, при котором подаваемая краска движется только в пристенном слое, с увеличением расхода воды режим потока переходит в турбулентный. При этом и появляется возможность наблюдения за процессом образования вихрей в окрашенных массах жидкости и их отделения от стенки.

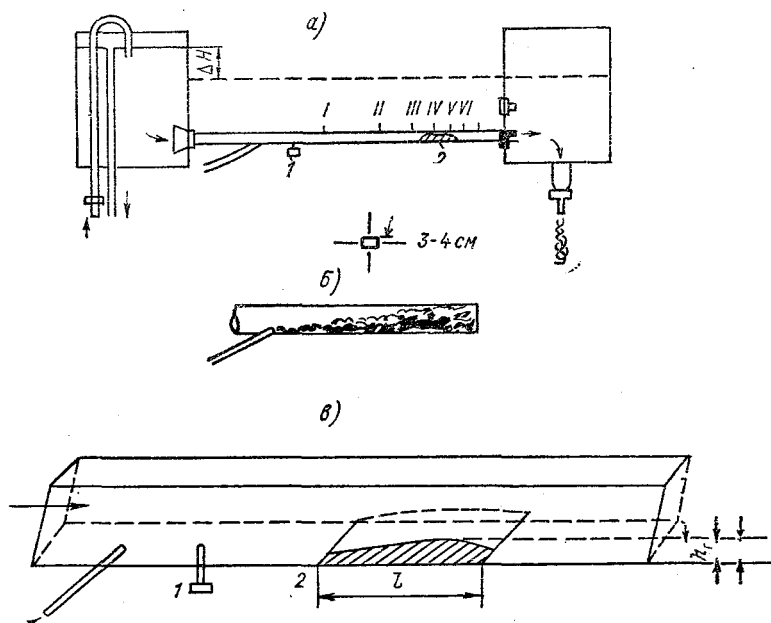


Рис. 2.11. Экспериментальная установка для изучения процессов зарождения и отрыва вихрей от стенки.

a — общий вид; *b* — фрагмент трубки из оргстекла со схематическим изображением процесса образования и отрыва вихрей от стенки; *c* — фрагмент трубки из оргстекла с макетом донной гряды.

Особое внимание при проведении эксперимента должно быть уделено определению начального режима отделения вихрей. Все произведенные наблюдения тщательно зарисовываются или же фиксируются фотоаппаратом. Зарисовки и фотографии будут служить отчетными документами. Затем эксперимент повторяется, но уже с другой трубой, в которой установлена неподвижная гряда.

2. Для определения чисел Рейнольдса и Фруда необходимо измерить температуру и расходы воды (объемным способом). Площадь сечения трубы 9 см^2 (возможны другие размеры). Эксперименты проводятся при турбулентном и ламинарном режимах движения жидкости, а также в переходной области. При введении гряды в поток возможно возникновение на отдельных участках трубы различных режимов движения жидкости. Поэтому необходимо зафиксировать размеры участков с различными режи-

мами и при расчетах критериальных чисел Рейнольдса и Фруда учитывать, что в месте расположения гряды площадь поперечного сечения и гидравлический радиус будут отличны от аналогичных, расположенных вне гряды.

Измерение необходимо приурочить к условиям, близким к режимам перехода из ламинарного в турбулентный (переходный) или, наоборот, из турбулентного в ламинарный (переходный).

3. Определить линейную частоту отделения наиболее крупных вихрей при одной из скоростей потока. Для этого подсчитывается количество вихрей, проходящих через сечение трубы в створе, расположенном в 15 см ниже ввода краски. Осредненное значение частоты образования вихрей ω необходимо использовать для расчетов числа Струхала $St = \omega h / v$, характеризующего интенсивность перемешивания масс жидкости потока.

Отчетные документы

Каждая бригада представляет отчет, состоящий из краткой записки и схематических зарисовок, выполненных в карандаше на листах стандартного формата. В записке приводится описание установки, методики эксперимента, числа Рейнольдса и Фруда при рабочих режимах и полученные результаты (образец титульного листа приведен в приложении 14).

№ 2.8. Режим потока при обтекании выступов на стенке

Механизм возникновения продольных и поперечных сил на отдельных выступах русел одинаков при обтекании выступов как на дне, так и на боковых стенках. Так как измерения значительно упрощаются, а картина возникновения этих сил становится более наглядной при размещении выступов на стенке, то в учебной экспериментальной работе изучается возникновение сил при обтекании выступа, размещенного у боковой стенки лотка. Сам выступ представляет собой призму квадратного сечения.

При установке этой призмы в середине потока обтекание ее будет симметричным. При этом уровни на лобовой грани будут выше, чем на тыловой, т. е. силы давления на лобовую грань будут больше, чем на тыловую. Разность этих сил и будет лобовой продольной силой, возникающей на выступе. На обеих боковых гранях уровни понижаются от лобовой грани до тыловой, и так как поверхности этих уровней на боковых гранях симметричны, то и давления на них равны друг другу, ввиду чего поперечной силы не возникает.

Картина обтекания существенно меняется при размещении выступа у боковой стенки лотка со щелью размером 3—4 мм. На лобовой грани уровень становится несколько выше, чем был в этом месте до установки выступа. Далее поток огибает выступ и на грани, обращенной в сторону потока, уровни значительно

понижаются, особенно у переднего ребра, и постепенно переходят к уровням на нижней грани.

В узкой же щели между выступом и стенкой лотка уровни падают почти по наклонной прямой от повышенного уровня на передней грани до уровня на нижней грани.

Таким образом, площадь давления на боковую грань, обращенную к потоку, описываемая уровнем поверхности воды, основанием и боковыми ребрами грани, будет меньше площади дав-

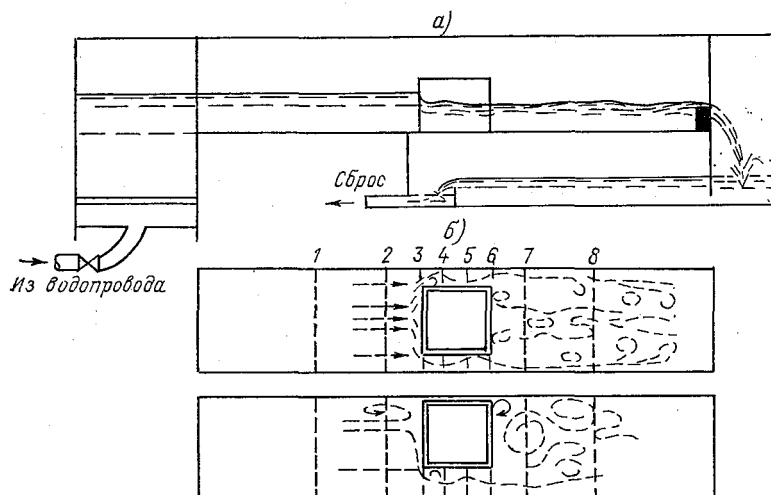


Рис. 2.12. Установка для изучения процесса обтекания препятствия.
а — схема лотка с препятствием, б — спектры течений при симметричном и асимметричном обтекании препятствия.

ления на боковую грань, обращенную к щели. Разница этих площадей давлений и будет определять поперечную силу, стремящуюся отодвинуть призму от стенки.

Течения при обтекании выступа имеют следующие особенности. Массы потока, набегая на выступ, огибают его и смыкаются на значительном расстоянии за выступом. Непосредственно же за выступом возникает водоворотная зона.

Задача работы: выявить механизм возникновения продольных и поперечных сил на выступах русел.

Так как природа указанных выше сил непосредственно связана с характером обтекания выступа, то в опытах необходимо зафиксировать как поверхность уровня (и особенно детально на гранях выступа), так и линии токов жидкости в транзитных и водоворотных областях потока.

Исходные данные: работа производится в малом лотке прямоугольного сечения. Сверху на бортах лотка нанесены восемь промерных створов, нумерация которых идет вниз по течению (рис. 2.12). В конце лотка для регулировки уровней в нижнем бьефе установлен шандорный затвор.

Л и т е р а т у р а:

Б а р ы ш н и к о в Н. Б., П о п о в И. В. Динамика русловых потоков и русловые процессы, п. 2.5.

Г о н ч а р о в В. Н. Динамика русловых потоков, гл. 8, с. 210—222.

Описание установки и методика выполнения эксперимента

1. Установить заданный расход воды на модели. Для этого по градуировочной кривой (или таблице) водослива $Q = f(H)$ определить расчетный напор на водосливе H_v , а затем и отсчет мерной иглы, соответствующий заданному расходу. После этого постепенно, с выдержками, открывают задвижку, имея в виду, что расходы на водосливе не могут мгновенно возрасти до заданных значений. Открывая задвижку, следует непрерывно наблюдать за уровнем в водомерном стекле и по достижении им острия мерной иглы прекратить открытие задвижки и еще раз уточнить отсчет по игле.

2. Выявить картину обтекания выступа и зафиксировать рельеф свободной поверхности потока. Для этого необходима фиксация линий тока и определение отметок свободной поверхности по всей длине и ширине потока. Особенно тщательными должны быть наблюдения в районе выступа.

Следует обратить внимание на наличие вихрей, возникающих при обтекании выступа, характер их и район существования.

Фиксация линий тока на поверхности потока производится с помощью опилок, а донных линий тока — с помощью нити, устанавливаемой по направлению линии тока, и окрашенных струй, смываемых с кристаллов марганцовокислого калия. Эти данные, как и зафиксированные водоворотные зоны, заносятся на бланки (приложение 15).

Фиксация рельефа водной поверхности производится мерной иглой, установленной на тележке, позволяющей перемещать иглу по трем координатным осям (x , y и z), и лабораторным нивелиром. Ось x совпадает с направлением течения, ось z — с шириной русла, ось y — с глубиной потока.

Количество промерных точек для снятия рельефа водной поверхности определяется следующими указаниями. В каждом промерном створе должно быть сделано не менее четырех измерений отметок по ширине потока (два у бортов лотка и два в середине на равных расстояниях друг от друга и бортов лотка). В районе выступа следует дополнительно сделать измерения отметок в каждой точке, указанной на выступе.

3. Измерить отметки дна и глубины потока в створах 1, 2, 7, 8 по его оси, а в створах 3—5 и 6 по оси зазоров между боковыми гранями выступа и ближайшими стенками лотка и у стенок лотка. Все наблюдения должны быть записаны в бланки опыта (см. приложение 15).

4. Помимо указанных данных, на первой странице бланка (приложение 15) должны быть записаны основные характеристики опыта: отсчеты по водомерному стеклу, напор на водосливе H_v , расход Q , ширина потока B , ширины правой и левой щелей $B_{пр}$ и $B_{лев}$ и температура воды в начале и в конце опыта. Для сравнимости результатов в потоке позади выступа (створ 8) рекомендуется поддерживать глубины, равные $2/3$ от глубин в створе 1.

Обработка экспериментальных данных и их анализ

1. Вычислить продольные (F_x) и поперечные (F_y) силы. Для определения сил необходимо построить развертку боковой поверхности

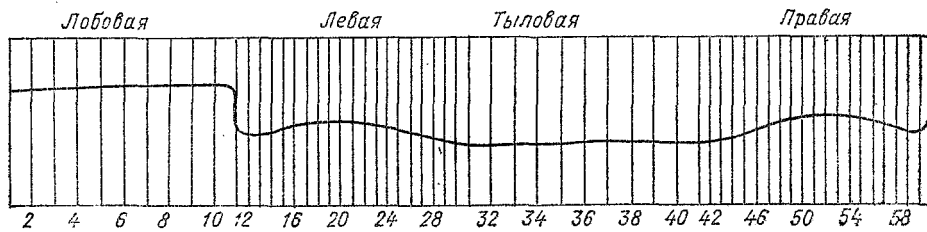


Рис. 2.13. Развертка боковой поверхности препятствия с нанесенной линией уровня воды.

Цифрами обозначены точки измерения уровня воды.

ности препятствия (рис. 2.13) с нанесенной на ней линией уровня по всему периметру выступа (на рис. 2.13 показано примерное положение линии уровня на всех гранях выступа).

Силы на любую из граней призмы могут быть рассчитаны по выражению

$$F = \frac{\rho g}{2} \int_0^b h_i^2 db \approx \frac{\rho g}{2} \sum_0^b h_i \Delta b,$$

где h_i — глубина у препятствия; b — ширина грани препятствия.

Приняв Δb достаточно малой и постоянной величиной и введя обозначение $b/\Delta b = n$ (Δb выбирается таким образом, чтобы n было целой величиной; при обработке рекомендуется принимать Δb равной 1 или 2 см), получим

$$F = \frac{\rho g b}{2} \frac{\sum_0^b h_i^2}{n}.$$

Поперечная сила сдвига в этом случае равна

$$F_y = F_{лев} - F_{пр} = \frac{\rho g b}{2n} \left(\sum_0^b h_{лев i}^2 - \sum_0^b h_{пр i}^2 \right), \quad (2.40)$$

продольная сила сдвига

$$F_x = F_{\text{лб}} - F_{\text{тл}} = \frac{\rho g b}{2n} \left(\sum_0^b h_{\text{лб}i}^2 - \sum_0^b h_{\text{тл}i}^2 \right).$$

На лобовой (лб) и тыловой (тл) гранях, как это видно из рис. 2.13, h_i слабо изменяется по ширине грани, незначительно отклоняясь от среднего значения, причем эти отклонения, как правило, находятся в пределах точности измерений. Поэтому вполне допустимо принять h_i неизменными по ширине лобовой и тыловой граней и соответственно равными среднему значению глубин на этих гранях, т. е.

$$\sum_0^b h_i^2/n \approx \bar{h}_{\text{ср}}^2,$$

отсюда

$$F_x = \frac{\rho g b}{2} (\bar{h}_{\text{ср. лб}}^2 - \bar{h}_{\text{ср. тл}}^2).$$

Для определения значений $\bar{h}_{\text{ср. лб}}$ и $\bar{h}_{\text{ср. тл}}$ необходимо подсчитать площади лобовой и тыловой граней препятствия. Разделив эти площади на ширину граней, получим значения средних глубин.

Вычисление поперечных сил рекомендуется производить следующим образом. Развертки боковых граней с нанесенными уровнями подразделяются на n равных по ширине частей (см. рис. 2.13). На каждой из этих граней получается n фигур, по форме близких к трапеции. Все эти трапеции имеют одинаковую высоту Δb , а число их равно $n = b/\Delta b$. После этого по середине каждой трапеции снимается значение h_i . Дальнейший расчет поперечных сил производится по формуле (2.40).

2. Представить план донных и поверхностных течений. По имеющимся зарисовкам спектров течений на бланках опыта следует начертить в туши на двух форматках миллиметровки планы донных и поверхностных течений для симметричного и несимметричного обтеканий. На первом чертеже показать поверхностные течения, а на втором — линии токов у дна с указанием водоворотных зон и направления течений в них.

3. Рельеф водной поверхности должен быть представлен на отдельном листе миллиметровки. В верхней половине чертежа помещают план симметричного обтекания препятствия, а в нижней — асимметричного. Горизонтали рельефа свободной поверхности проводятся через 1—2 мм.

4. В пояснительной записке необходимо сопоставить результаты наблюдений и расчетов при симметричном и несимметричном обтеканиях, показать, в чем заключается отличие обтеканий, и объяснить причины возникновения сил.

Отчетные документы

Отчет по этой работе должен быть представлен в виде записки с кратким описанием задачи работы, методики проведения опыта, обработки опытных данных и результатов их анализа.

Приложение к записке должно состоять из следующих материалов:

- а) плана рельефа водной поверхности;
- б) продольного профиля установки с показанием уровней водной поверхности на стенках лотка;
- в) развертки выступа с отметками водной поверхности;
- г) планов течений (на поверхности и у дна);
- д) бланков опытов.

№ 2.9. Поведение потока на одиночном изгибе жесткого русла

Криволинейные участки в естественных руслах встречаются более часто, чем прямолинейные. Поведение потоков на изгибе существенно отличается от поведения на прямолинейных участках из-за возникновения дополнительных центробежных и центростремительных сил. В то же время поток преодолевает изгиб с наименьшими затратами энергии. Форма его движения близка к продольно-винтовому. Далее, на изгибе происходит возникновение поперечных скоростей смещения и циркуляции, которые присущи всем видам изгиба потока и возникают как следствие воздействия центробежных и центростремительных сил.

Вопросу изучения закономерностей движения жидкости на изгибе посвящено значительное количество работ, как отечественных, так и зарубежных. Особенно большой вклад в изучение этой проблемы внесли Н. Е. Жуковский, А. Я. Милович, В. Н. Гончаров, М. П. Потапов, В. М. Маккавеев, И. Л. Розовский и др.

В связи с тем, что форма и характер изгибов естественных русел чрезвычайно многообразны и сложны, выяснить закономерности движения потока на них трудно. Поэтому для установления основных закономерностей в большинстве исследований рассматривается схематизированный, в виде одиночного, изгиб русла прямоугольного сечения.

В настоящее время установлены закономерности только для одиночного изгиба. Вопросы же установления закономерностей поведения потоков на изгибах более сложных очертаний находятся еще в стадии постановки.

Необходимо обратить внимание на то, что в лабораторных условиях потоки, как правило, являются пространственными с соотношением ширины к глубине, меньшим 10. В то же время для естественных водотоков, особенно на больших реках, эти соотношения могут достигать 100 и более. Поэтому характер течения на реках существенно отличается от наблюдаемых в лабораториях. Это особенно четко проявляется при исследовании поперечных те-

чений. Действительно, на больших реках трудно ожидать один устойчивый винт циркуляции, который распадается на несколько меньших винтов, что приводит к образованию островов или осередков.

Задачи работы: изучение кинематической структуры и поведения потока на одиночном изгибе.

Литература:

Барышников Н. Б., Попов И. В. Динамика русловых потоков и русловые процессы, п. 1.13.

Гришанин К. В. Динамика русловых потоков, п. 4.12.

Описание установки и методика выполнения эксперимента

Работа проводится на установке (рис. 2.14), на которой смонтировано русло прямоугольного поперечного сечения, состоящее

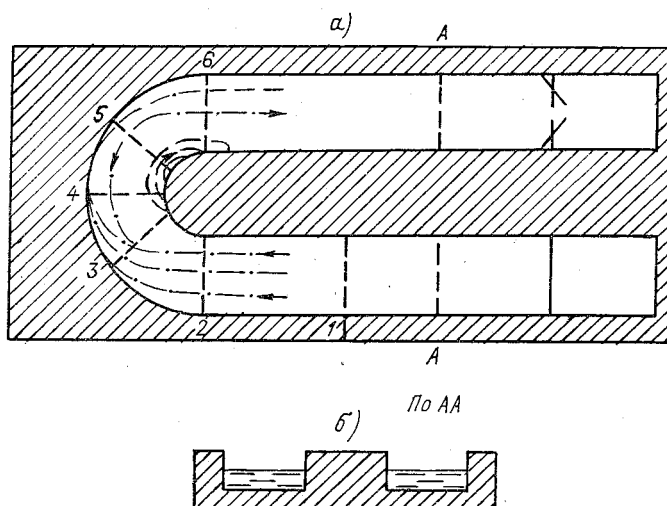


Рис. 2.14. Установка для изучения поведения потока на одиночном изгибе.

а — план установки, б — сечение по АА.

из прямолинейных участков, соединенных между собой изгибом с углом поворота 2π .

Сверху на бортах искусственного русла нанесены пронумерованные створы, на которых во время опыта производятся измерения гидравлических элементов. Створы по длине русла нанесены неравномерно, наибольшая частота их — на изгибе.

В начале русла имеется щиток для его перекрытия, а в конце — жалюзи для регулировки уровня воды. Расход воды, подаваемый на установку из трубопровода, регулируется с помощью задвижки.

В конце установки смонтирован треугольный водослив и водомерное стекло с игольчатой рейкой для регистрации уровня на водосливе. Поверх установки передвигается тележка, на которой монтируются приборы для измерения отметок свободной поверхности, значений и направлений скорости течения (рис. 2.14 б).

Эксперимент проводится следующим образом.

Подача на модель заданного расхода воды осуществляется в соответствии с указаниями, приведенными в лабораторной работе № 2.7.

После установления заданного расхода приступают к организации квазиравномерного режима движения воды. Для этого регулируют открытие жалюзей, расположенных в конце установки с таким расчетом, чтобы глубины на верхнем прямолинейном участке были равны глубинам на нижнем участке.

В опыте должны быть выполнены следующие виды работ:

1. Определить направление поверхностных и донных струй. Для поверхностных струй это осуществляется фиксацией направления движения опилок, а для донных — фиксацией окрашенных струй, смываемых с кристаллов марганцовокислого калия (KMnO_4). Спектры поверхностных и донных струй, а также размеры водоворотных зон, установленные указанным способом, фиксируются в специальных бланках (см. приложение 15). Желательно фотографирование спектров течений.

2. Выяснить одну из основных особенностей движения жидкости на повороте — движение с минимальной затратой энергии, что осуществляется при помощи круглого поплавка с нанесенной на нем стрелкой. Поплавок пускается по середине потока несколько выше входного створа изгиба. Траектория движения поплавка и ориентация стрелки во время движения на изгибе фиксируется на бланке (см. приложение 15).

Примечание. Необходимо потренироваться и отпускать поплавок таким образом, чтобы не придать ему первоначального вращательного движения.

3. Произвести нивелировку рельефа свободной поверхности и измерения глубин во всех створах поворота, выполняемые тастером, перемещаемым на специальной тележке, и лабораторным нивелиром.

Отметки свободной поверхности нивелируются в трех точках каждого створа (у бортов и посередине лотка), а глубины — в одной (посередине сечения). Результаты измерения заносятся в специальный бланк (см. приложение 15).

Примечание. Особенно тщательно следует производить измерения уровней в створах изгиба для последующего вычисления поперечного уклона и сравнения его с расчетным.

4. Измерить значения и направления скорости течения в пяти створах, осуществляемые трубкой Пито (Пито—Дарси или Реббока) или микровертушкой пятиточечным способом (поверхность

0,2h; 0,6h; 0,8h и дно). Направление течения в тех же точках фиксируется специальным флюгером (описание флюгера приведено ниже).

В створах 1, 2, 4—6 измерения производятся на трех вертикалях, расположенных на расстоянии 0,25; 0,5 и 0,75 ширины русла, и у бортов установки, а в створе 3, который считается основным створом изгиба, измерения производятся на пяти вертикалях, т. е. вводятся две дополнительные скоростные вертикали, отстоящие от берегов на 1,5 см.

При измерении скоростей течений трубкой (Пито, Пито—Дарси и др.) необходимо следить за тем, чтобы в подводящих шлангах и в самой трубке был полностью откачен воздух, в противном случае трубка дает искаженные показания.

Флюгер, применяемый для измерения направления течений, состоит из транспортира, закрепляемого на трубке Пито, и нити, расположенной около приемного отверстия трубки. Линия транспортира 0—180° устанавливается параллельно гидроствору. Затем стрелка-указатель совмещается с направлением нити, после чего производится отсчет угла между нормалью и положением стрелки-указателя (нити). Отсчеты угла вправо записываются в бланк опыта (см. приложение 14) с плюсом, а влево — с минусом. Необходимо обратить внимание на запись знака отклонения нити, так как он определяет направление циркуляции.

5. Измерить температуру воды в начале и конце опыта.

Обработка экспериментальных данных и их анализ

1. Спектр течений потока фиксируется на бланках-схемах плана установки непосредственно во время производства опытов. Дальнейшая обработка заключается в закреплении тушью поверхностных и донных струй течений. На этом же плане наносятся границы водоворотных зон, а также последовательный ряд положений поплавка со стрелкой в различных створах от начала до геометрического конца поворота.

2. План рельефа свободной поверхности — на бланк-схему плана экспериментальной установки наносятся данные нивелировки свободной поверхности по створам и по ним через 1 мм проводятся горизонтالي. Непосредственно на повороте русла пунктиром через 0,5 мм проводятся дополнительные горизонтали. Закрепление горизонталей тушью и дальнейшее оформление чертежа производится после проверки преподавателем.

3. Обработка и анализ данных измерений поля продольных скоростей:

а) по разности динамического и статического напоров и тарировочной таблице трубки или микровертушки определить значения местных скоростей;

б) по стандартным гидрометрическим формулам вычислить средние по вертикали скорости течений;

в) по данным измерений вычислить расходы воды во всех створах. Произвести анализ полученных данных. Подсчитать средний из измеренных расходов воды $\bar{Q} = \sum Q_i/N$ и определить поправочный коэффициент к измеренным скоростям $k = \bar{Q}/Q_i$, учитывающий погрешность за счет неточности измерений, и ввести эту поправку в средние значения скоростей на вертикалях;

г) построить эпюры распределения местных скоростей по глубине и средних по ширине потока. Построение произвести на стандартных листах миллиметровки, располагая эпюры местных скоростей для различных створов одна под другой, обеспечивая тем самым возможность сравнения и анализа;

д) для основного створа изгиба ($\pi/4$) произвести расчет распределения скоростей по ширине потока по выражению

$$v_i = 1,08 (b_i/B)^{0,08} v_0 r_0 / r_i,$$

где v_i — средняя скорость потока на вертикали; v_0 — средняя скорость потока на осевой вертикали; B — полуширина русла; b_i — кратчайшее расстояние от стенок лотка до i -й вертикали; r_i и r_0 — расстояния от центра поворота до вертикали i -й и осевой (0);

е) произвести сравнение полученных результатов с данными опытов. Дать выводы.

4. Анализ поля поперечных скоростей:

а) определить значения поперечных скоростей в каждой точке по выражению

$$u_n = u_i \operatorname{tg} \varphi,$$

где u_n — значение поперечной скорости; u_i — значение местной скорости, нормальной к створу (измеренной трубкой Пито); φ — угол между направлением скорости в точке и нормалью к створу;

б) на стандартных листах миллиметровой бумаги построить эпюры распределения поперечных скоростей по глубине потока. Для облегчения анализа эпюры поперечных скоростей располагаются на профилях поперечных сечений (рис. 2.15);

в) указанным ниже приближенным приемом определить по профилям поперечных скоростей значения скорости циркуляции и осредненную по глубине скорость смещения на осевой и двух смежных вертикалях в створах измерений.

Ввиду того что при наличии только циркуляции (без поперечного смещения расходов) поперечный расход верхней части вертикали должен быть равен поперечному расходу в нижней ее части, найдем вертикальную линию, которая отсекает сверху и внизу одинаковые площади. Тогда расстояние от этой вертикальной линии до ординаты, соответствующей нулевому значению скорости, явится приближенным значением средней по высоте поперечной скорости смещения $v_{см}$ (см. рис. 2.15). Собственно же циркуляционные скорости на дне ($u_{гд}$) и на поверхности ($u_{гп}$) будут равны разности измеренных поперечных скоростей и полученных

значений осредненной скорости смещения ($v_{см}$), т. е. скорости циркуляции на дне и поверхности равны:

$$u_{r\Delta} = u_{п\Delta} - v_{см},$$

$$u_{r0} = u_{п0} - v_{см},$$

где $u_{п\Delta}$ и $u_{п0}$ — измеренные поперечные скорости соответственно на дне и поверхности;

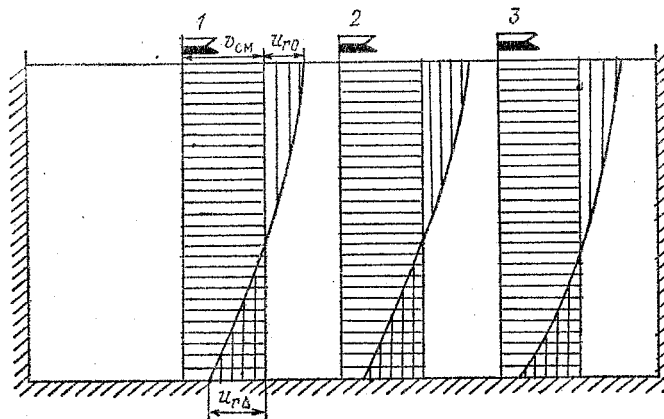


Рис. 2.15. Пример построения эпюр поперечных скоростей в створе изгиба.

г) рассчитать эпюру распределения циркуляционных скоростей по глубине потока на осевой вертикали основного створа по формуле

$$\frac{u_r}{v} = \frac{\alpha h}{r_0} \left(\frac{2y}{h} - 1 \right),$$

где u_r — циркуляционная скорость; α — постоянный коэффициент, принимаемый равным 3—5. При больших значениях коэффициента Шези ($C \geq 50$) принимается $\alpha = 5$, при малых значениях ($C \leq 30$) принимается $\alpha = 3$. Сравнить расчетные данные с данными измерений.

5. Определить числа Re и Fr для створа, расположенного на прямолинейном участке:

$$Re = vR/\nu; \quad Fr = v^2/(gR),$$

где R — гидравлический радиус сечения; ν — кинематическая вязкость.

6. По данным опыта вычислить для центрального створа изгиба поперечный уклон по выражению

$$I_{п} = \Delta H/(2B),$$

где ΔH — разность отметок уровней у внутреннего и внешнего берегов; B — полуширина русла.

Теоретическое же значение этого уклона определяется формулой $I_{\pi} = v^2/(gr_0)$, где v — средняя скорость течения.

7. Дать выводы о степени соответствия расчетных и экспериментальных данных и объяснить причины расхождений.

Отчетные документы

Приложение к отчету должно состоять из следующих материалов:

- а) ~~плана рельефа свободной поверхности,~~
- б) ~~спектров поверхностных и донных течений,~~
- в) ~~эпюр распределения поперечных скоростей по глубине потока,~~
- г) эпюр распределения продольных скоростей по глубине и ширине потока,
- д) бланков опытов.

Отчет по лабораторной работе должен быть представлен в шитом виде в срок, определенный графиком работ. Каждый чертеж выполняется на стандартном листе, подписывается стандартным шрифтом и на нем выписываются сведения о расчетном расходе воды, числах Рейнольдса и Фруда. Образец титульного листа приведен в приложении 14.

№ 2.10. Деление и слияние потоков

Деление на рукава является характерной особенностью естественных русел. Разветвленные участки на реках по частоте проявления занимают второе место после меандрирования. На таких участках наблюдаются два противоположных явления: деление потоков в узле и их слияние в один в конце морфологического образования, разделяющего потоки. Большое разнообразие разветвлений обуславливает различные формы взаимодействий расходящихся и сходящихся в них потоков. Потоки различной мощности могут соединяться под разными углами, имея различные глубины, ширины, уклоны дна и свободной поверхности, протекать в разных грунтовых условиях. По этим причинам на различных участках даже одной и той же реки по ее длине наблюдаются противоположные явления: размыв приверхов островов и прирост их ухвостий в одних условиях и намыв приверхов с размывом нижней оконечности островов в других [21].

Ближние явления наблюдаются и при антропогенном воздействии на реки. В частности, при строительстве и эксплуатации водозаборов, мостовых переходов (обтекание опор мостов) и других гидротехнических сооружений.

Закономерности развития русел в узлах деления и особенно слияния потоков недостаточно разработаны и в литературе слабо

освещены. Это объясняется сложностью явлений и большим разнообразием условий, при которых происходит деление и слияние потоков. При практическом использовании рек проектировщики не рекомендуют, а строители избегают использовать узлы деления и слияния потоков для размещения инженерных сооружений именно из-за сложного характера, большой изменчивости переформирования русел и недостаточной изученности всех процессов.

Для решения данной проблемы необходимо использование всех трех методов исследований: теоретического анализа, натурных измерений и лабораторного моделирования. Однако теоретический анализ турбулентного потока, да еще с деформируемым руслом пока не дает положительных результатов.

Натурные исследования деления и слияния потоков и русловых деформаций представляют весьма сложную и дорогостоящую задачу. Для ее решения необходимо располагать материалами детальных, ежегодно повторяемых русловых съемок, сопровождаемых измерениями гидравлических характеристик потоков. Эти задачи не могут быть решены на основе эпизодических, кратковременных натурных исследований. В то же время проектировщики при разработке проектов часто сталкиваются с такими проблемами и вынуждены принимать не всегда обоснованные решения. Поэтому в дополнение к имеющимся натурным экспедиционным материалам необходима организация и проведение экспериментальных исследований, которые позволяют задавать и быстро изменять гидрологические режимы и условия протекания потоков. Наибольший интерес при исследовании потоков на разветвленных участках представляет их кинематика, транспорт наносов потоками, аккумуляция последних и русловые переформирования в узлах деления и слияния потоков.

Задача работы: изучение поведения потока, русловых деформаций, транспорта наносов и других процессов на модели участка разветвленного русла. Особое внимание необходимо при этом обратить на особенности кинематики потоков при их делении и слиянии.

Литература:

Барышников Н. Б., Попов И. В. Динамика русловых потоков и русловые процессы, п. 1.14.

Гришанин К. В. Динамика русловых потоков, п. 1.13.

Описание установки и методика выполнения эксперимента

Экспериментальная работа состоит из четырех частей. Первая посвящена изучению кинематики потоков, эффекта их взаимодействия, рельефа свободной поверхности и распределения расходов воды по рукавам разветвленного островами жесткого русла, в котором потоки разделяются и сливаются. Вторая — изучению тех же вопросов, но при делении потоков стеклянной стенкой,

устанавливаемой в зоне их взаимодействия между соседними островами. Дно жесткое. Третья часть работы выполняется в лотке, в котором создано деформируемое песчаное дно. Основной ее задачей является изучение русловых деформаций, происходящих в различных узлах разветвлений, формы перемещения наносов и перераспределения их расходов по рукавам. Четвертая часть практически повторяет все виды работ, приведенные в третьей части, но при установке между островами по стрежневой линии тонкой стеклянной разделительной стенки (для устранения эффекта от взаимодействия потоков) для определения расходов воды и наносов в рукавах.

Работа выполняется в лотке (рис. 2.16), размеры которого определяются возможностями помещения и размерами изучаемых объектов. В нем монтируется разветвленное русло. Неоднократное деление потока на два рукава и последующее их слияние в один осуществляется с помощью модулей, перемещаемых в плане островов, имеющих различную конфигурацию (эллипсоидовидную, остроугольную и другую). Форма островов, их расположение относительно друг друга и берегов зависят от поставленных задач. Например, требуется исследовать взаимодействие потоков, имеющих разную мощность. Для этого достаточно передвинуть остров (острова) к одному из берегов. Перемещением островов можно устанавливать любое желаемое соотношение между расходами воды в смежных рукавах. Установкой стеклянной стенки между оконечностью верхнего острова и вершиной нижележащего взаимодействующие потоки разделяются на самостоятельные рукава.

Пустотелые острова (см. рис. 2.16) и коренные берега русла можно изготавливать из органического прозрачного стекла, обеспечивая наглядность происходящих процессов (перепады и изменения уровней воды по периметру островов и берегов и др.). Фиксация положения уровня воды и отметок дна производится на кальке, что в значительной мере сокращает и уточняет работы по нивелированию поверхности воды и дна. Пустотелые острова удерживаются на дне за счет их пригрузки изнутри металлическими пластинами.

Желательно, чтобы поток имел переменный уклон дна, чем обеспечивается изменение уклонов водной поверхности и режимов перемещения наносов. В конце установки, в месте сброса воды из рукавов, необходимо установить ловушки для наносов, позволяющие определять их расходы в каждом из рукавов, и два мерных водослива для измерения расходов воды, поступающих из рукавов.

Экспериментальная работа выполняется бригадой из пяти-шести студентов, два из которых измеряют скорости течения, расходы воды по водосливам (в начале, конце и во время эксперимента), глубины, нивелировку водной поверхности и рельефа дна и другие виды работ. Один студент фиксирует на плане установки направление поверхностных и донных струй, параметры основ-

ного русла, островов и рукавов. Остальные члены бригады наряду с общими наблюдениями за развитием процесса изучают и фиксируют формы перемещения наносов, измеряют параметры гряд, зарисовывают места размывов и намывов дна, определяют расходы донных наносов различными способами (по параметрам гряд и весовым способом), производят отбор проб для механического анализа песка и выполняют их анализ ситовым методом,

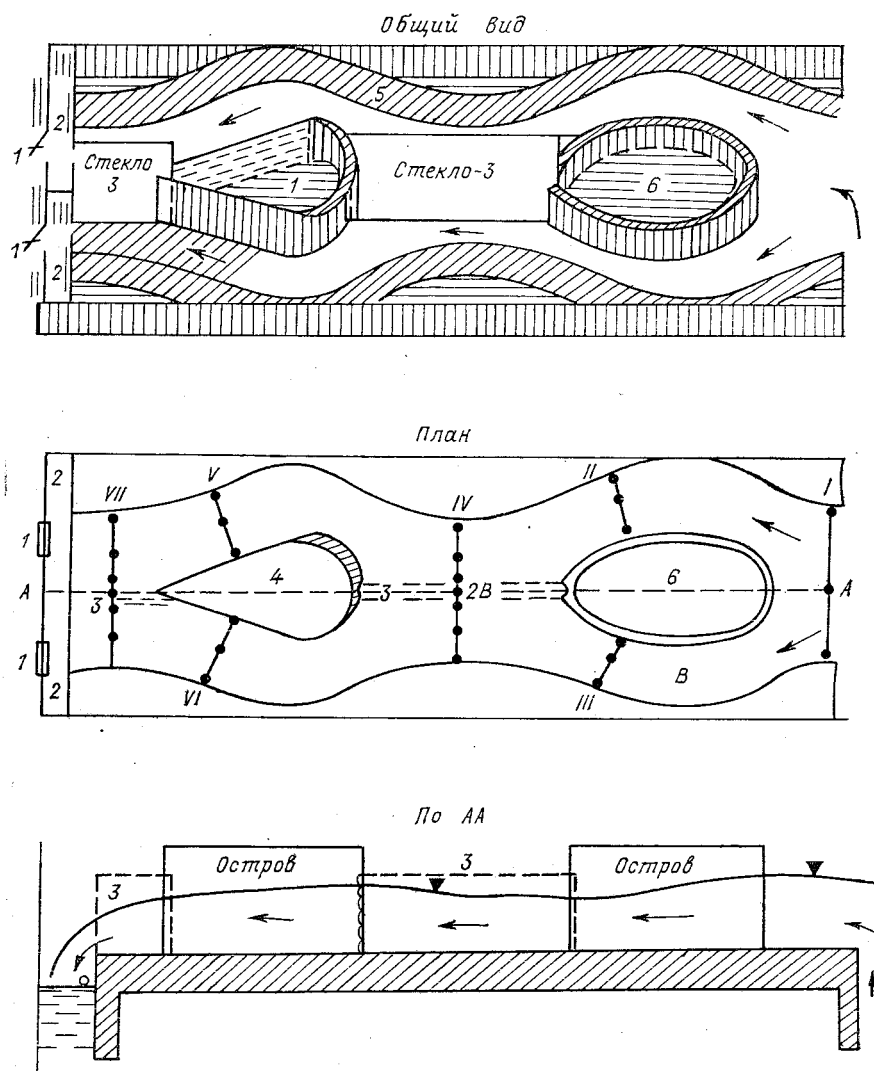


Рис. 2.16. Схема экспериментальной установки.

1 — водосливы, 2 — песколовки, 3 — разделительные стенки, 4, 6 — острова, 5 — берег русла.
I—VII — створы для измерения скоростей течения.

фиксируют местоположение и определяют параметры водоворотных зон.

Выполнение эксперимента делится на четыре части.

Первая часть. 1. Совместно с преподавателем устанавливаются острова симметрично или асимметрично относительно берегов в зависимости от поставленных задач. Для разных бригад желательно задавать различные условия.

2. Определяется уклон дна основного русла и рукавов с помощью лабораторного нивелира.

3. Устанавливается заданный расход воды (совместно с преподавателем).

4. Выполняются промеры при помощи мерной иглы и нивелирование водной поверхности в створах, указанных на рис. 2.16. Наносят на кальки, наклеенные на прозрачные стекла, положение уровня воды и дна по периметру берегов и островов.

5. Измеряют значения и направления скорости потоков в семи створах (см. рис. 2.16) с помощью трубок (Пито и др.) или микровертушек трехточечным способом (пов.; $0,6h$; дно). Направление течения в тех же точках определяется флюгером (описание флюгера приводится ниже). В створах I, II, III, V, VI измерения производятся на трех вертикалях, из которых две расположены на расстоянии 1—2 см от соответствующих берегов и одна посередине потока.

В створах IV и VII, где происходит взаимодействие потоков, измерения производятся пятиточечным способом (пов.; $0,2h$; $0,6h$; $0,8h$; дно) на пяти вертикалях, две из которых располагают на расстоянии 1—2 см от берегов, одну, центральную, — посередине русла и по одной вертикали между береговыми и центральной вертикалями.

Флюгер, применяемый для измерения направления течений, состоит из транспортира, закрепленного на трубке Пито, и нити, расположенной около приемного отверстия трубки. Линия транспортира $0-180^\circ$ устанавливается параллельно гидроствору. Затем стрелка-указатель совмещается с направлением нити и производится отсчет угла между нормалью и положением стрелки-указателя (нити). Отсчеты угла вправо записываются с плюсом, влево — с минусом.

6. Определяется направление струй по всей длине и ширине разветвленного русла с помощью фиксации движения опилок (поверхностных) и струй, окрашенных марганцовокислым калием (донных). При помощи опилок и красителей также определяются местоположение и размеры водоворотных зон. Направление траекторий желательно фотографировать.

7. Измеряется температура воды в начале и конце опыта.

Вторая часть. Выполняется при том же расходе воды (положение задвижек не изменяется).

1. Устанавливаются две вертикальные тонкие прозрачные стеклянные разделительные стенки (см. рис. 2.16): одна — между нижней оконечностью верхнего острова и вершиной нижнего, вто-

рая — от нижней оконечности второго острова до конца русловой площадки таким образом, чтобы не создавать подпор в любом из рукавов. Это определяется по равенству отметок уровней воды по обеим сторонам стекла.

2. Выполняются все работы, перечисленные в первой части эксперимента. Помимо этого, в створах IV и VII вместо центральной назначаются вертикали, располагающиеся на расстоянии 1 см по обе стороны стеклянной стенки.

Третья часть. Выполняется в условиях деформируемого дна.

1. По всей длине разветвленного русла насыпается мелкозернистый песок толщиной, примерно равной планируемой глубине над песчаным дном (около 10 см). Выравненное шаблоном дно нивелируется.

2. Расход воды устанавливается такой же, как и в первых частях эксперимента.

После того как установится заданный расход воды, производятся следующие работы.

3. Выполняются все наблюдения и измерения, предусмотренные в первой части эксперимента, за исключением измерения скоростей течения вертушкой. Поверхностные скорости течения определяются с помощью поверхностных поплавков.

4. Производятся наблюдения за деформациями дна. Одновременно с измерениями зарисовываются на планах или схемах места размывов и аккумуляции наносов, форма и направление перемещения наносов. Особое внимание обращается на деформации русла, происходящие в зоне слияния потоков. Тщательно зарисовываются траектории донных (расходящихся от линии взаимодействия) и поверхностных (сходящихся к этой линии) струй. Направления поверхностных течений фиксируются с помощью опилок.

5. Определяются участки грядового перемещения наносов и параметры гряд (скорость движения, высота, длина и форма). Скорость движения гряд определяется посредством регистрации времени прохождения гребнями гряд расстояния между двумя смежными створами; высота и длина гряд измеряются мерной иглой и линейкой.

6. Измерить расход донных наносов объемным способом.

Измерения выполняются после установки заданного расхода воды. В конце каждого рукава устанавливается песколовка и одновременно включается секундомер. При наполнении песколовок примерно на 0,7—0,8 их объема секундомер выключается, песколовки извлекаются из-под лотка и взвешиваются на технических весах. Необходимо предварительно взвесить пустые песколовки, а перед повторным взвешиванием тщательно вылить из них воду. Из этих наносов вторично отбирается проба для механического анализа песка ситовым способом. Первое определение выполнялось для пробы, отобранной из песка, которым формировалось русло.

7. Опыт прекращается после того как в русле отчетливо формируются зоны размыва и намыва (аккумуляции). После освобождения установки от воды производится подробное нивелирование и зарисовки сформировавшегося рельефа. Нивелирование дна выполняется во всех створах и во всех характерных точках. Если в русле сохранились гряды, то необходимо определить их параметры и зарисовать форму нескольких гряд.

Четвертая часть. В условиях деформируемого дна и с разделением потоков стеклянными стенками выполняются следующие работы:

1. Шаблонном восстанавливается песчаное дно, которое было сформировано в начале третьей серии (до размыва).

2. Разделительные стеклянные стенки погружаются в песок до жесткого дна.

3. Устанавливается расход воды, при котором выполнялись первые три серии опытов. Затем выполняется полный цикл наблюдений и измерений (изложен в третьей части эксперимента). При этом обращается особое внимание на деформации русла, происходящие в зоне раздела потоков стеклянной стенкой. Траектории поверхностных и донных струй наносятся на бланк-схему установки. Измеряются расходы воды (по водосливам) и наносов в обоих рукавах. При появлении четких размывов и намывов (аккумуляции) опыт можно прекратить. Затем производится нивелирование дна во всех створах и характерных точках.

4. Выполняются зарисовки и фотографирование сформировавшегося рельефа дна.

Обработка экспериментальных данных и их анализ

1. Подсчитать расходы воды, измеренные методом скорость—площадь во всех семи створах, в том числе и суммарные в рукавах (створы II + III и V + VI). Оценить перераспределение расходов воды в рукавах при обтекании первого и второго островов. С этой целью необходимо привести измеренные расходы воды в рукавах к расходу воды по водосливу исходя из равенств

$$k_1 Q_{II} + k_1 Q_{III} = Q_B \text{ и } k_2 Q_V + k_2 Q_{VI} = Q_B,$$

где Q_B , Q_{II} , Q_{III} , Q_V и Q_{VI} — расходы воды, измеренные по водосливу (в) и в соответствующих створах. Расчеты производятся по данным экспериментов, выполненных как при отсутствии разделительной стенки, так и при ее установке. Затем вычислить ΔQ расходов воды, перетекающей из левого рукава в правый, или наоборот:

$$\Delta Q = k_1 Q_{II} - k_2 Q_V \text{ или}$$

$$\Delta Q = k_2 Q_{VI} - k_1 Q_{III}.$$

2. Подсчитать средние скорости течения в каждом створе.

3. Построить эпюры распределения скоростей по глубине потока. Для тех донных точек, где истинная скорость отклонялась от нормали к створу, определить ее значение по выражению

$$u_{\Delta H} = u_{\Delta} / \cos \varphi,$$

где φ — угол между направлением скорости в точке и нормалью к створу.

Сравнить полученные значения скорости с критериальными, предложенными В. Н. Гончаровым:

$$v' = 2,5v_n (k_5/h)^{1/12},$$

$$v'' = 2,5v_n (h/k_5)^{1/12},$$

где v' и v'' — критические скорости потока, при которых соответственно возникают и исчезают гряды; h — глубина потока; v_n — несдвигающая скорость, определяется по выражению

$$v_n = \lg \frac{8,8h}{k_5} \sqrt{\frac{2g(\rho_1 - \rho)k}{3,5\rho}},$$

где ρ_1 и ρ — плотность грунта и воды; k_5 — крупность наиболее крупных частиц песка, доля которых в составе отложений составляет 5 %; k — средний диаметр частиц.

Из сравнения истинных значений скоростей с критическими необходимо сделать вывод о фазе перемещения наносов (грядовая, безгрядовая).

4. Построить совмещенные эпюры поверхностных, средних и донных скоростей по ширине потока. Построение выполняется на стандартном листе миллиметровки (297×420 мм), где нанесена схема установки и створы измерений. Ось абсцисс располагается по направлению гидроствора, а ось ординат — по нормали к ней. На последней откладываются значения средних, донных и поверхностных скоростей течения разными условными обозначениями или разными цветами. Эти эпюры строятся для всех створов разветвленного участка. На схеме при помощи эпюр провести от створа к створу линии, соединяющие значения максимальных скоростей течения (соответственно поверхностных, средних, донных). Выполнить анализ распределения максимальной скорости по глубине, ширине и длине потока.

5. По данным нивелирования отметок водной поверхности и уровней воды, зафиксированных на кальке, построить продольные и поперечные профили водной поверхности по линии одного из берегов и по стержню потока. Вычислить значения продольного уклона водной поверхности для отдельных характерных участков русла и поперечные уклоны. Выполнить анализ распределения уклона водной поверхности по длине потока. Объяснить причины его изменения.

6. По данным наблюдений при наличии и отсутствии стеклянной разделительной стенки построить совмещенные планы траек-

торий поверхностных и донных струй. Выполнить их анализ. Особое внимание обратить на траектории струй в области взаимодействия потоков. Дать объяснение причин, обуславливающих расхождение донных струй. На этой же схеме нанести местоположение водоворотных зон.

7. По данным измерений в IV и VII створах для условий разделенных и взаимодействующих потоков построить совмещенные поля изотак. Проанализировать характер взаимодействия потоков в узлах их схождения. Объяснить причины, вызвавшие перестройку полей скорости.

Выполнить анализ полей изотак в створах I и IV. Объяснить причины возникновения обнаруженных различий в структуре полей изотак в этих створах.

8. Для потоков с деформируемым руслом по данным нивелирования и зарисовок построить:

- совмещенные поперечные профили дна и свободной поверхности (для всех створов), обратив особое внимание на деформации русла в зоне слияния потоков (створы IV и VI);

- планы рельефа дна в горизонталях отдельно для каждой серии опытов (при наличии и отсутствии разделительной стенки). Сравнить планы рельефа дна и сделать выводы о характере и размерах деформации дна и при взаимодействии и изоляции потоков стеклянной стенкой.

9. На плане модели показать местоположение водоворотных зон, места размывов дна, аккумуляции наносов и их грядового режима перемещения.

10. Привести сведения о параметрах гряд: высоте, длине, скорости их движения, коэффициенте формы. Зарисовать наиболее типичные формы гряд (в плане и в профиль). Коэффициент формы гряды k_1 определяется как отношение площади продольного сечения гряды к площади прямоугольника высотой, равной высоте гряды, и длиной, равной ее длине.

Параметры гряд определяются как среднее из данных измерений нескольких гряд; эти значения используются для последующего расчета расходов донных наносов по различным формулам.

11. Произвести определение расходов наносов, перемещаемых в форме гряд по формуле

$$Q_s = g (\rho_1 - \rho) \Delta_r c_r k_1 B,$$

где Δ_r — высота гряды, м; k_1 — коэффициент формы гряд; c_r — скорость движения гряд, м/с.

Сравнить полученные данные с расходами наносов, определенными при помощи песколовок. Расчеты выполнить для каждого рукава и русла в целом.

12. Оценить по данным нивелирования рельефа дна объемы размыва и намыва относительно первоначально ровного дна. Для этой цели использовать планы русел в горизонталях и поперечные профили. Сравнить эти объемы. По разности объемов раз-

мывов и аккумуляции оценить объем наносов, вынесенных с участка исследований.

13. Определить поперечные уклоны для всех створов. Сравнить их с общим и местными продольными уклонами.

14. Для всех серий опытов (частей работы) для каждого створа вычислить числа:

$$Re = vR/\nu, Fr = v^2/(gR),$$

где R — гидравлический радиус, м; v — средняя скорость потока, м/с; ν — кинематический коэффициент вязкости, принимаемый для температуры воды 15°C равным 0,00 000 114 м²/с, или 0,0114 см²/с.

Дать заключение о режимах течения и их изменениях по длине исследуемого участка.

15. Рассчитать для разных створов и разной шероховатости дна (жесткое русло, ровное песчаное, грядовое дно) коэффициент Шези C . Сравнить полученные значения и дать характеристику особенностей морфологии створов.

Сделать выводы о различиях кинематической структуры потока на участках их деления и схождения, характере и формах перемещения наносов, процессах переформирования русел в зонах деления и слияния потоков, рельефе водной поверхности и местоположении водоворотных зон. Дать рекомендации о местах расположения створов и способах измерения расходов донных наносов на участках разветвленных русел.

Отчетные документы

Приложения к отчету включают:

1. Планы установки с изображением поверхностных и донных струй по данным наблюдений и эпюр распределения поверхностных, средних и донных скоростей течений по ширине потока. На этих планах должно быть показано положение динамических осей потоков.

2. Кривые гранулометрического состава наносов.

3. Совмещенные поперечные профили свободной поверхности воды и дна в створах, расположенных в зонах взаимодействия потоков (створы IV и VI).

4. Поля изотоп в створах I, IV и VII (построенные по данным измерений в первой и второй сериях).

5. Продольные профили водной поверхности по длине рукавов и единого русла. Ниже графика отдельной строчкой выписываются уклоны водной поверхности для всех характерных участков.

6. Данные о параметрах гряд, русла и числах Re , Fr , St , расходах наносов, измеренных и вычисленных.

7. Бланки опытов с результатами экспериментов.

№ 2.11. Взаимодействие руслового и пойменного потоков

Весеннее половодье, а иногда и дождевые паводки на равнинных реках проходят при затопленной пойме. Организация паводочных работ при наличии поймы значительно сложнее, чем при ее отсутствии. В то же время именно эти расходы являются наиболее ценными и важными для гидрологических расчетов.

Данная экспериментальная работа посвящена изучению процессов взаимодействия руслового и пойменного потоков, т. е. именно тех явлений, которые и создают трудности как при измерении расходов, так и при подсчетах максимального и годового стока воды.

При выходе воды на пойму происходит резкое изменение сопротивления, причиной которого является воздействие пойменного потока на русловую из-за возникновения вихрей на границе раздела взаимодействующих потоков и поперечных течений (при первом типе взаимодействия потоков). Особенно велика роль поперечных течений, ибо они переносят массы жидкости из отсеков потока, движущихся с малыми скоростями, в отсеки с большими скоростями, и наоборот.

Возрастание сопротивлений приводит к существенному уменьшению пропускной способности руслового отсека, причем оно не компенсируется незначительным увеличением пропускной способности поймы.

В зависимости от морфометрии русла и поймы и их изменения по длине реки выделяют пять типов взаимодействия руслового и пойменного потоков.

1. Оси руслового и пойменного потоков параллельны. Увеличение сопротивлений происходит за счет вихрей, образующихся на границе раздела взаимодействующих потоков и их перемещения в сторону потока, имеющего большие скорости (руслового). Дополнительное сопротивление оценивается по формуле $\tau_b = A_b \partial v / \partial b$, где A_b — коэффициент турбулентного обмена между взаимодействующими потоками.

Как показал анализ экспериментальных данных, уменьшение пропускной способности русла (по сравнению с изолированным или определенным расчетом по формуле Шези) в этом случае невелико и, как правило, не превышает 5—10 %.

2. Динамические и геометрические оси руслового и пойменного потоков на участке, расположенном ниже расчетного створа, расходятся. Этот случай соответствует расширению поймы ниже створа измерений. Русловой поток растекается по пойме. При этом наблюдается увеличение пропускной способности русла и уклонов водной поверхности, обусловленное расширением поймы ниже расчетного створа.

3. Динамические оси руслового и пойменного потоков на участке ниже расчетного створа сходятся. Этот случай соответствует сужению поймы вниз по течению реки. Пойменный поток, поступая в русло, тормозит русловой поток, что приводит к зна-

чительному возрастанию сопротивления и как следствие к уменьшению пропускной способности русла. Это уменьшение находится в прямой зависимости от угла схождения динамических осей потоков и может достигать 100 %. В то же время увеличение пропускной способности поймы мало и им можно пренебречь.

4. Динамические оси потоков русла и поймы пересекаются. Этот случай встречается наиболее часто, в частности при меандрировании русла по пойме.

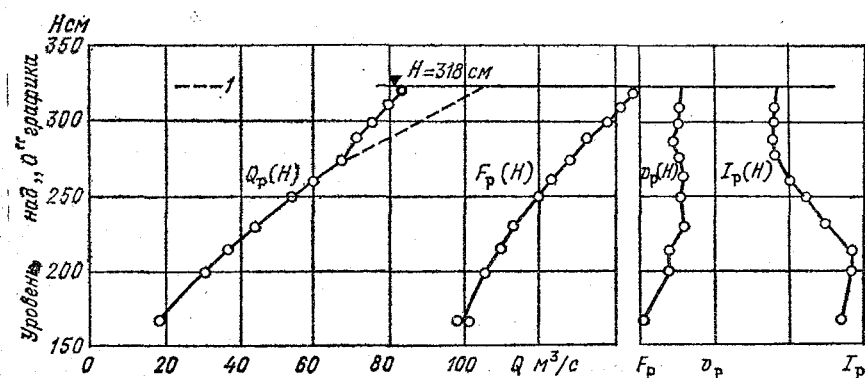


Рис. 2.17. Кривые зависимостей $Q_p=f(H)$; $F_p=f(H)$; $v_p=f(H)$, и $I_p=f(H)$ для русловой части потока р. Амур—с. Кумара, 1958 г.
1 — экстраполированная часть кривой $Q_p=f(H)$.

Первые три типа взаимодействия потоков можно считать частными случаями четвертого. При больших углах пересечения динамических осей взаимодействующих потоков, превышающих $\pi/2$, течение в русле либо отсутствует, либо сменяется на обратное. (Такое явление наблюдалось на р. Сож при $\alpha \approx 3/4\pi$.)

Таким образом, при прочих равных условиях в этом случае наблюдается прямая зависимость пропускной способности русла от угла пересечения динамических осей потоков.

В качестве примера на рис. 2.17 приведены кривые расходов воды, площадей поперечного сечения, средних скоростей и уклонов водной поверхности для русловой части потока. В этом гидростворе ширина поймы мала и составляет только 0,4 ширины русла. Последнее хорошо разработано, со средними глубинами, превышающими 10 м. Взаимодействие потоков происходит по третьему типу.

Как видно на рисунке, при уровне, соответствующем уровню выхода воды на пойму, даже на такой большой реке, как Амур, происходит перегиб кривых $Q_p=f(H)$ и $v_p=f(H)$ для русловой части потока, обусловленный тормозящим влиянием пойменного потока на русловую.

Таким образом, на кривых расходов воды русловых потоков при третьем типе их взаимодействия с пойменными наблюдается

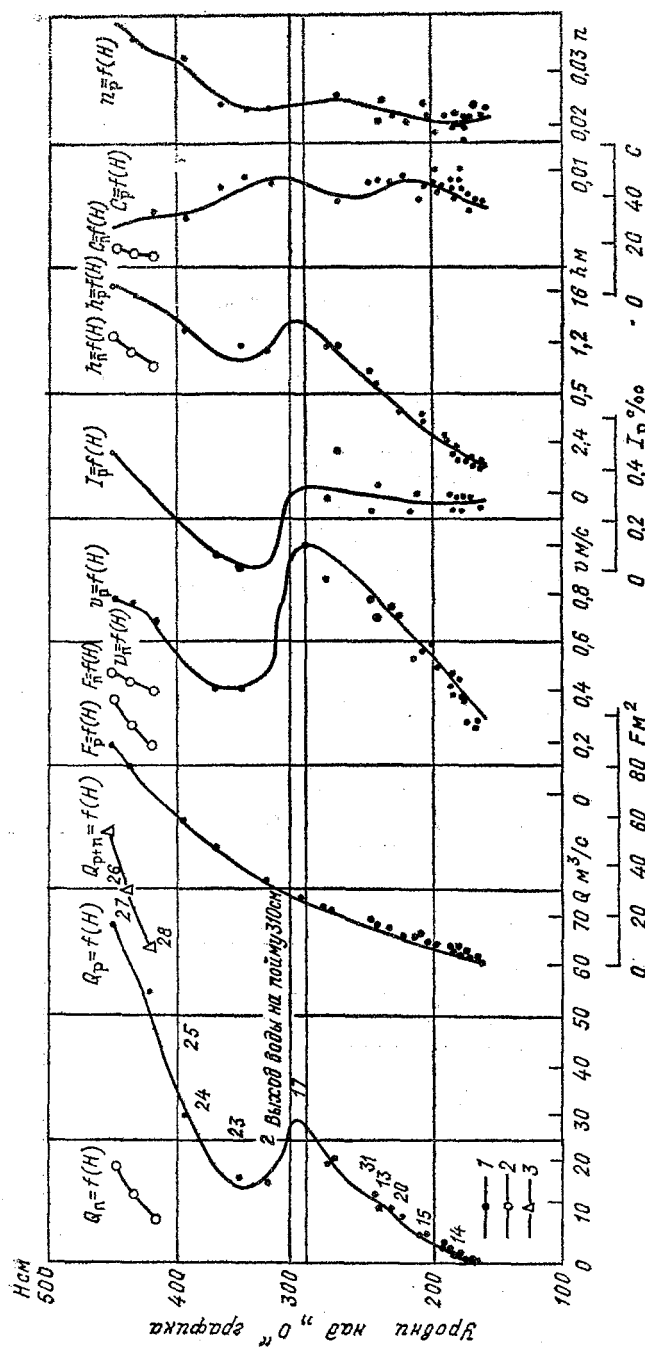


Рис. 2.18. Кривые зависимостей $Q=f(H)$; $F=f(H)$; $v=f(H)$; $I=f(H)$; $h=f(H)$; $C=f(H)$ и $n=f(H)$ для р. Татакан—
1 — русловая часть потока, 2 — пойменная часть потока, 3 — суммарная для русла с поймой.

резкий перелом при уровнях, соответствующих уровням выхода воды на пойму. Этот перелом отражает указанное выше увеличение сопротивлений.

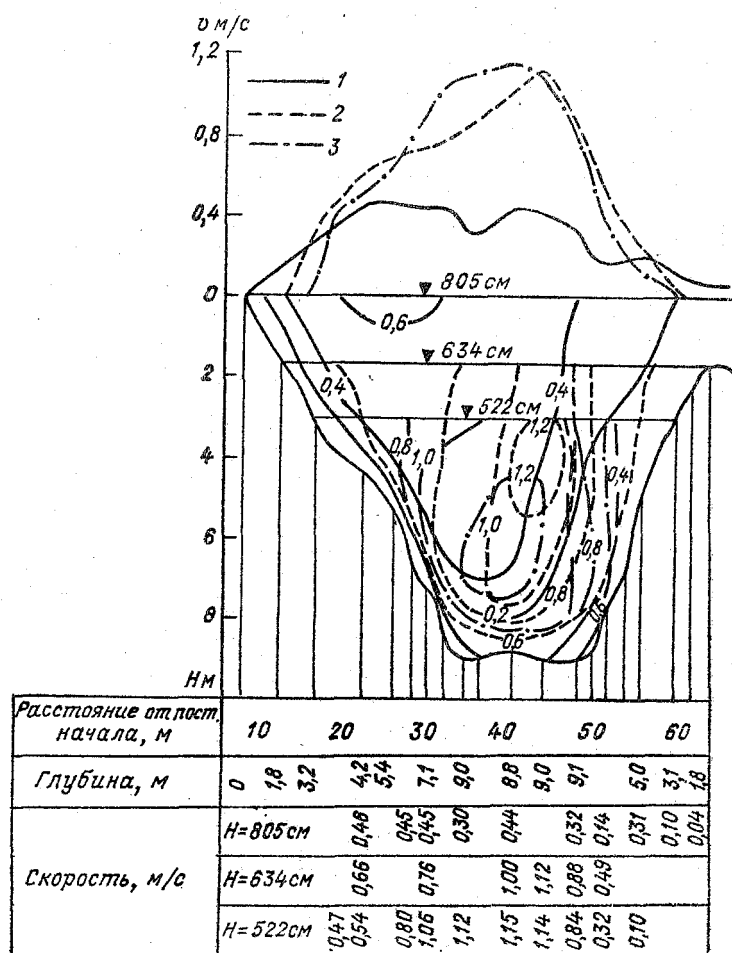


Рис. 2.19. Профиль поперечного сечения с изотопами и кривыми распределения средних на вертикалях скоростей по ширине гидроствора р. Ветлуги—д. Быстри, 1968 г.
1) $H=805$ см; 2) 634 см; 3) 522 см.

Более четко перегиб кривых зависимостей $Q_p = f(H)$, $v_p = f(H)$ и $I_p = f(H)$ в русловой части потока за счет эффекта взаимодействия руслового и пойменного потоков наблюдается на малых и средних реках, где тормозящее воздействие потока прослеживается по всей ширине руслового.

Расст. от пост. нача.л., м	43	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	174	194	236	290	340	390	490	500	540	566																							
Глубина, м	0	1,5	2,0	4,0	4,7	4,8	5,1	5,6	6,3	5,6	1,5	1,4	1,8	2,4	2,3	0,8	1,0	0,8	1,2	0,7	0,6	0																						
Скорость, м/с	$H = 610 \text{ см}$ $H = 529 \text{ см}$ <table border="1"> <tr> <td>0,25</td> <td>0,63</td> <td>0,53</td> <td>0,97</td> <td>1,01</td> <td>0,95</td> <td>0,29</td> <td>0,29</td> <td>0,44</td> <td>0,43</td> <td>0,23</td> </tr> <tr> <td>0,25</td> <td>0,36</td> <td>0,52</td> <td>0,54</td> <td>0,61</td> <td>0,50</td> <td>0,18</td> <td>0,21</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </table>																						0,25	0,63	0,53	0,97	1,01	0,95	0,29	0,29	0,44	0,43	0,23	0,25	0,36	0,52	0,54	0,61	0,50	0,18	0,21			
0,25	0,63	0,53	0,97	1,01	0,95	0,29	0,29	0,44	0,43	0,23																																		
0,25	0,36	0,52	0,54	0,61	0,50	0,18	0,21																																					

Данные измерений 1953 г. при уровнях: 1 — 666 см; 2 — 529 см.

В качестве наглядной иллюстрации на рис. 2.19 и 2.20 приведены профили поперечных сечений с изотопами по двум близким по водности рекам — Ветлуге и Пьяне. Как видим, при уровнях, предшествующих выходу воды на пойму, на р. Ветлуге наибольшие скорости в русловой части потока достигали 1,2 м/с, а после затопления поймы они уменьшились до 0,6 м/с, т. е. примерно в 2 раза. Противоположный ход изменения скорости наблюдался на р. Пьяне, где максимальные скорости в русловой части увели-

чилились с 0,6 м/с (до выхода воды на пойму) до 1,2 м/с (после ее затопления).

Таким образом, за счет эффекта взаимодействия потоков при третьем типе на р. Ветлуге в ее русловой части наблюдалось уменьшение скорости примерно в 2 раза, а на р. Пьяне (второй тип взаимодействия потоков), наоборот, увеличение скорости тоже в 2 раза.

Такой характер изменения скорости в русловых частях водотоков объясняется особенностями морфологического строения участков расположения гидростворов, которые можно приближенно охарактеризовать с помощью угла α между динамическими осями взаимодействующих потоков. Тем более, что зависимость между средними скоростями русловых потоков и углами α прослеживается достаточно четко (см. рис. 2.7).

Значительно сложнее характер течений и процесс воздействия руслового потока на пойменный. Это обусловлено сложностью морфологического строения реальных пойм и особенностями динамики их затопления. К сожалению, низкое качество натурной информации о пойменных потоках затрудняет разработку расчетных методов.

Задача работы: изучение механизма и самого процесса взаимодействия руслового и пойменного потоков и выявление влияния особенностей морфологического строения расчетного участка на гидравлику руслопойменного потока.

Литература:

Барышников Н. Б. Морфология, гидрология и гидравлика пойм, гл. 3 и 4.

Барышников Н. Б., Попов И. В. Динамика русловых потоков и русловые процессы, п. 1.15—1.17.

Описание установки и методика выполнения эксперимента

Экспериментальная работа выполняется на русловой площадке, где монтируется модель русла с поймой. Вид и размеры модели зависят от возможностей лабораторной базы ВУЗа. В крайнем случае она может быть выполнена в лотке прямоугольного сечения шириной $B = 0,4$ м и длиной не менее 3 м, желательно с переменным уклоном. В этом случае монтируется модель прямоугольного русла с прямоугольной поймой при параллельности их геометрических осей (рис. 2.21). При наличии русловой площадки целесообразно смонтировать модель русла, пересекающего пойму под углом $\alpha \approx \pi/4$ или криволинейного меандрирующего русла с прямолинейными участками и одно- или двухсторонней поймами.

Учитывая инвариантность моделей, положение измерительных

створов в каждом конкретном случае назначается преподавателем. Однако следует избегать их расположения на участках русел, имеющих большую кривизну. Необходимо также учитывать ограниченность времени на выполнение студентами экспериментальной работы.

Установку целесообразно оборудовать специальной тележкой, предназначенной для крепления приборов и оборудования и имеющей приспособления для перемещения датчиков приборов в поперечном и вертикальном направлениях.

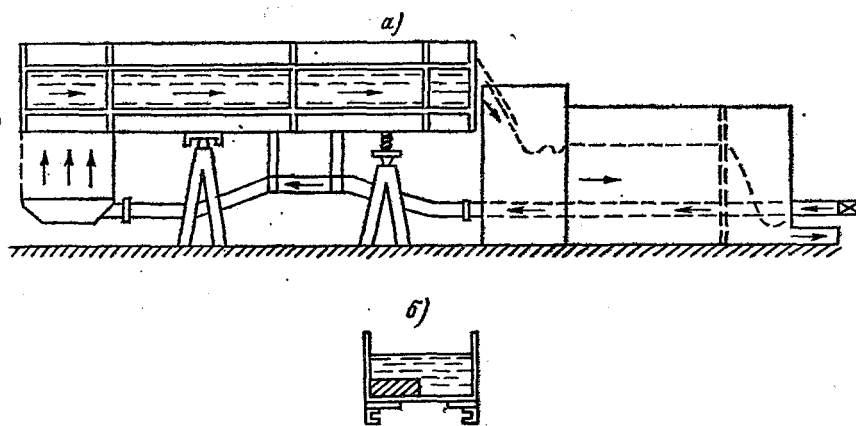


Рис. 2.21. Схема экспериментальной установки.
а — общий вид, б — поперечное сечение.

Закономерности протекания воды на таких моделях близки к основным закономерностям, возникающим при взаимодействии руслового и пойменного потоков.

Эксперимент выполняется следующим образом:

1. Совместно с преподавателем наметить створы измерений и места расположения скоростных и промерных вертикалей. Определить углы α пересечения (схождения или расхождения) геометрических осей русла и поймы.

2. С помощью тастера (или другого датчика для измерения глубин и уровней) и лабораторного нивелира определить отметки дна русла и поймы в створах измерений и в других характерных местах с целью получения плана участка русла и поймы в горизонталях. Количество точек измерений согласуется с преподавателем.

3. Установить вдоль русла разделительную стенку (из стекла, железа, окрашенных оргалита, фанеры или другого материала), отделяющую русловой поток от пойменного.

4. Измерить расходы воды отдельно в русловом и пойменном отсеках при квазиравномерном движении воды. Измерения вы-

полияются через 1 см амплитуды уровня воды с помощью водослива или методом скорость—площадь. Особое внимание должно быть обращено на обеспечение квазиравномерного режима движения воды на установке, который достигается посредством поддержания постоянной глубины в русле по длине потока (с помощью жалюзи).

Одновременно с выполнением измерений необходимо построить кривые расходов воды для руслового $Q_p = f(H)$ и пойменного $Q_{\pi} = f(H)$ потоков. При отклонениях полученных значений от расчетных кривых более 3 % необходимо повторить измерения, обратив особое внимание на надежность обеспечения равномерности движения воды. Получение устойчивых зависимостей $Q_p = f(H)$ и $Q_{\pi} = f(H)$ свидетельствует о надежности экспериментальных данных.

5. Выполнить нивелировку отметок уровня воды в створах измерений. Рассчитать значения продольных и поперечных уклонов водной поверхности руслового и пойменного потоков.

Снять разделительную перегородку, тщательно заделать поврежденное покрытие в зоне ее установки. Выполнить измерения расходов воды в сложносоставном сечении методом скорость—площадь через 1 см глубины на пойме. Первое измерение осуществить при минимальном затоплении поймы $h_{\pi} \approx 0$. В качестве контроля одновременно производятся измерения расходов воды по водосливу.

6. Произвести нивелировку отметок водной поверхности в русле и на пойме в тех же точках, что и в п. 5. Вычислить значения продольных и поперечных уклонов водной поверхности руслового и пойменного потоков.

7. Определить направления вектора скорости на границе раздела руслового и пойменного потоков при различном наполнении поймы. С помощью опилок (древесных, алюминиевых и др.) зафиксировать направления поверхностных струй и определить границы и размеры водоворотных зон, а с помощью кристаллов марганцовки ($KMnO_4$) — спектры донных течений. Сфотографировать спектры поверхностных течений или выполнить их зарисовки на планах модели.

8. Определить в начале и конце опыта температуру воды на установке.

Обработка и анализ экспериментальных данных

1. Вычислить расходы воды, площади поперечных сечений, средние скорости и средние глубины как для руслового и пойменного отсеков, так и суммарные для обоих отсеков по данным измерений гидрометрическим способом и по водосливу при условии изоляции и при взаимодействии руслового и пойменного потоков.

2. Построить совмещенные кривые $Q = f(H)$, $F = f(H)$,

$v = f(H)$, $h = f(H)$ отдельно для руслового и пойменного отсеков потока при условии их изоляции и при взаимодействии.

На этот же график нанести кривые расходов воды для русла в целом при взаимодействии потоков в нем $Q_{p+п} = f(H)$ и при их изоляции $Q_p + Q_{п} = f(H)$.

3. Определить изменение пропускной способности русла ΔQ_p и русла с поймой ΔQ за счет эффекта взаимодействия потоков в каждом створе измерений. Для этого определить значения расходов воды по соответствующим кривым $Q = f(H)$ при условии изоляции (Q_p) и взаимодействии потоков ($Q_{p, в}$). Тогда $\Delta Q_p = Q_p - Q_{p, в}$ (при постоянных глубинах). Аналогичные расчеты выполнить для потока в целом

$$\Delta Q = (Q_p + Q_{п}) - Q_{p+п}.$$

Построить зависимости $\Delta Q_p = f(H)$ и $\Delta Q = f(H)$.

4. Построить план модели в горизонталях. Определить углы α между динамическими осями взаимодействующих потоков, приравняв их углам между геометрическими осями русла и поймы.

На плане модели произвести зарисовку спектров поверхностных и донных течений с указанием границ и местоположения водоворотных зон, областей отрыва и направлений движения вихрей.

5. Определить значения средних глубин ($h_{p, с}$) и средних скоростей ($v_{p, с}$) при уровнях, предшествующих уровням затопления бровок прирусловых валов, т. е. при наивысших уровнях, когда на установке наблюдается квазиравномерное движение потока. Подсчитать значения глубин h_p , соответствующие их относительным значениям $h_p/h_{p, с} = 1,10; 1,25$ и $1,50$; $h_{p1} = 1,10 h_{p, с}$; $h_{p2} = 1,25 h_{p, с}$; $h_{p3} = 1,50 h_{p, с}$.

6. По значениям глубин h_p и кривым зависимости $h_p = f(H)$ определить соответствующие значения уровней воды, а затем по кривым $v_p = f(H)$ — значения средних скоростей руслового потока при его взаимодействии с пойменным потоком. Расчеты выполнить для каждого створа измерений.

7. По данным расчетом для различных створов построить зависимости $v_p = f(\alpha)$ при постоянных значениях относительных глубин.

8. Вычислить числа Рейнольдса ($Re = v h / \nu$ и Фруда ($Fr = v^2 / (g h)$) при различных глубинах потока для различных створов.

9. По описательным характеристикам русла и поймы и таблицам Срибного, Карасева и ЛГМИ определить значения коэффициента шероховатости русла и поймы (приложения 8—10).

10. По данным измерений в различных створах рассчитать значения коэффициента шероховатости русла и поймы, используя для этого формулы Шези—Маннинга или Шези—Павловского. Сравнить расчетные и табличные значения. Объяснить причины расхождений.

Отчетные документы

- Приложения к отчету включают в себя следующие материалы:
- совмещенные кривые зависимостей $Q = f(H)$, $F = f(H)$, $v = f(H)$, $h = f(H)$ для русловой и пойменной частей потока;
 - графические зависимости $\Delta Q_p = f(H)$ и $\Delta Q = f(H)$;
 - план модели в горизонталях с указанием значений углов α , спектров поверхностных и донных течений и границ водоворотных зон;
 - графические зависимости $v_p = f(\alpha)$.

3 ТРАНСПОРТ НАНОСОВ РУСЛОВЫМИ ПОТОКАМИ

3.1. Общие положения

При проектировании и строительстве различных гидротехнических сооружений одним из важнейших, но слабо изученных факторов является сток наносов, определяющих в значительной степени размеры и характер русловых деформаций. В частности, они определяют продолжительность регулирования стока водохранилищами, влияют на глубины размыва и деформации при возведении мостовых переходов, строительстве водозаборов, водовыпусков и других гидротехнических сооружений.

По способу перемещения наносы подразделяются на взвешенные и донные, причем точных научно обоснованных критериев их деления на эти составляющие нет. Поэтому обычно за основу принимают метод отбора проб. Если наносы отбираются с помощью прибора для взятия проб взвешенных наносов — их относят к взвешенным, а если берут пробы донным батометром, то к донным, хотя и в том и в другом случае в прибор попадают фракции как тех, так и других наносов.

Соотношение между взвешенными и донными наносами изменяется в довольно широких пределах, однако большее их количество переносится во взвешенном состоянии. Так, на равнинных реках наблюдается преимущественно сток взвешенных наносов, достигающий 90—99 % общего их стока, а на горных реках сток донных наносов может достигать 70 %, хотя в значительной степени зависит от состава пород, слагающих бассейн реки, и других факторов и обычно составляет 20—30 %.

Эти оценки приближенные, что обусловлено либо отсутствием, либо низкой точностью данных об измеренных расходах донных наносов. Как известно, на сети Госкомгидромета СССР измерения донных наносов на равнинных реках не производятся, что обусловлено сложным характером их перемещения и недостаточной изученностью этого процесса и в конечном итоге отсутствием надежных методов и приборов для их измерений. Действительно, донные наносы могут перемещаться влечением по дну, сальтацией и в виде донных гряд или русловых образований. Однако четкие критерии, определяющие переход из одной формы перемещения в другую, фактически отсутствуют. Несколько больше натурной информации о перемещении крупных фракций наносов на горных реках, однако применяемый для их измерений сетчатый батометр также не обеспечивает необходимой точности.

Недостаток исходной информации привел к разработке многочисленных формул для расчетов расходов донных наносов. В настоящее время их насчитывается свыше 200. Степень же достоверности результатов расчетов по ним определяется качеством, объемом и диапазоном исходной информации, положенной в основу этих формул. Большинство из них получено по данным лабораторных исследований, в которых расход наносов измерялся весовым или объемным способом. Однако эти эксперименты, как правило, производились в узких лотках прямоугольного поперечного сечения, где значительное влияние на скорости потока, а следовательно, и на расходы наносов оказывает «эффект пространственности» [7]. В некоторых формулах выполнена попытка его учета посредством введения поправочных коэффициентов. В частности, В. Н. Гончаров [7] вводит в полученную им по данным измерений в узких лотках прямоугольного сечения ($B/h \leq 6$) формулу для расчета расходов донных наносов коэффициент, равный 1,76, уменьшающий их значения при переходе к речным потокам.

В то же время движение наносов начинается только при скорости течения, большей критической, поэтому в расчетные формулы обычно входит не абсолютное значение средней скорости потока, а ее отношение к критической скорости или разность их значений.

Определению критических скоростей посвящено большое количество исследований, в результате чего имеется множество формул для их расчетов. При этом особую сложность представляет разработка методов и формул для определения критических значений средней скорости потоков для связных грунтов (глины, илы и др.). Это обусловлено необходимостью учета молекулярных сил сцепления между частицами грунта, зависящих от его агрегатного состояния, и других факторов. Поэтому в практических расчетах обычно применяют различные нормативные таблицы, в которых значения критической скорости для одних и тех же грунтов приводятся в довольно широком диапазоне.

Для несвязных грунтов еще в XVIII веке Брамс предложил формулу для расчетов критической скорости вида $v_k = \alpha \sqrt{gk}$, который сохранился до настоящего времени, хотя вместо постоянного значения коэффициент α принимается переменным, зависящим от глубины и крупности наносов.

В данной главе приведены лабораторные работы, посвященные расчетам критических скоростей потоков и расходов донных наносов, а также изучению на экспериментальных установках режимов их перемещения на прямолинейном и криволинейном участках русла.

3.2. Лабораторные работы

№ 3.1. Расчет критических скоростей потока

Выбор расчетной формулы для определения критических скоростей потоков представляет определенные трудности, так как от-

сутствуют критерии оценки их точности и надежности. Детальный их анализ выполнен Ц. Е. Мирцхулава [25], проводившим большие экспериментальные исследования как для несвязных (сыпучих), так и для связных грунтов. При разработке методики расчетов за основу им была принята методика В. Н. Гончарова, усовершенствованная посредством введения в расчетную формулу дополнительных параметров, учитывающих силы молекулярного сцепления между частицами, пульсацию скоростей и другие факторы.

Ц. Е. Мирцхулава на основе обширных лабораторных экспериментов также разработал методику расчетов критических скоростей для связных грунтов [25].

Как известно [3, 25], обычно используют два значения критической скорости, которые, как правило, отличаются друг от друга на значение, близкое к $\sqrt{2}$.

Следует также отметить отсутствие четкости в терминологии. Так, имеется несколько терминов для обозначения нижнего предела критических скоростей: заиляющая, несдвигающая (по В. Н. Гончарову) или неразмывающая (по Ц. Е. Мирцхулава). Верхний же предел скоростей называют размывающей, или сдвигающей (по В. Н. Гончарову) скоростью.

Задача работы: расчет значений критической скорости потоков, протекающих по несвязным и связным грунтам, по различным методикам и критический анализ полученных результатов.

Исходные данные: заданы ширина равномерного потока прямоугольного сечения $2B$, его глубина h_1 , средняя крупность донных отложений k , ее отношение к их 5 %-ной крупности k_5/k для несвязных грунтов, а также характеристики связных грунтов (приложение 16).

Л и т е р а т у р а:

Б а р ы ш н и к о в Н. Б., П о п о в И. В. Динамика русловых потоков и русловые процессы, п. 2.5—2.7.

М и р ц х у л а в а Ц. Е. Основы физики и механики эрозии русел, гл. 1—3, 7.

Порядок выполнения работы

Несвязные грунты. 1. Рассчитать значения критических несдвигающих и срывающих скоростей по формулам В. Н. Гончарова для глубин h_1 ; $h_2 = 2h_1$; $h_3 = 3h_1$ и $h_4 = 4h_1$ или $h_i = ih_1$, где $i = 2; 3; 4$:

$$v_n = \lg \frac{8,8h_i}{k_5} \sqrt{\frac{2g(\rho_1 - \rho)k}{3,5\rho}}; \quad (3.1)$$

$$v_c = \lg \frac{8,8h_i}{k_5} \sqrt{\frac{2g(\rho_1 - \rho)k}{1,75\rho}}. \quad (3.2)$$

2. Определить значения критических скоростей при глубине h_1 по формулам:

И. И. Леви

$$v_n = 1,4 \sqrt{gk} \lg \frac{12R}{k_{10}} \quad \text{при} \quad \frac{R}{k_{10}} > 60, \quad (3.3)$$

$$v_n = 1,3 \sqrt{gk} \left(0,8 + 2/3 \lg \frac{10R}{k_{10}} \right) \quad \text{при} \quad \frac{R}{k_{10}} \leq 60; \quad (3.4)$$

Г. И. Шамова

$$v_n = 3,7k^{1/3}h^{1/6}, \quad (3.5)$$

$$v_c = 6,0k^{1/3}h^{1/6}; \quad (3.6)$$

А. М. Латышенкова

$$v_n = 1,6 \sqrt{gk} \left(\frac{h}{k} \right)^{0,2}; \quad (3.7)$$

Б. И. Студеничникова для осветленного потока

$$v_n = 0,9 \sqrt{\frac{g(\rho_1 - \rho)k}{\rho}} \left(\frac{h}{k} \right)^{0,25}, \quad (3.8)$$

для потока с наносами

$$v_n = 1,15 \sqrt{(1 + 3\rho^{2/3})gk} \left(\frac{h}{k} \right)^{0,25};$$

В. С. Кнороза

$$v_n = 1,3 \left(\lg \frac{14,7R}{k^{0,75}} \right) \sqrt{gk}; \quad (3.9)$$

Богарди

$$v_n = 22,9k^{4/9} \sqrt{\rho_1 g - 1}; \quad (3.10)$$

Мевиса

$$v_n = 0,5k^{4/3} \sqrt{\rho_1 g - 1}; \quad (3.11)$$

Ц. Е. Мирцхулава для потоков, несущих наносы в коллоидном состоянии:

$$v_n = \lg \frac{8,8h}{k_5} \sqrt{\frac{2m}{0,88\rho n'} [(\rho_1 - \rho)gk + 2C_{yn}^H k_1]}, \quad (3.12)$$

$$v_c = \lg \frac{8,8h}{k_5} \sqrt{\frac{2m}{0,44\rho n'} [(\rho_1 - \rho)gk + 2C_{yn}^H k_1]}. \quad (3.13)$$

Здесь ρ_1 и ρ — соответственно плотности наносов и воды, их соотношение ρ_1/ρ может быть принято равным 2,65; k , k_5 и k_{10} —

крупность наносов соответственно средняя и наибольшая, которой в смеси 5 и 10 %; $k_{10} \approx 0,9 k_5$; R — гидравлический радиус, для плоского потока принимаемый равным средней глубине; $n' = (u'_{\max} / \bar{u})^2$ — коэффициент перегрузки, определяемый по результатам измерений (рис. 3.1); m — коэффициент условий работы, учитывающий влияние наносов в коллоидном состоянии (при рас-

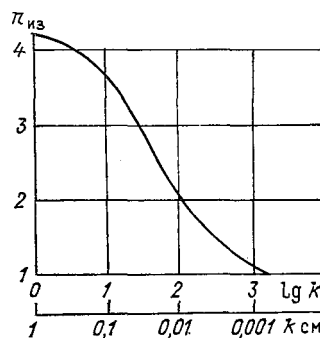


Рис. 3.1. Зависимость коэффициента перегрузки n_{kz} от крупности частиц (по экспериментальным данным).

четах принимается равным 1,0 для воды без наносов в коллоидном состоянии и 1,4, если их количество больше $0,1 \text{ кг/м}^3$); $C_{\text{ун}}^{\text{н}} = 8\rho\nu(g\nu)^{1/3}/k$ — усталостная прочность на разрыв для мелкозернистых грунтов природного плотного сложения, определяется с помощью рис. 3.2 (при $k > 0,20 \text{ мм}$ $C_{\text{ун}}^{\text{н}} \approx 1$); k_1 — коэффициент однородности наносов, изменяющийся от 0,05 до 0,75. При расчетах рекомендуется принимать его осредненное значение, равное 0,5.

3. При разнородных грунтах происходит вымывание мелких частиц наносов и на дне потока остаются крупные частицы. Это явление носит название *отмостка*. При этом значительно увеличиваются значения критических скоростей.

Рассчитать средние критические скорости по формуле Мирцхулава, принимая $k_{\text{отм}} \approx 0,9 k_5$:

$$v_{\text{н. отм}} = \lg \frac{8,8h_1}{k_5} \sqrt{\frac{2m}{0,44\rho n'} [g(\rho_1 - \rho) k_{\text{отм}} + 2C_{\text{ун}}^{\text{н}} k_1]}, \quad (3.14)$$

где $k_{\text{отм}}$ — наибольшая крупность частиц, отмаскивающих дно русла.

4. Выполнить анализ результатов расчетов, оценить их погрешности, приняв в качестве реперной формулу Мирцхулава.

5. Построить зависимость $v_{\text{н}} = f(h)$ (по формуле Гончарова) и оценить влияние глубин на значения критических скоростей.

6. Сравнить результаты расчетов по формулам (3.12) и (3.14) и оценить влияние отмостки на значения критических скоростей.

Связные грунты. 7. Рассчитать донные критические скорости по формуле Ц. Е. Мирцхулава:

$$v_{\Delta n} = 1,25 \sqrt{\frac{2m}{2,6\rho n'} [(\rho_l - \rho) gk + 1,25C_{yn}^H k_l]}, \quad (3.15)$$

$$v_{\Delta p} = 1,25 \sqrt{\frac{2m}{1,3\rho n'} [(\rho_l - \rho) gk + 1,25C_{yn}^H k_l]}. \quad (3.16)$$

8. Определить значения донных критических скоростей по табл. 3.1.

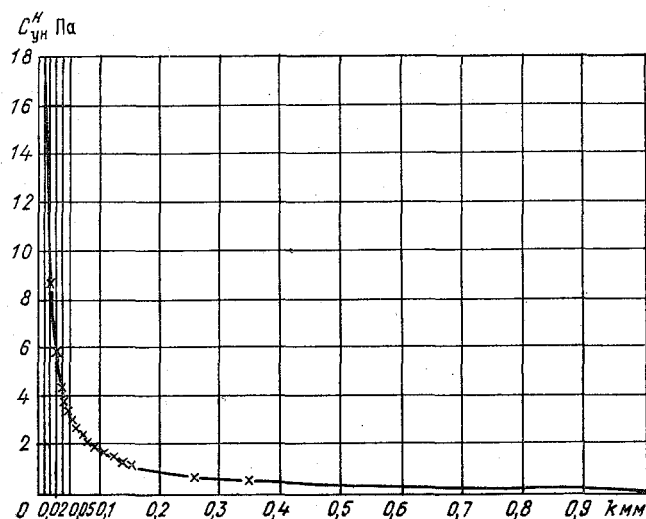


Рис. 3.2. Зависимость параметра C_{yn}^H от крупности частиц (по экспериментальным данным).

9. Сравнить значения скоростей, полученные по формуле (3.15) и табл. 3.1. Оценить отклонение табличных значений от расчетных.

ТАБЛИЦА 3.1

Ориентировочные значения допускаемых (неразмывающих) донных скоростей течения воды для различных грунтов в состоянии полного водонасыщения по Ц. Е. Мирцхулава

Почво-грунты	Содержание частиц, %		Допускаемая (неразмывающая) скорость для грунтов с различной объемной массой, м/с			
	<0,005 мм	0,005—0,05 мм	малоплотные, <1200 кг/м³	среднеплотные, 1200—1650 кг/м³	плотные, 1650—2040 кг/м³	очень плотные, 2040—2140 кг/м³
Глина	30—50	70—50	0,12	0,30	0,45	0,65
Тяжелые суглинки	20—30	80—70				
Суглинки легкие и средние	10—20	40—20	0,12	0,25	0,40	0,60
Почва песчаная и супесчаная	10	20	0,10	0,15	—	—

Контрольные вопросы

1. Как влияют наносы, находящиеся в коллоидном состоянии, на критические скорости потока?
2. Из каких соображений получается, что $v_k = \alpha \sqrt{gk}$?
3. Что такое отстойка и как она влияет на критические скорости потока?
4. Зачем нужны два значения критических скоростей?
5. В каких расчетах применяются критические скорости?
6. Каким образом гидравлическая крупность используется в расчетах параметров двухфазного турбулентного потока?

№ 3.2. Вычисление транспортирующей способности потока

Под транспортирующей способностью потока понимается то наибольшее количество наносов, которое поток способен транспортировать при заданных его параметрах и морфометрических характеристиках русла. Эта величина или равна или больше расхода наносов, так как при незначительном поступлении наносов из бассейна реки поток вынужден размывать свое русло или берега. Отсутствие или низкая точность исходной информации об измеренных расходах наносов, особенно донных наносов, приводит к использованию различных расчетных формул, которых насчитывается весьма большое количество. Различные ведомственные инструкции [36, 38 и др.] рекомендуют для расчетов расходов донных наносов те или иные формулы, хотя объективные критерии оценки точности и надежности этих формул отсутствуют. Более того, в различных странах обычно приоритет отдается региональным формулам, как правило, полученным по данным наблюдений именно этого региона.

Задача работы: расчет транспортирующей способности потока по ряду формул отечественных и зарубежных исследователей и выполнение анализа полученных результатов. Ввиду того что в технической литературе принято называть эти формулы формулами для подсчета расходов наносов, эта терминология в работе сохранена.

Исходные данные: заданы ширина равномерного потока прямоугольного сечения $2B$, глубина потока h_1 , средняя крупность наносов k , отношение 5 %-ной крупности наносов к средней k_5/k (см. приложение 15). Варианты расчетных заданий приведены в приложении 16.

Литература:

- Барышников Н. Б., Попов И. В. Динамика русловых потоков и русловые процессы, п. 2.10—2.14.
Гришанин К. В. Теория руслового процесса, § 22, 23.

Порядок выполнения работы

1. Определить среднюю скорость потока при глубине h_1 в предположении, что она равна критическому срывающему значению (по формуле (3.2), но при условии, что $k = k_5$), а затем при глубинах $h_2 = 2h_1$, $h_3 = 3h_1$ и $h_4 = 4h_1$, принимая при этом уклон водной поверхности и шероховатость русла неизменными. Для расчетов можно использовать либо формулу Шези, либо формулу Гончарова

$$v = 4 \lg \frac{8,8h}{k_5} \sqrt{2ghl}.$$

Определив значение v_1 , можно рассчитать $v_{2,3,4}$ по формулам:

$$v_{2,3,4} = v_1 \left(\lg \frac{8,8h_{2,3,4}}{k_5} / \lg \frac{8,8h_1}{k_5} \right) \sqrt{h_{2,3,4}/h_1}$$

$$\text{или } v_{2,3,4} = v_1 \frac{C_{2,3,4}}{C_1} \sqrt{\frac{h_{2,3,4}}{h_1}}.$$

Коэффициент Шези определяется по одной из известных формул, например Павловского или Маннинга, т. е. $C = h^{2/3}/n$ или $C = h^{1/6}/n$, а коэффициент шероховатости n для безгрядной формы перемещения наносов можно приближенно определить по выражению $n \approx \Delta^{1/6}/22,2$ (где Δ — в метрах). Как вытекает из постановки задачи $v_{2,3,4} \neq v_{c2,3,4}$.

2. Определить расходы перемещения наносов по формуле Гончарова при всех четырех глубинах и построить график связи $Q_S = f(h)$. Для этого использовать результаты расчетов критических скоростей, полученные в лабораторной работе № 3.1.

3. Вычислить расходы воды, концентрации наносов и построить графики связи $Q = f(h)$; $Q_S = f(Q)$ и $S = \frac{Q_S}{Q} 100 = f(h)$.

4. Используя результаты расчетов критических скоростей (лабораторная работа № 3.1), рассчитать удельные расходы перемещения наносов при глубине h_1 по формулам:

Г. И. Шамова

$$q_S = 0,95 \sqrt{k} (v/v_K)^3 (v - v_K) (k/h)^{0,25}; \quad (3.17)$$

И. И. Леви

$$q_S = 0,002kv^3 (v - v_K) (k_{10}/h)^{0,25} / (\sqrt{gk})^3; \quad (3.18)$$

В. Н. Гончарова

$$q_S = 3(1 + \varphi) v_n k (v/v_n - 1) (v^3/v_n^3 - 1); \quad (3.19)$$

К. Брауна

$$q_S = 40 \bar{v}_d k / [(\rho_1/\rho - 1) gk]^{5/2}, \quad (3.20)$$

где $v_d = \sqrt{ghl}$ — динамическая скорость.

В (3.20) используется значение динамической скорости v_d , определяемой по медианному диаметру частиц донных отложений. С учетом формулы А. Зегжды

$$\bar{v}_d = v \left[5,66 \lg \left(\frac{h}{1,6k} \right) + 6 \right], \quad (3.21)$$

Ван Рейна

$$q_s = 0,005 h v (v - v_k)^{2,4} (k/h^{1/2}) / \sqrt{(\rho_l/\rho - 1) g k}^{2,4}, \quad (3.22)$$

где $v_k = 0,19 k^{0,1} \lg (2h/k)$ при $k = 0,2-0,4$ мм и $v_k = 8,5 k^{0,6} \lg (2h/k)$ при $k = 0,6$ мм.

5. Используя предположение В. Н. Гончарова о том, что перемещение наносов в донногрядовой фазе происходит при средних скоростях потока в диапазоне $v' \leq v \leq v''$, установить, будет ли происходить перемещение наносов при заданных условиях в безгрядной или донногрядовых фазах. Критические скорости v' и v'' рекомендуется определять по формулам $v' = 2,5 v_n (k_5/h)^{1/12}$ и $v'' = 2,5 v_n (h/k_5)^{1/12}$.

6. Определить расход наносов при донногрядовой фазе их перемещения по формуле $g_r = a \Delta_r c_r$ ($a \approx 0,6$ — коэффициент формы гряд). Расчет скоростей перемещения гряд c_r рекомендуется осуществлять по формулам, приведенным в [3, с. 233—235], или другим по усмотрению преподавателя.

7. Выполнить сравнение и анализ полученных результатов.

Контрольные вопросы

1. Как поток поймы влияет на транспорт наносов русловым потоком?
2. Перечислите основные предпосылки и допущения метода Эйнштейна—Великанова?
3. Перечислите объективные критерии деления наносов на взвешенные и донные?
4. Как измеряются расходы взвешенных и донных наносов?
5. Какие недостатки приборов и методов для измерения расходов взвешенных и донных наносов?
6. Какие классификации донных гряд вам известны?
7. Перечислите основные особенности селевых потоков.

3.3. Экспериментальные работы

№ 3.3. Режимы перемещения наносов

Деление наносов на влекомые и взвешенные условно, поскольку объективные критерии такого деления в настоящее время отсутствуют.

К *влекомым наносам* относят частицы, перемещающиеся в непосредственной близости от дна. *Взвешенные частицы* перемеща-

ются по всей толще потока. Ряд исследователей (К. В. Гришанин и др.) выделяет полувзвешенные наносы, т. е. наносы, занимающие при своем перемещении промежуточное положение между влекомыми и взвешенными. Некоторым исключением является гипотеза В. Н. Гончарова, в которой предлагаются критерии деления наносов на русловые и нерусловые. Такая условность деления вызвана сложностью процесса и недостаточной изученностью механизма перемещения наносов.

Режимы перемещения наносов в придонном слое также могут быть различными. При средних скоростях потока, несколько больших критических — неподвижных, наносы в придонном слое перемещаются либо скачкообразно (*сальтация*), либо влечением по дну. При возрастании скоростей потока и переходе их через критическое значение наблюдается (в довольно широком диапазоне изменения средних скоростей потока) донногрядная фаза перемещения наносов.

Задача работы: изучение процесса перемещения наносов в различных фазах, установление значений критических скоростей и измерение расхода наносов весовым способом.

Литература:

Барышников Н. Б., Попов И. В. Динамика русловых потоков и русловые процессы, п. 2.8—2.14.

Гончаров В. Н. Динамика русловых потоков, гл. 10.

Гришанин К. В. Теория руслового процесса, § 23.

Описание установки и методика выполнения эксперимента

Экспериментальная работа в ЛГМИ выполняется на лотке с переменным уклоном длиной 3 м, шириной 40 см (рис. 3.3). В конце лотка расположены жалюзи для регулировки уровня воды. Расход воды, подаваемый на установку из трубопровода, регулируется с помощью задвижки. В конце лотка установлена песколовка для сбора наносов, перенесенных потоком с установки.

На дно лотка наносится ровный слой однородного песка. Полностью закрываются жалюзи (в конце лотка), и лоток осторожно заполняется водой, поверхность песка снова выравнивается. После этого начинают медленно открывать задвижки на подводящем трубопроводе и одновременно постепенно открывать створки жалюзи. При этом расход воды в лотке нарастает, а наполнение лотка в его средней части необходимо поддерживать постоянным.

В этот период производятся наблюдения за состоянием дна сквозь прозрачные стенки лотка. Вначале при очень малых скоростях течения частицы, покрывающие дно, остаются неподвижными, а при достижении потоком критической (неподвижной) скорости станут заметны срывы отдельных частиц. Однако при неподвижной скорости этот процесс не является массовым, и, как правило, сорванные частицы прекращают двигаться, попав

в отдельные углубления дна. Необходимо измерить указанную критическую скорость трубкой Реббока. Измерение скоростей производится в точках на осевой вертикали.

Дальнейшее увеличение скорости приводит к увеличению числа сорванных частиц. И наконец, при достижении потоком значения второй критической (размывающей) скорости движение

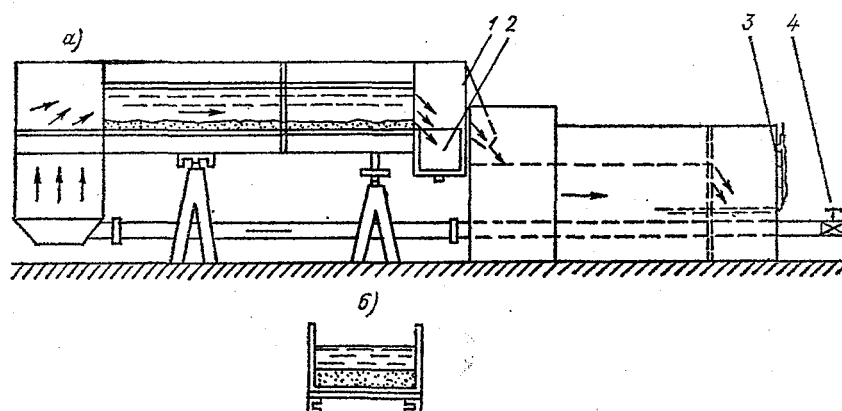


Рис. 3.3. Схема экспериментальной установки (с переменным уклоном) для изучения режима перемещения наносов.

а — общий вид, *б* — поперечное сечение.
1 — жалюзи, 2 — песколовка, 3 — устройство для измерения напора воды на водосливе, 4 — задвижка.

частиц становится массовым. Это значение скорости также необходимо измерить.

В диапазоне скоростей потока от неподвижной до значений, несколько меньших размывающих, перемещение наносов происходит либо влечением, либо сальтацией.

При скорости потока, близкой к размывающей, происходит скачкообразное качественное изменение в состоянии подвижного дна. Около некоторых поперечных сечений, разделенных расстояниями одного и того же порядка, наносы начинают накапливаться в виде небольших валиков, простирающихся поперек всего лотка. Как только высота валиков достигнет нескольких диаметров песчинок, становятся заметными зоны отрыва течения на тыловой стороне валиков — зоны, которые создают непроходимые барьеры для поступательного движения частиц. Процесс накопления песчинок перед этими гидродинамическими барьерами, сопровождающийся автоматическим ростом областей отрыва, в скором времени приводит к тому, что все дно оказывается покрытым более или менее регулярными грядами.

В дальнейшем движение влекомых наносов происходит в форме движения донных гряд. Поток смывает наносы с пологого напорного ската гряды, влечет их к гребню, где они сваливаются вниз, накапливаясь на тыловом скате, обеспечивают медленное пере-

мещение гряды вниз по течению. Движение отдельных песчинок становится прерывным: совершив быстрый пробег по напорному скату гряды и свалившись в ее подвалье, песчинка погребается под следующими за ней и входит в тело гряды. Здесь она пребывает в течение времени, необходимого для того, чтобы гряда подвинулась на всю свою длину. Тогда она снова оказывается на поверхности дна и в очередной раз совершает пробег по напорному скату.

Следствием перехода от плоского к волнообразному состоянию дна является резкое возрастание руслового сопротивления — к потерям энергии по длине на преодоление трения о зернистую поверхность дна прибавляются местные потери на внезапное расширение за гребнями гряд. В лотке это сразу легко заметить по возрастанию уклона свободной поверхности. Если лоток был неосторожно наполнен на большую глубину, то при формировании гряд может произойти перелив воды через стенки лотка в его верхней части.

Увеличение скорости течения в лотке до некоторого момента ведет к увеличению высоты гряд, но затем их рост прекращается. Внимательно следя за поведением частиц сквозь стенку лотка, можно установить, что остановка роста гряд происходит тогда, когда вследствие большой скорости течения часть песчинок, подходящих к гребню гряды, не сваливается по тыловому скату, а перепрыгивает через валец на напорный скат нижерасположенной гряды. Если дальше увеличивать скорость течения, то гребни гряд, сложенных из песка или мелкого гравия, вскоре «задымятся» — начнется массовый переход влекомых частиц во взвешенное состояние. Отвечающая началу этого перехода скорость течения называется *второй критической скоростью*. Переход от увлечения к взвешиванию имеет своим конечным результатом исчезновение гряд.

История о связи режима движения наносов со скоростью течения на этом, однако не заканчивается. Если скорость течения в лотке превышает волновую, т. е. поток находится в бурном состоянии, то на его дне формируется новый вид структур — так называемые антидюны — гряды обращенного профиля с крутым напорным и пологим тыловым скатом. Грунт, смытый бурным потоком с низового откоса, откладывается за гидравлическим прыжком, и в результате антидюны ползут против течения.

Таким образом, в соответствии с классификациями Гончарова и Кеннеди существуют следующие четыре стадии перемещения мелкозернистых донных отложений: 1) первая гладкая стадия при скоростях течения, меньших размывающей; 2) стадия грядового движения; 3) вторая гладкая стадия, отвечающая массовому взвешиванию донного материала; 4) стадия движения антидюн (при $Fr > 1,5$).

В процессе эксперимента необходимо измерить высоту, длину и скорость движения гряд. Данные измерений заносят в журнал опытов (приложение 15).

Визуальное наблюдение желательно сопровождать фотосъемками или зарисовками.

После наблюдения указанного процесса необходимо измерить весовым способом расходы наносов при безгрядном и донногрядным режимах их перемещения. Измерение осуществляется следующим образом. На установке достигается (с помощью жалюзи) режим, по возможности близкий к равномерному. В конце лотка устанавливается песколовка.

В момент установки песколовки включается секундомер. За период измерения расхода наносов измеряется расход воды по водосливу, скорости течения на вертикалях, температура воды, а также производится промер глубин в расчетном створе. После окончания эксперимента необходимо определить механический состав наносов.

Обработка экспериментальных данных и их анализ

1. Вычисление измеренного расхода наносов $Q_{S \text{ изм}}$ выполняется по формуле

$$Q_{S \text{ изм}} = P/t,$$

где P — масса наносов; t — время их измерения.

Расчет производится как для условий безгрядного, так и для донногрядного режимов движения наносов.

2. Определить среднюю и 5 %-ную крупность наносов.

3. Рассчитать расход наносов по формулам:

В. Н. Гончарова

$$Q_{Sr} = 3(1 + \varphi) v_n k (v/v_n - 1) (v^3/v_n^3 - 1) B,$$

К. В. Гришанина

$$Q_{Srp} = 0,015k (v/v_n)^3 (v - v_n) B.$$

Для этого необходимо вычислить среднюю $v = Q/(Bh)$ и среднюю неподвижную скорости потока

$$v_n = \lg \frac{8,8h}{k} \sqrt{\frac{2g(\rho_1 - \rho)k}{3,5\rho}}.$$

Расчеты выполняются для различных режимов перемещения наносов.

4. Сравнить результаты расчетов и измерений и определить отклонения расчетных значений от измеренных

$$\Delta Q_S = Q_{S \text{ изм}} - Q_{S \text{ расч}}; \delta Q_S = (\Delta Q_S / Q_{S \text{ изм}}) 100.$$

5. Расчетами по формулам, приведенным в [3, п. 2.11.6], определить высоту, длину и скорость перемещения гряды. Сравнить измеренные и расчетные значения параметров гряд и определить погрешность расчетов.

Отчетные документы

Приложения к отчету включают планы модели с зарисовками или фотоснимками, иллюстрирующими расположение гряд в различные фазы их развития, и журналы опытов.

№ 3.4. Деформация русла на прямолинейном участке и на изгибе

Как указывалось (см. лабораторную работу № 2.9), теория движения потока даже на одиночном изгибе русла еще не разработана. Действительно, имеются две концепции, объясняющие поведение потока на изгибе, основанные на теории отражения или концепции движения частиц жидкости по криволинейным траекториям под действием центростремительной силы [3]. Обе концепции имеют своих сторонников и противников. В частности, благодаря работам Н. Е. Кондратьева [21] теория отражения, интенсивно разрабатывавшаяся в ГГИ, нашла широкое применение для объяснения деформаций излучин на меандрирующих реках. В то же время надежного математического аппарата для расчетов деформаций излучин из-за сложности проблемы разработано не было. Поэтому особый интерес представляют экспериментальные исследования деформаций на изгибе, как одиночном, так и сложном. К тому же интенсивно развивающиеся гидроморфологические методы расчетов и прогнозов русловых деформаций являются грубо приближенными и не обеспечивают необходимой точности вычислений.

К сожалению, в лабораторных условиях исследования в основном выполняются на установках, где смонтирован одиночный изгиб русла с различными углами поворота, но в большинстве случаев с углом, равным π . Исследования, как правило, выполняются на жестких моделях, хотя практически все естественные водотоки протекают в деформируемых руслах.

И. В. Поповым по результатам исследования рек на протяжении 9576 км установлено [31], что примерно на 94 % их длины наблюдался тот или иной тип меандрирования, т. е. изгибы или излучины русла встречаются в природных условиях и особенно на равнинных реках довольно часто.

Формы движения наносов очень многообразны: влечение по дну, сальтация, перемещение в виде гряд и различных форм русловых образований (побочней, перекатов, осередков, островов и пр.).

Наибольший интерес представляют следующие формы перемещения наносов, присущие как меженному, так и паводочному периодам, и достаточно просто воспроизводимые в лабораторных условиях: различные виды донных гряд, влечение их по дну, сальтация и перекаты.

Задача работы: изучение на полужесткой модели форм движения наносов и русловых деформаций как на одиночном изгибе, так и на прямолинейном участке.

Литература:

Барышников Н. Б., Попов И. В. Динамика русловых потоков и русловые процессы, гл. 2, с. 185—224.

Гришанин К. В. Динамика русловых потоков, гл. 5, с. 186—233.

Описание установки и методика выполнения эксперимента

Работа выполняется на установке (рис. 3.4), детальное описание которой приведено в лабораторной работе № 2.9.

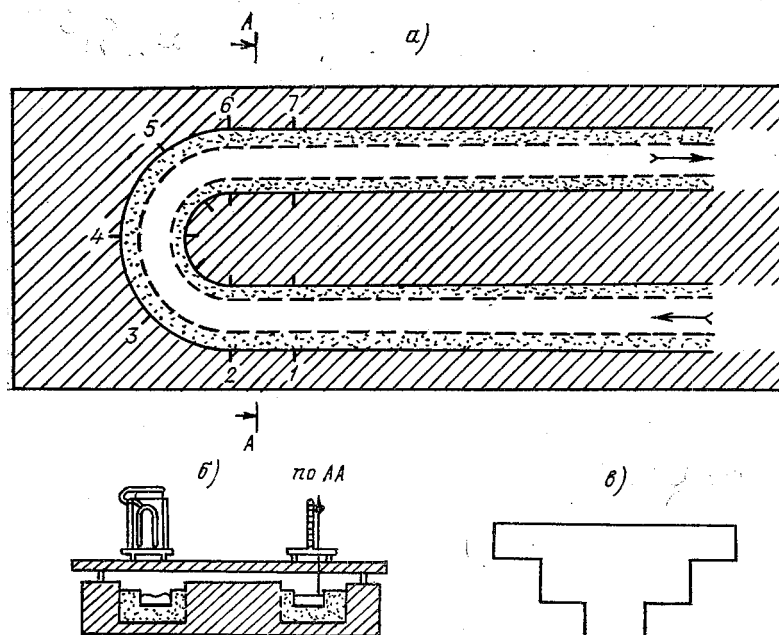


Рис. 3.4. Схема установки для изучения деформаций на изгибе русла.

а — план установки, б — поперечное сечение по АА, в — шаблон для формирования дна установки перед выполнением эксперимента. 1—7 — створы измерений.

Работа начинается с формирования деформируемого дна. С этой целью на жесткое дно установки наносится слой песка толщиной 10 см и разравнивается щитком с ограничителем глубины. Отобрать пробы песка со дна установки для его грануло-

метрического анализа. Затем с помощью шаблона (рис. 3.4 в) в выровненном дне создается прорезь, берега и дно которой для увеличения связности грунта смачиваются раствором глины или других связующих материалов. После этого с помощью мерной иглы, установленной на тележке (рис. 3.4 б), нивелира и линейек определяются отметки дна вплоть до жестких стенок установки, необходимые для построения плана русла. Затем подается расход воды на установку. При этом уровень воды в русле должен устанавливаться не выше уровня бровок.

Регулировкой жалюзи и измерениями отметок свободной поверхности потока устанавливают квазиравномерное движение жидкости на прямолинейном участке русла, при котором глубины потока должны быть одинаковыми. Это требование относится только к началу опыта, так как по прошествии некоторого промежутка времени, когда начнутся интенсивные деформации дна, это условие сохранить невозможно даже и на прямолинейном участке.

Как только закончены эти предварительные работы, бригада начинает визуальные наблюдения за деформациями дна и всеми явлениями, им сопутствующими: изменением направления движения поверхностных и донных струй, размерами и направлением перемещаемых частиц и очертаниями областей деформации песчаного дна.

Одновременно с визуальными наблюдениями необходимо:

- 1) — измерять отметки водной поверхности в створах 1, 3—6 в начале и конце эксперимента, проверять неизменность подачи расхода воды на установку, делая отсчеты отметок уровней по водомерному стеклу в начале и конце опыта;
- 2) — фиксировать скорость движения отдельных гряд на прямолинейном участке русла и на излучине. Для этого следует определить время прохождения гребней двух или трех смежных гряд через какой-либо поперечный створ, одновременно измерив их длину и высоту. Аналогичные измерения следует произвести 3—4 раза и определить средние скорости движения, длину и высоту гряд;
- 3) — зафиксировать относительно жестких стенок русла положение бровок размываемых и намываемых берегов прорези, обратив особое внимание на деформации, происходящие в створах 3—7. Промежутки времени между замерами зависят от скорости деформации берегов и в ходе эксперимента устанавливаются преподавателем. Число измерений положений бровок берегов прорези за время опыта должно быть не менее четырех—пяти;

— измерить температуру воды на установке.

Все визуальные наблюдения и зарисовки наносятся на бланк-схему установки.

После того как поток разработает дно и сформирует плесы и перекаты, интенсивность деформаций резко уменьшится, т. е. наступят условия, близкие к стабилизации русла, необходимо выполнить следующий цикл работ.

— определить значение и направление скорости течения в створах 3, 5, 6 на трех вертикалях (в точках: поверхность; 0,6h; дно). Измерения произвести трубкой Пито (Реббока) или микровертушкой и флюгером. Определить также при помощи поплавков поверхностные скорости течения на стрежне потока между створами 1—3; 3—5; 5—7.

После выполнения этих работ опыт можно прекратить. Прекращение подачи воды на установку нужно производить с соблюдением предосторожностей, позволяющих обеспечить сохранность форм рельефа дна:

— воду с установки спускают медленно, для чего постепенно закрывают задвижку, регулирующую подачу воды на установку;

— полностью закрывают жалюзи, расположенные в конце установки.

После этого производят зарисовку образовавшихся форм рельефа. Зарисовка производится штриховкой или затенением на плане более глубоких мест и гряд.

Одновременно другая часть бригады производит нивелирование отметок дна после деформации его потоком. Отметки дна нивелируются в каждом створе и во всех характерных точках перелома поперечных и продольных профилей.

На прямолинейном участке и изгибе движение наносов происходит при донногрядном режиме. На изгибе гряды более перекошены, поэтому особенно тщательно следует зарисовать схему расположения донных гряд. Далее следует выбрать по две-три отдельные, не связанные друг с другом гряды на прямом участке и на изгибе, измерить и зарисовать их основные параметры: длину, высоту и форму. Зарисовать пляж и затонскую часть переката у выпуклого берега. Сфотографировать рельеф дна модели.

Обработка экспериментальных данных и их анализ

1. Подсчитать расход воды и среднюю скорость течения по данным измерений скорости в основном створе изгиба и сравнить их с измеренными по водосливу.

2. Построить эпюры распределения скоростей по глубине потока. По этим эпюрам определить донные скорости течения, нормальные к створу, и значение истинной скорости у дна по выражению

$$u_{\Delta} = u_{\Delta \text{ изм}} / \cos \varphi,$$

где φ — угол между направлением скорости в точке и нормалью к створу.

3. Построить в логарифмических координатах график гранулометрического состава песка, слагающего дно потока, и определить по нему 5 %-ную крупность k_5 .

4. Среднее значение крупности смеси фракции определяется по кривой гранулометрического состава и выражению

$$k = \frac{\sum k_i p_i}{\sum p_i} = \frac{\sum k_i p_i}{100},$$

где k_i — среднее значение интервала фракций; p_i — процентное содержание i -й фракции.

Вычислить значения средних и донных критических неподвижных и срывающих скоростей на вертикалях, в которых измерялись скорости течения. Сравнить эти значения с измеренными средними и истинными донными скоростями и дать вывод о направлении деформации. Объяснить причины расхождений.

6. Подсчитать осредненные значения скоростей движения, высоты и длины гряд по данным измерений. Определить по формулам, приведенным в [3, с. 229—234], высоту, длину и скорость перемещения гряд. Сравнить расчетные и экспериментальные данные.

7. По данным измерений построить план деформации русла в горизонталях. Горизонтالي провести через 1 или 2 мм.

8. Оформить бланки-схемы зарисовок визуальных наблюдений.

9. Построить совмещенные планы деформации русла (положение бровок берегов прорези в разное время опыта). По этим разновременным съемкам дать заключение о скорости деформации на разных участках, а также об изменении скорости деформации во времени.

10. Построить совмещенные профили русла для створов 3—7 по данным нивелирования до размыва и после стабилизации размыва.

11. Определить коэффициенты формы сечения $B/h_{\text{ср}}$ и $B/h_{\text{макс}}$ для всех створов по данным измерений для периода стабилизации русла. Выполнить анализ изменений их значений по длине русла за период наблюдений (до размыва).

12. Построить совмещенные продольные профили свободной поверхности и дна по обоим берегам для начального и конечного моментов времени.

13. Анализ производится на основе экспериментальных данных после их обработки. В нем необходимо сравнить планы движения струй и деформаций с учетом данных измерений скоростей. Выделить основные зоны деформаций и указать возможные причины их возникновения. Особое внимание обратить на образование переката. Дать анализ причин расхождения экспериментальных и расчетных данных.

Отчетные документы

Приложения включают следующие материалы:

- план установки с изображением поверхностных и донных струй;
- планы деформаций дна в горизонталях и деформаций прорези берегов;
- график гранулометрического состава песка;

- эпюры распределения скоростей по глубине потока;
- совмещенные продольные профили свободной поверхности воды по двум берегам для моментов начала размыва и стабилизации русла;
- поперечные профили сечения русла в створах 1—7 (для периода стабилизации размыва);
- таблицу чисел Рейнольдса и Фруда, коэффициента распадаемости, средней, первой и третьей критических скоростей потока:

$$Re = vR/\nu; \quad Fr = v^2/(gR); \quad B/h_{cp}; \quad v;$$

$$v' = 2,5v_n (k_5/h)^{1/12};$$

$$v'' = 2,5v_n (h/k_5)^{1/2}.$$

Каждый чертеж выполняется на стандартном листе, подписывается стандартным шрифтом и на нем выписываются сведения о расчетном расходе воды и значениях вышеупомянутых чисел Рейнольдса и Фруда.

Образец титульного листа приведен в приложении 14.

4 РУСЛОВЫЕ ПРОЦЕССЫ

4.1. Общие положения

Изучение русловых процессов имеет большое практическое значение. Их недоучет при строительстве гидротехнических сооружений приводил и приводит к катастрофическим последствиям и многомиллионным ущербам, поэтому разработке теории русловых процессов посвящены многочисленные отечественные и зарубежные исследования. В последние годы довольно четко сформировались два принципиально различных подхода к разработке теории русловых процессов: гидродинамический и гидроморфологический. Первый основан на применении системы уравнений гидромеханики, вытекающих из законов сохранения массы и энергии (или количества движения), к движению двухфазных потоков, а затем и к решению проблемы расчета русловых деформаций, второй основан на типизации морфологически однородных русловых форм и образований (по крупномасштабным планово-высотным картографическим и аэрофотосъемочным материалам) и определении средних скоростей их перемещения с целью разработки фоновых прогнозов русловых процессов.

В настоящее время наблюдается разграничение сфер приложения этих подходов. Так, гидродинамический метод применяется при решении задач, связанных с деформациями русел, возникающими при строительстве и эксплуатации активных гидротехнических сооружений [21], подсчете стока наносов и в ряде других случаев. Гидроморфологический подход обычно применяют для оценки деформаций на незарегулированных реках и при строительстве пассивных сооружений [21]. Учитывая специфику этих подходов и применяемую методологию расчетов, в данном разделе приведены две лабораторные работы: одна направлена на овладение студентами основами и навыками гидроморфологического анализа, другая — в качестве примера применения гидродинамического метода. Это, в частности, обусловлено тем, что гидродинамический и гидроморфологический методы широко применяются при расчетах русловых деформаций, возникающих под воздействием различных гидротехнических сооружений.

Гидроморфологическая теория, как ее называют Н. Е. Кондратьев, И. В. Попов, Б. Ф. Снисенко, развивается в ряде научных центров страны и за рубежом [40]. На ее основе создано несколько типизаций русловых процессов (ГГИ, МГУ, Е. В. Шанцера и др.). Наиболее разработанными и научно обоснованными, по мнению автора, являются типизации ГГИ и МГУ. Однако, учи-

тывая, что типизация ГГИ включена в качестве основной в несколько ведомственных инструкций и, следовательно, более широко применяется в практических расчетах, она и принята в качестве базовой при разработке лабораторной работы.

Система уравнений, применяемая в гидродинамическом методе, незамкнута. Поэтому при применении этого метода к расчету деформаций необходимо вводить ряд допущений, которые, хотя и снижают точность расчетов, но при достаточном их научном обосновании позволяют обеспечить необходимую для практики точность расчетов.

4.2. Лабораторные работы

№ 4.1. Определение типа руслового процесса и его измерителей

Типизация ГГИ основана на предпосылке о том, что русловой процесс дискретен и развивается под влиянием значительного количества факторов, определяющими из которых являются сток воды, сток наносов и ограничивающие факторы.

Все многообразие русловых процессов подразделено на семь типов, пять из которых являются основными (ленточногрядовый, побочный, ограниченное, свободное и незавершенное меандрирование) и два дополнительными (русловая и пойменная многоруканности (рис. 4.1)).

Типизация русловых процессов имеет большое практическое значение, ибо позволяет выполнять разработку фонового прогноза русловых деформаций, увеличивая тем самым продолжительность и улучшая качество работы большинства гидротехнических сооружений.

Каждый тип руслового процесса обладает своими опознавательными признаками и различным характером деформаций, что позволяет определить его на данном участке реки либо визуально, либо на основе анализа плановых картографических или аэрофотосъемочных материалов.

Задача работы: определение типов русловых процессов на участках рек, схематические планы которых приведены на рис. 4.2—4.6, либо будут даны преподавателем, а также соответствующих им измерителей.

Исходные данные: индивидуальные задания даны в приложении 19.

Литература:

Барышников Н. Б., Попов И. В. Динамика русловых потоков и русловые процессы, гл. 3.

Кондратьев Н. Е., Попов И. В., Снисченко Б. Ф. Основы гидроморфологической теории русловых процессов.

Рекомендации по учету руслового процесса при проектировании ЛЭП, разд. 1, с. 5—22.

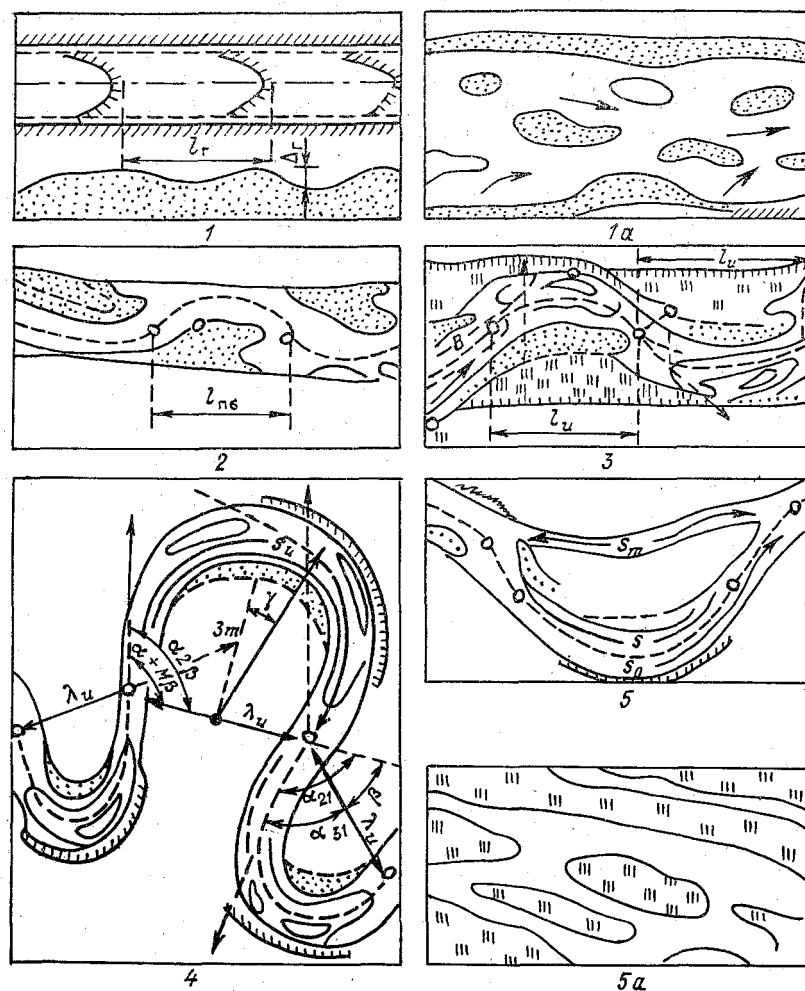
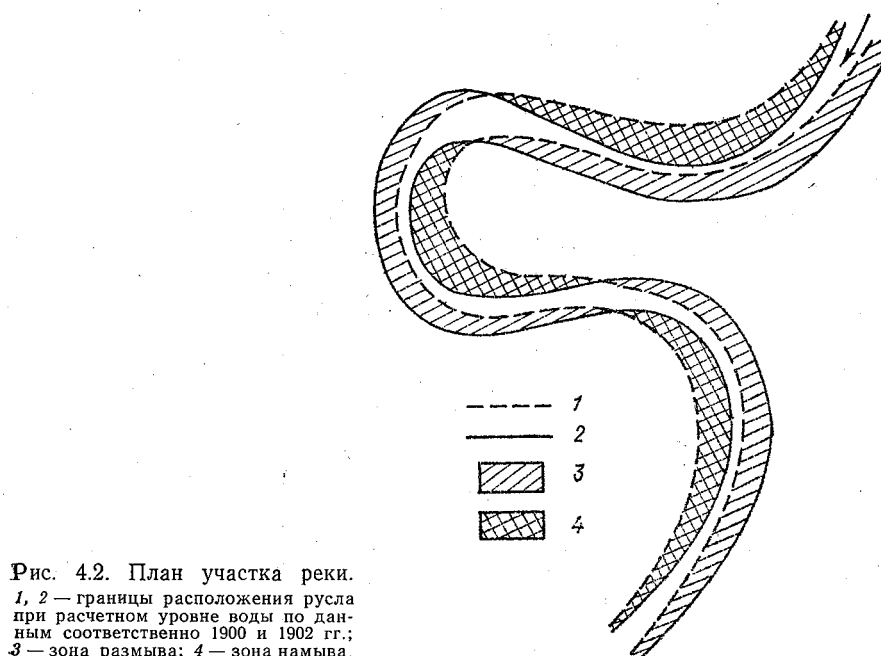


Рис. 4.1. Схематическое изображение типов руслового процесса.
 1 — ленточногрядовый тип; 1а — русловая многорукость; 2 — побочный тип;
 3 — ограниченное меандрирование; 4 — свободное меандрирование; 5 — незавер-
 шенное меандрирование; 5а — пойменная многорукость.

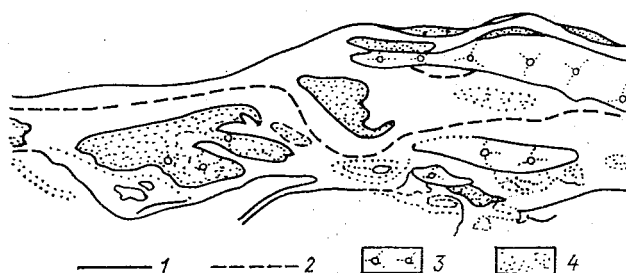
Порядок выполнения работы

1. Определить тип руслового процесса на каждом из участков рек, приведенных на рис. 4.2—4.6, или по планам, предложенным преподавателем. С этой целью необходимо визуально сравнить планы участков с типовыми, приведенными на рис. 4.1, и найти

сходные. При этом следует учитывать, что в натуральных условиях могут встречаться переходные между двумя типами формы, обладающие признаками как одного, так и другого типа. В этом слу-



чае типизация выполняется по преобладающему признаку. Например, побочный или ленточногрядовый тип руслового процесса может развиваться в отдельных протоках много рукавного русла,



т. е. на фоне русловой много рукавности. В этом случае определяющим типом является русловая много рукавность. Основные признаки типов руслового процесса приведены в приложении 17.

2. Определить параметры каждого из типов руслового процесса на исследуемых участках реки. Все параметры можно подразделить на четыре группы (приложение 18): линейные (ширина,

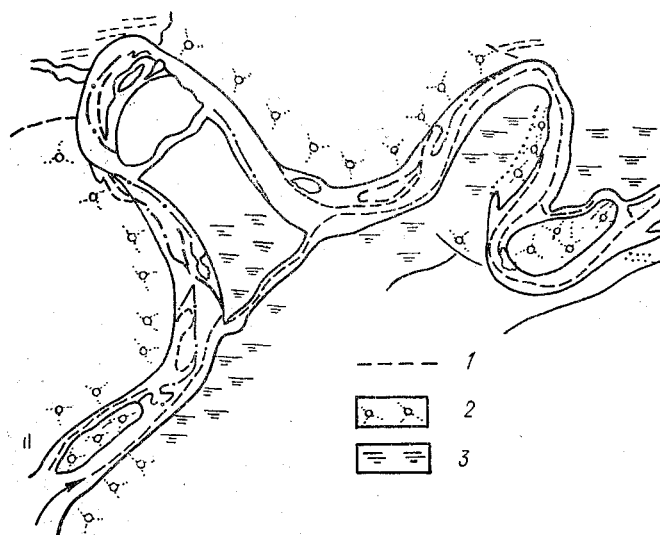


Рис. 4.4. План участка реки.
1 — линия фарватера, 2 — кустарник, 3 — болото.

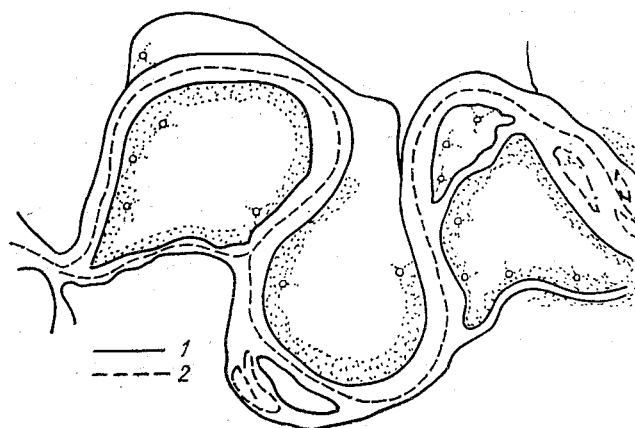


Рис. 4.5. План участка реки.
1 — границы расположения русла при расчетном уровне воды,
2 — линия фарватера.

длина и др.), площадные (площадь осередка, площадь живого сечения и пр.), угловые (углы входа, выхода, разворота и др.) и скоростные (скорость перемещения гряд, осередков, деформаций и пр.).

Линейные параметры определяются с помощью масштабной линейки. При этом погрешность измерения зависит от масштаба плана участка. Допустимая погрешность измерения Δb будет равна погрешности отсчета b , деленной на масштаб M :

$$\Delta b = b/M.$$

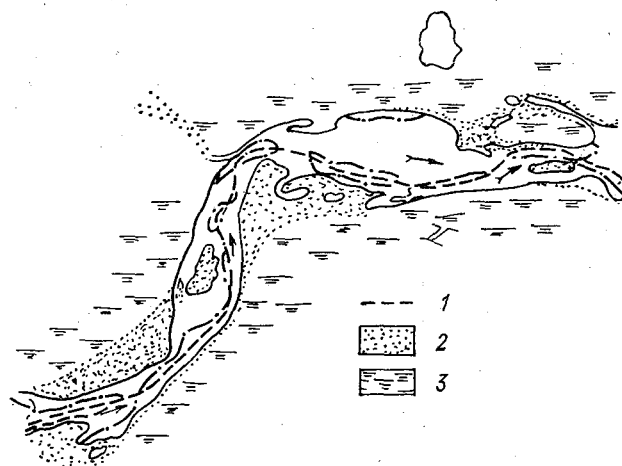


Рис. 4.6. План участка реки.
1 — линия фарватера, 2 — песок, 3 — болото.

Учитывая, что $b = \pm 0,1$ мм, или $b = 0,0001$ м, при масштабе $1 : 10\,000$, допустимая погрешность измерения составит

$$\Delta b = 1/M = 1 \text{ м.}$$

Площадные параметры определяются планиметром или с помощью палетки, а угловые по транспортиру с точностью до 1° .

Детальное описание параметров и методики их определения приведено в рекомендуемой литературе. Перечень параметров, которые необходимо определить при каждом типе руслового процесса, приведен в приложении 18.

Контрольные вопросы

1. Чем отличается типизация русловых процессов, разработанная в МГУ, от типизации ГГИ?
2. Какие типизации пойм вам известны? Их достоинства и недостатки?
3. Какие закономерности положены в основу типизации русловых процессов?
4. Для прогнозов каких русловых деформаций применяется гидроморфологическая теория русловых процессов?

5. В чем отличие типов руслового процесса при свободном, незавершенном меандрировании и пойменной многорукавности?

Отчетные документы

Отчет по работе представляет собой развернутую записку, которая составляется по следующему плану:

1. Цель и задачи работы и ее практическое значение.
 2. Обоснование принятого метода расчетов, в частности необходимо указать на преимущества и недостатки гидроморфологической теории русловых процессов ГГИ.
 3. Методика обработки исходной информации, полученные результаты и их критический анализ.
 4. Выводы
- Приложения к отчету:
1. Планы исследуемых участков рек.
 2. Таблица результатов определения морфометрических характеристик.

№ 4.2. Расчет деформаций дна методом характеристик¹

При расчетах деформаций гидродинамическим методом обычно используется система уравнений в одномерной постановке, состоящая из уравнений движения и неразрывности для жидкой и твердой фаз потока для бесприточного участка, в виде:

$$I = \frac{v^2}{C^2 h} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\alpha_K v^2}{2g} \right) + \frac{\partial (\alpha_B v)}{g \partial t} + \frac{\alpha_S \rho_1 v q'_S}{\rho g F}, \quad (4.1)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial [F(1-S)]}{\partial t} = 0; \quad (4.2)$$

$$\frac{\partial Q_S}{\partial x} + (1 - \varepsilon) \frac{\partial F}{\partial t} = 0, \quad (4.3)$$

где α_K и α_B — коэффициенты Кориолиса и Буссинеска; α_S — корректив, учитывающий неравномерность распределения местных концентраций наносов по живому сечению; q'_S — расход притока (оттока) наносов на единицу длины потока, происходящего в процессе массообмена между руслом и потоком; S — осредненная по сечению концентрация наносов. На равнинных реках она, как правило, мала и не превышает 0,015 (1,5 %), поэтому при применении уравнения к равнинным рекам концентрацией наносов обычно пренебрегают и уравнения (4.1) и (4.2) преобразуются в следующие:

$$I = \frac{v^2}{C^2 h} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\alpha_K v^2}{2g} \right) + \frac{\partial (\alpha_B v)}{g \partial t}; \quad (4.4)$$

¹ Основные положения разработаны в Ленинградском институте водного транспорта.

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial F}{\partial t} = 0. \quad (4.5)$$

Система уравнений (4.3)—(4.5) незамкнута, поэтому для ее решения необходимы либо дополнительные расчетные зависимости, как правило, получаемые на основе экспериментальных (натурных или лабораторных) данных, либо различные допущения. В предлагаемом упражнении необходимо рассчитать деформации дна на прямолинейном участке русла реки при его стеснении. При этом допускается, что берега русла закреплены, т. е. плановые деформации отсутствуют. Значения расхода и уровня воды принимаются постоянными, тем самым допускается, что деформации дна не оказывают влияния на положение уровня водной поверхности. Из системы уравнений (4.3)—(4.5) используем только уравнение деформации (4.3). В соответствии с принятым допущением уравнение (4.5) приведем к виду

$$Q = vF = \text{const}. \quad (4.6)$$

Для расчетов расходов наносов примем упрощенное уравнение, полученное К. В. Гришаниным в виде:

$$Q_s = 5 \cdot 10^{-5} v^2 Q. \quad (4.7)$$

Приняв коэффициент пористости $\varepsilon = 1/3$ и выразив время в сутках, уравнение (4.3) преобразуем к виду

$$13 \frac{Q^3}{F^3} \frac{\partial F}{\partial x} + \frac{\partial F}{\partial t} = 0. \quad (4.8)$$

Решая уравнение (4.8) методом характеристик, получаем для углового коэффициента, отражающего скорость перемещения угловых форм (м/сут), следующее выражение:

$$dx/dt = 13 (Q/F)^3. \quad (4.9)$$

Задачи работы: 1) выполнение расчета деформаций дна реки на участке стеснения русла перемычкой, 2) выполнение расчета заиления верхнего участка водохранилища.

Исходные данные: ширина B_0 и глубина h_0 русла реки в верхнем створе, расход воды Q , шаг времени k_i (1 сут), число расчетных интервалов времени; количество расчетных сечений (шесть), коэффициент сжатия на участке стеснения русла и коэффициент расширения для верховой части водохранилища (приложение 19).

Литература:

Барышников Н. Б., Попов И. В. Динамика русловых потоков и русловые процессы, п. 3.2.

Гришанин К. В., Гладков Г. Л. Динамика русловых потоков (методические указания по выполнению лабораторных работ).

Гришанин К. В. Динамика русловых потоков, гл. 8.

Порядок выполнения работы

1. Расчет деформаций дна реки на участке стеснения русла перемычкой.

а. По заданным значениям ширины нестесненного русла B_0 и коэффициента сжатия на участке стеснения русла перемычкой (см. приложение 20) определить начальные значения продольной координаты $x(i, 0)$ и ширины русла $B(i, 0)$ в шести расчетных сечениях (табл. 4.1).

ТАБЛИЦА 4.1

Изменение ширины русла на участке стеснения

Коэффициент сжатия	Определяемый параметр	Расчетные сечения					
		1	2	3	4	5	6
0,6	$x(i, 0)/B_0$	0,0	0,25	0,75	1,25	1,75	2,25
	$B(i, 0)/B_0$	1,0	0,75	0,60	0,675	0,825	1,0

По рассчитанным на основе табл. 4.1 данным строится график изменения ширины русла $B = B(x)$ по длине участка реки (рис. 4.7).

б. Для каждого расчетного сечения вычислить площади

$$F(i, 0) = B(i, 0) h_0. \quad (4.10)$$

в. Определить значения начальных средних скоростей течения в расчетных сечениях

$$v(i, 0) = Q/F(i, 0), \quad (4.11)$$

где $i = 1 \div 6$.

По (4.9) рассчитать и построить линии характеристик, т. е. зависимость $x = f(t)$ (см. рис. 4.7).

Если при этом окажется, что какие-либо смежные характеристики пересекаются, то скорость перемещения в зоне разрыва (т. е. переката с крутым низовым откосом) вычисляется по формуле

$$\left(\frac{dx}{dt} \right)_{\text{разр}} = \frac{Q_{Si} - Q_{S(i+1)}}{(1 - \varepsilon)(F_{(i+1)} - F_i)}, \quad (4.12)$$

где расходы наносов определяют по (4.7), причем для перехода к измерению времени в сутках необходимо их значения умножить на 86 400, т. е. на число секунд в сутках.

г. Для интервала времени $t_1 = k_1$, где k_1 — шаг по времени, с помощью линий характеристик находятся координаты $x(i, t)$ площадей живого сечения $F(i, t_1)$.

д. По графику $B = B(x)$ определить новые значения ширины русла, отвечающие этим координатам, а затем рассчитать средние глубины деформированного русла на момент времени t_1 , принимая при этом площадь сечения неизменной:

$$h(i, t_1) = F(i, 0)/B(i, t_1). \quad (4.13)$$

е. Аналогичные расчеты выполнить для интервала времени t_2 , но при этом значения площадей принимают уже измененными. Все результаты расчетов сводятся в табл. 4.2.

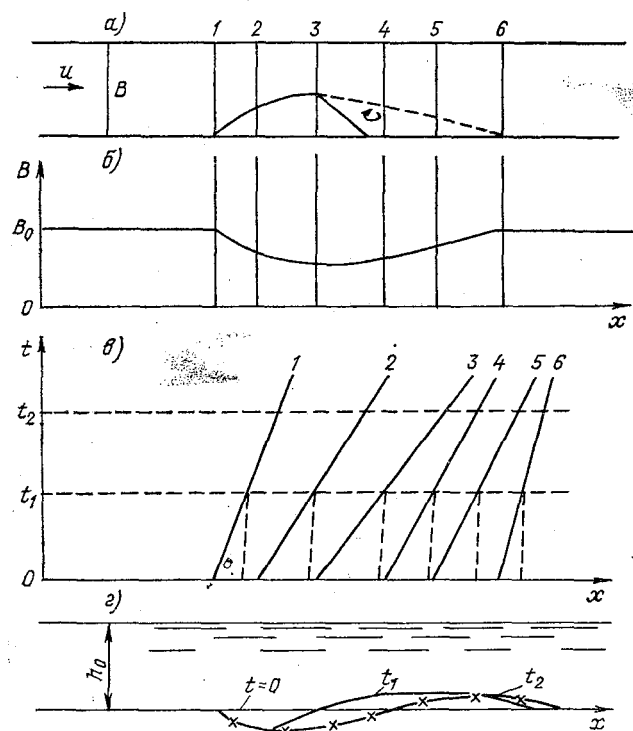


Рис. 4.7. Изображение хода и результатов расчетов по лабораторной работе № 4.2.

а — начальная ширина русла в расчетных сечениях 1–6, б — расчетная ширина русла; в — график характеристик; г — совмещенные профили дна для различных моментов времени.

ж. Построить совмещенные профили дна для моментов времени $t = 0$; $t_1 = k_1$ и $t_2 = 2k_1$

Графики, изображающие ход и результаты расчетов, оформляются аналогично рис. 4.7.

2. Расчет заиления верхового участка водохранилища.

а. По заданным значениям ширины русла B_0 в начальном створе и коэффициента расширения русла на верховом участке

ТАБЛИЦА 4.2

Результаты расчетов деформаций на участке стеснения русла перемычкой

Определяемый параметр	Расчетное сечение					
	1	2	3	4	5	6
Момент времени $t = 0$						
$F(i, 0) \text{ м}^2$						
$X(i, 0) \text{ м}$						
$B(i, 0) \text{ м}$						
$h(i, 0) = h_0 \text{ м}$						
Момент времени $t_1 = k_1$						
$X(i, t_1) \text{ м}$						
$B(i, t_1) \text{ м}$						
$h(i, t_1) \text{ м}$						
Момент времени $t_2 = 2k_1$						
$X(i, t_2) \text{ м}$						
$B(i, t_2) \text{ м}$						
$h(i, t_2) \text{ м}$						

водохранилища с учетом табл. 4.3 определить начальные значения координаты $x(i, 0)$ и ширины русла в шести расчетных сечениях.

Построить график изменения ширины русла $B = B(x)$ по длине водохранилища.

б. Для каждого расчетного сечения по (4.10) вычислить значения начальных площадей поперечных сечений.

в. Определить (по (4.11)) значения средней скорости течения в каждом из шести сечений.

По (4.9) построить линии характеристик.

г. Для $t_1 = k_1$ с помощью линий характеристики определить координаты $x(i, t_1)$ площадей живого сечения $F(i, t_1)$.

ТАБЛИЦА 4.3

Изменение ширины русла на верховом участке водохранилища

Коэффициент расширения	Определяемый параметр	Расчетные сечения					
		1	2	3	4	5	6
1,5	$x(i, 0)/B_0$	0,0	0,25	0,75	1,25	1,65	2,25
	$B(i, 0)/B_0$	1,0	1,10	1,20	1,30	1,40	1,50

д. По графику $B = B(x)$ определить новые значения ширины русла, отвечающие этим координатам, и по (4.13) рассчитать средние глубины заиленного русла на момент времени $t_1 = k_1$.

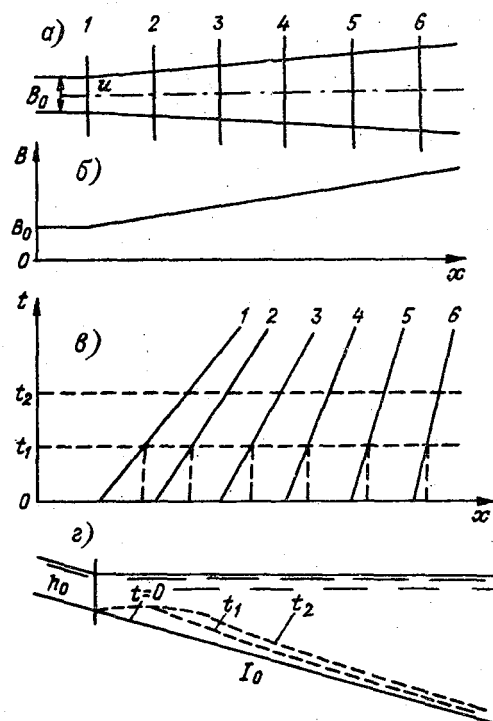


Рис. 4.8. Результаты расчетов по лабораторной работе № 4.3.

а — схема верхней части водохранилища при $t=0$; б — график изменения ширины по длине верховой части водохранилища; в — график характеристик; г — изменение глубин в водохранилище в различные расчетные моменты времени.

е. Аналогичные расчеты выполнить для момента времени $t_2 = 2k_1$. Результаты расчетов свести в таблицу (см. табл. 4.2).

ж. По результатам расчетов построить совмещенные профили дна водохранилища в моменты времени $t = 0$, $t_1 = k_1$ и $t_2 = 2k_1$. Графики, изображающие ход и результаты расчетов, оформля-

ются аналогично рис. 4.8. Все расчеты целесообразно выполнять с помощью ЭВМ.

Контрольные вопросы

1. В чем сущность гидродинамической теории русловых процессов?
2. Какие недостатки гидродинамической теории русловых процессов вам известны?
3. Какие пути решения системы уравнений гидромеханики применяются при расчетах русловых деформаций?
4. Какие законы физики положены в основу системы уравнений гидромеханики, применяемой при расчетах русловых деформаций?
5. В чем сущность первого и второго методов И. И. Леви, применяемых для решения системы уравнений гидромеханики?

Отчетные документы

Отчет по работе представляет собой развернутую записку, которая составляется по следующему плану:

1. Цель и задачи работы, ее практическое значение.
2. Обоснование принятого метода расчета, в частности, следует указать, почему для расчетов выбран именно метод характеристик.
3. Методика обработки информации, полученные результаты и их критический анализ.
4. Выводы.

Приложение к отчету составляет заполненная результатами расчетов табл. 4.2 и программа, если расчеты выполнялись на ЭВМ.

5 ВОЗДЕЙСТВИЕ ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ НА РУСЛОВЫЕ ПРОЦЕССЫ

5.1. Общие положения

Бурное развитие гидротехнического строительства и проведение комплекса агролесомелиоративных и других мероприятий в бассейнах рек оказывают интенсивное, часто необратимое, воздействие на русловые процессы. Необходимо отметить и влияние на экологическую обстановку строительства больших гидротехнических сооружений. К сожалению, очень часто именно экологические последствия не учитывались при разработке проектов таких сооружений, что приводило, да и сейчас приводит, к ряду негативных последствий, а иногда даже вызывает необходимость ликвидации таких сооружений. В частности, в зарубежной практике гидротехнического строительства известны случаи ликвидации водохранилищ ГЭС в связи с их зарастанием сине-зелеными, быстро размножающимися водорослями или их заполнения наносами уже в период строительства из-за недоучета стока последних или неправильных их расчетов. Так, многие водохранилища, построенные в США в начале века, заилились и потеряли способность регулировать сток, что явилось стимулом к изучению процессов их заиливания за рубежом и в Советском Союзе.

В последние годы при любом гидротехническом проектировании и строительстве учет русловых деформаций, обусловленный особенностями русловых процессов, является обязательным. Это привело к разработке различных многочисленных ведомственных инструкций [33, 36 и др.]. В то же время отсутствуют ГОСТы и СНиПы, обобщающие эти ведомственные инструкции. По-видимому, это обусловлено недостаточной изученностью и сложностью процессов. В частности, большое влияние на русловые процессы оказывают интенсивные работы, проводимые в бассейнах рек (мелиорация, градостроительство, агролесомероприятия и др.), но их влияние изучено еще недостаточно. Как показывают исследования последних лет, мелиорация и особенно вырубка лесов очень часто приводят к интенсивной эрозии почв и как следствие к образованию оврагов, через которые в реки выносятся огромное количество грунтов и наносов.

Известны случаи, когда после одного или серии ливневых дождей происходило интенсивное формирование оврагов, через которые в реки поступал очень большой объем твердого стока, что приводило к формированию в них баров, отмелей и других русловых образований. Их размыв осуществлялся в течение нескольких, а иногда даже и десятков лет.

Учет влияния каждого из большого многообразия гидротехнических сооружений затруднен, да в этом и нет необходимости, поэтому были созданы их типизации по характеру воздействия на русловые процессы. Несмотря на некоторые недостатки этих типизаций, они направлены на систематизацию особенностей влияния сооружений на русловые процессы, а следовательно, на совершенствование методов расчетов. В частности рассмотрим типизацию, разработанную Б. Ф. Сنيщенко [21]. Он совершенно справедливо предложил, предварительно выделив в отдельную группу комплекс агролесомелиоративных мероприятий на водосборах, разделить все гидротехнические сооружения по их влиянию на русловые процессы на две группы: активные и пассивные (табл. 5.1).

Активные сооружения по степени их воздействия на русловые процессы подразделены им также на две категории. К категории I отнесены: плотины гидроузлов, образующие регулирующие водохранилища, коренным образом изменяющие режим жидкого и твердого стока, и ограничивающие факторы; мостовые переходы, перекрывающие поймы и тем самым существенно изменяющие режимы формирования русел и движения наносов; мероприятия по отъему жидкого стока из рек в каналы при межбассейновом перераспределении воды, вызывающие коренную перестройку режима твердого стока и типа руслового процесса; мероприятия по обводнению рек при использовании их в качестве трактов переброски стока или сбросе в них воды, подаваемой по каналу. По-видимому, к этой же категории следовало бы отнести и дамбы обвалования, которые на ряде рек имеют протяженность в сотни, а иногда даже и в тысячи километров. Как отмечает Снищенко, к этой же категории могут быть отнесены и другие виды сооружений, сходные по характеру воздействия на русловой процесс, т. е. приводящие к коренному изменению определяющих его факторов (режиму жидкого и твердого стока).

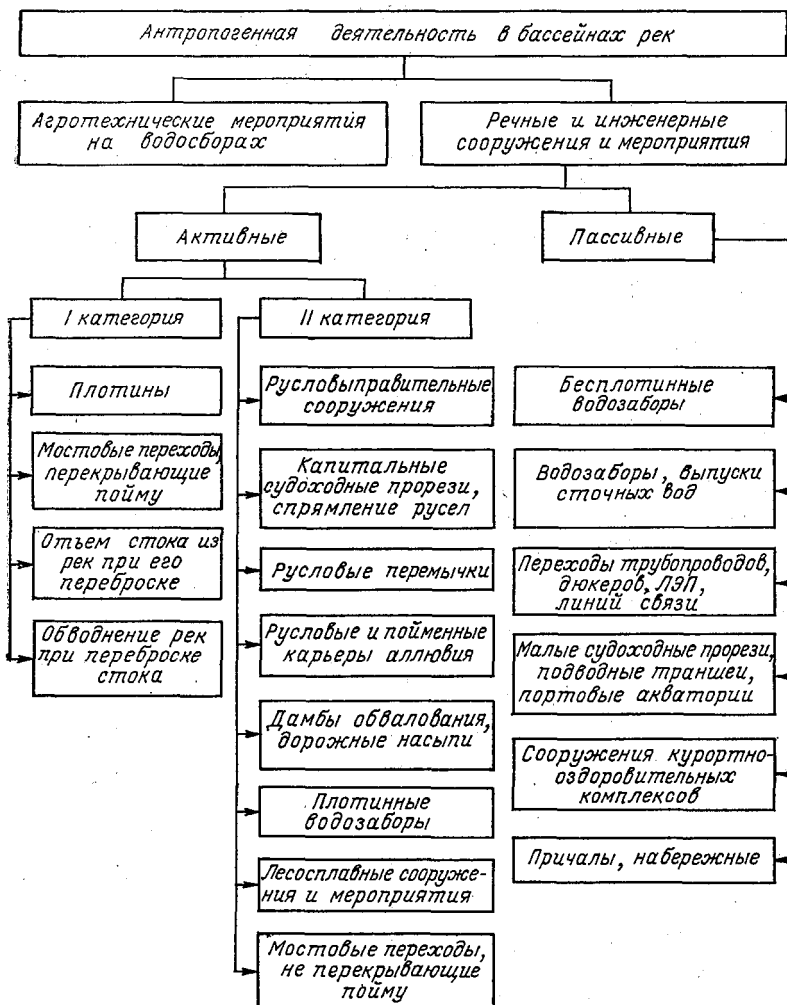
Воздействие сооружений категории II вызывает местное изменение некоторых характеристик определяющих факторов и не приводит к коренной перестройке руслового процесса. Как правило, сооружения этой категории, сами испытывая существенное влияние русловых процессов, оказывают на них лишь незначительное воздействие.

Карьеры, возводимые в руслах и поймах рек, отнесены автором (табл. 5.1) ко второй категории. Интенсивное исследование воздействия карьеров на русловые процессы началось только в последние годы, т. е. до создания рассмотренной классификации. По-видимому, большие карьеры следует отнести к первой категории активных сооружений, так как они коренным образом изменяют русловой процесс на участках большой протяженности. В то же время малые карьеры (в зависимости от их размеров) могут быть отнесены либо ко второй категории активных сооружений, либо к пассивным сооружениям.

Исходя из этой классификации, в данном пособии приведены расчетные и экспериментальные работы, посвященные исследо-

ТАБЛИЦА 5.1

**Классификация речных инженерных сооружений
(по Б. Ф. Снитченко)**



ванию воздействия на русловые процессы в основном активных сооружений I категории, а именно регулирующих водохранилищ ГЭС и мостовых переходов.

5.2. Лабораторные работы (расчетные)

№ 5.1. Расчет заиления водохранилища

При проектировании регулирующих водохранилищ одним из основных вопросов является определение времени их действия. В настоящее время ни один проект речных гидроузлов не утверждается без расчета изменения емкости водохранилища во времени за счет русловых деформаций. В соответствии с руководством «Методика измерения расходов наносов, изучения деформаций речных русел и исследования твердого стока», изданного СЭВ в 1972 г., принимается, что водохранилища, заполненные грунтами и наносами на 70—80 % своего объема, не могут считаться пригодными для нормальной эксплуатации.

Помимо этого, при оценках заиления водохранилищ выполняются следующие расчеты: а) оценка потери полезной емкости водохранилищ вследствие заиления его верхней части, б) установление границ зоны затопления в результате изменения кривой свободной поверхности при заилении, в) оценка изменения судоходных глубин в ходе заиления водохранилищ, г) установление границ зоны активизации поперечных перемещений русла, д) оценка поступления наносов к плотине, е) оценка эффективности промывок водохранилищ при сработке уровня.

Для каждого конкретного водохранилища вопросы, подлежащие решению при расчетах заиления, определяются в соответствии с его назначением, основными характеристиками (t_y и T_y) и природными условиями.

Показатель условий заиляемости

$$t_y = (W_0 - W_p)/V_s \quad (5.1)$$

представляет собой продолжительность (в годах) полного заиления водохранилища (до первоначального объема русла W_p , пропускающего сток наносов транзитом) при условии полного осаждения наносов в водохранилище; W_0 — начальный объем водохранилища при НПУ; W_n — средний за многолетний период объем притока воды в водохранилище; V_s — средний за многолетний период объем притока наносов в водохранилище; $T_y = W_0/W_n$ — показатель условной продолжительности водообмена.

Заполнение емкости водохранилищ происходит за счет осаждения в них взвешенных и донных наносов, а также за счет грунтов при обрушении берегов водохранилищ. Процесс заполнения водохранилищ взвешенными наносами называют их *заилением*, а донными наносами — их *занесением*. Обычно процесс заиления и занесения водохранилищ происходит одновременно. Однако на равнинных реках сток донных наносов мал, так как преобладающими являются взвешенные наносы, процент которых в общем стоке наносов может достигать 95—99 %. Поэтому на

равнинных реках при расчетах времени заполнения водохранилищ наносами основное внимание уделяется их заилению, а на горных реках необходимо учитывать как взвешенные, так и донные наносы.

Следует отметить отсутствие научно обоснованных критериев деления наносов на взвешенные и донные. Существующие методы, за исключением предложения В. Н. Гончарова, носят рекомендательный характер. Методика же Гончарова [7] основана на введенных им критериальных значениях средних скоростей потока, определяющих переход наносов из донногрядовой фазы их перемещения в безгрядную. Эти критерии также требуют дальнейшего экспериментального обоснования, особенно в природных условиях.

Методы расчетов заилиenia водохранилищ в первом приближении подразделяют на три группы [22]:

- 1) эмпирические, основанные на данных природных наблюдений и, как правило, применяемые для приближенных расчетов из-за ряда допущений;

- 2) балансовые, основанные на определении объемов заилиenia по разности транспортирующей способности потока в смежных расчетных створах и не учитывающие непрерывные изменения элементов потока при заилиении;

- 3) балансовые, определяющие объем заилиenia водохранилищ с учетом непрерывного изменения характеристик русла и потока по длине водохранилищ.

Не останавливаясь на анализе достоинств и недостатков этих групп методов, отметим, что наиболее точные результаты расчетов получаются при использовании методов второй и третьей групп. В то же время они наиболее трудоемкие и требуют большого объема детализированной исходной информации.

К первой группе методов относятся в основном методы зарубежных исследователей. Из отечественных методов наиболее обоснованными являются методика Г. И. Шамова, базирующаяся на обширной отечественной и зарубежной натурной информации, и методика В. С. Лапшенкова [22]. Они не лишены недостатков из-за малой физической обоснованности некоторых основных предпосылок, детальный анализ которых выполнен Лапшенковым [22]. Несмотря на это, метод Шамова не потерял своего значения до настоящего времени и включен в «Руководство по гидрологическим расчетам при проектировании водохранилищ» [36] в качестве обязательного.

Учитывая сложность расчетов и необходимость большого объема исходной натурной информации при использовании балансовых методов, в задачу работы входит только расчет заилиenia водохранилища по методу Г. И. Шамова. В то же время на усмотрение преподавателя при наличии соответствующей исходной информации крайне желательным является выполнение расчетов по одному из балансовых методов второй или третьей групп (см. ниже, п. 4).

Задача работы: расчет сроков службы водохранилища до его заиления.

Исходные данные: начальный объем проектируемого водохранилища при НПУ W_0 , длина реки на участке проектируемого водохранилища L_p , средняя площадь поперечного сечения реки F_p , средний многолетний расход Q_0 реки, впадающей в водохранилище, среднегодовая концентрация наносов в реке S , средняя плотность отложений наносов в водохранилище $\rho_{отл} = 1,2 \text{ т/м}^3$ (условно принята одинаковой для всех вариантов), площадь сечения водохранилища в приплотинном створе F_v . Индивидуальные задания приведены в приложении 21.

Литература:

Барышников Н. Б., Попов И. В. Динамика русловых потоков и русловые процессы, п. 4.3.

Лапшенков В. С. Прогнозирование русловых деформаций в бьефах речных гидроузлов, гл. 2.

Руководство по гидрологическим расчетам при проектировании водохранилищ, гл. 6 и приложение 11.

Порядок выполнения работы

1. Вычислить по формуле (5.1) показатель условной заиляемости t_y , принимая при этом

$$V_s = QS/\rho_{отл},$$

$$t_y = (W_0 - W_p)/V_s$$

$$W_p = L_p F_p. \quad (5.2)$$

2. Определить продолжительность первой стадии заиления водохранилища t_{y1} в годах, в течение которой практически все наносы, поступающие из реки, осаждаются в водохранилище:

$$t_{y1} = (W_0 - 8,33W_p)/V_s. \quad (5.3)$$

3. Откорректировать продолжительность первой стадии заиления исходя из условия, что $S_1 = 0,1 S$. Для этого необходимо выполнить расчет концентрации наносов в конечном створе водохранилища по формуле

$$S_k = \alpha E v^2 \Gamma / h_{ср}, \quad (5.4)$$

где $\alpha = S/S_{выч}$ — корректирующий коэффициент; $S_{выч}$ — вычисленная концентрация наносов при $\alpha = 1$; Γ — гидромеханический параметр, определяемый по данным о гранулометрическом составе наносов; $E = f(C)$ — параметр, зависящий от коэффициента Шези C и определяемый по графику (рис. 5.1) или по следующим данным:

C	0	25	37	50	62,5	75	82	100
$E \cdot 10^{-3}$. . .	0	4	11	15	22,5	26,8	32,1	35,7

Учитывая, что для расчетов параметров кривой $W_i/W_0 = f(S_i/S)$ необходим большой объем исходной информации, в первом приближении вместо расчетной кривой используется

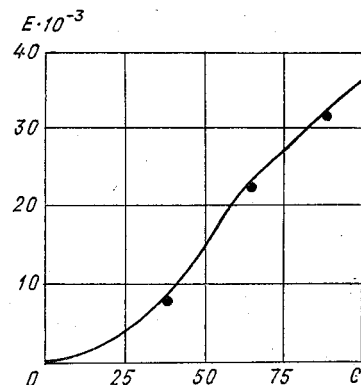


Рис. 5.1. Зависимость $E=f(C)$.

зависимость, приведенная на рис. 5.2. В табл. 5.2 в качестве примера приведен расчет координат зависимости $W_i/W_0 = f(S_i/S)$.

По рис. 5.2 определить значение W_i/W_0 , соответствующее $S_i/S = 0,1$, а затем и W_i .

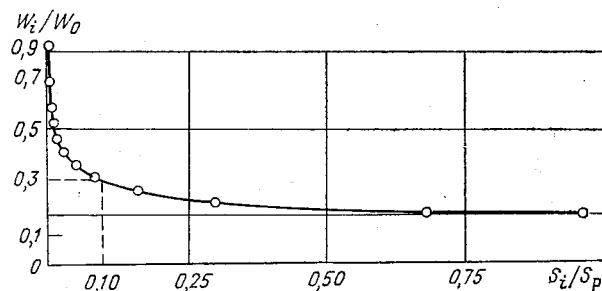


Рис. 5.2. Изменение относительного значения концентрации наносов S_i/S_p в зависимости от изменения относительного объема водохранилища W_i/W_0 , т. е. $S_i/S_p = f(W_i/W_0)$.

Определить откорректированную продолжительность первой стадии заиления водохранилища

$$t_{y1к} = W_i/v_s. \quad (5.5)$$

4. Рассчитать аккумуляцию наносов в водохранилище по методике Шамова

$$W_t = W_{пред} [1 - (1 - W_1/W_{пред})]^t, \quad (5.6)$$

где W_t — объем наносов, отложившихся за t лет, м³; W_1 — объем отложений наносов за последний год первой стадии заиления или

ТАБЛИЦА 5.2

Пример расчета мутности в конечном створе водохранилища по формуле (5.4)

Исходные данные: профиль поперечного сечения в конечном створе до заиливания; $Q_p = 550 \text{ м}^3/\text{с}$; $S_p = 2,1 \cdot 10^3 \text{ г/м}^3$; средняя крупность взвешенных наносов $k_{\text{взв}} = 0,08 \text{ мм}$; $\phi_{\text{взв}} = 0,0068 \text{ м/с}$; средняя крупность отложившихся наносов $k_{\text{отл}} = 1,78 \text{ мм}$; коэффициент шероховатости $n = 0,03$; $k'_{\text{отл}} = 0,033$

Уровень воды у плотины, м усл.	Площадь сечения $F \text{ м}^2$	Средняя глубина сечения $h \text{ м}$	Средняя скорость течения $v \text{ м/с}$	$\frac{v^2}{h}$	$G = \frac{\omega}{v}$	$C = h^{1/6}/n$	$E = f(C)$	$\Gamma = \frac{C}{\phi}$	$S \text{ г/м}^3$	S/S_p	$W_i/W_0 = \frac{F_i/F_0}{W_i/W_0}$
Входной створ (начальный) при $\alpha = 1$											
540	540	2,0	1,02	0,52	0,0067	33,6	6600	0,590	2025	0,96	
Приполюнный (конечный) створ при $\alpha = 1,04$											
110	3600	8,6	0,15	0,0026	0,045	42,9	11 000	0,032	0,85	0,0005	1,0
109	3186	7,8	0,17	0,0037	0,040	42,3	10 600	0,044	1,70	0,0008	0,88
108	2784	7,0	0,20	0,0057	0,034	41,4	10 200	0,064	3,50	0,0017	0,78
107	2394	6,2	0,23	0,0085	0,030	40,8	9 800	0,080	6,40	0,0030	0,66
106	2016	5,4	0,27	0,0135	0,025	39,6	9 200	0,125	15,0	0,007	0,56
105,5	1832	5,0	0,30	0,0180	0,023	39,3	9 100	0,146	23,0	0,010	0,51
105	1650	4,6	0,33	0,0237	0,021	38,7	8 900	0,171	36,0	0,017	0,46
104,5	1472	4,2	0,37	0,0326	0,018	38,1	8 600	0,212	57,0	0,027	0,41
104	1296	3,7	0,42	0,0477	0,016	37,2	8 200	0,263	99,0	0,047	0,36
103,5	1194	3,3	0,48	0,0698	0,014	36,6	7 800	0,314	165	0,078	0,31
103	954	2,8	0,58	0,120	0,012	36,0	7 600	0,374	330	0,16	0,26
102,5	788	2,4	0,70	0,204	0,0097	34,8	7 100	0,457	640	0,30	0,22
102	624	1,9	0,88	0,408	0,0077	33,3	6 500	0,555	1420	0,68	0,17
101,8	559	1,74	0,98	0,533	0,0069	33,0	6 400	0,594	2026	0,96	0,16

Примечания: 1. Значения E сняты с рис. 5.1.

2. Поправочный коэффициент $\alpha = 1,04$ вычислен по данным измерений во входном створе.

за первый год эксплуатации водохранилища (если заиление происходит с самого начала по схеме второй стадии), м^3 ; $W_1 = \alpha' SQ / \rho_{\text{отл}}$, где α' — размерный коэффициент; $G = \omega / v$ и v — средняя скорость потока.

Время t в годах определяется с начала второй стадии заиления. Предельный объем отложений наносов $W_{\text{пред}}$, при достижении которого заиление прекращается, определяется также для второй стадии заиления

$$W_{\text{пред}} = W_2 - W_p, \quad (5.7)$$

где W_2 — начальный объем водохранилища во второй стадии заиления при НПУ, равный свободному от заиления объему во-

ТАБЛИЦА 5.3

Расчет аккумуляции наносов в водохранилище по формуле Г. И. Шамова

Вторая стадия заиления				Полный объем заиления $W_1 + W_t$	Годы от на- чала заиления $t_1 + t_i$
Годы (отсчет от t_1)	$(1 - W/W_{\text{пред}})^t$	$1 - (1 - W_1/W_{\text{пред}})^t$	W_t		

дохранилища в конце первой стадии заиления, м^3 ; W_p — объем русла, определяемый по формуле (5.2). Все расчеты свести в табл. 5.3.

5. Построить кривую $W_t/W_0 = f(t)$.

Контрольные вопросы

1. Как происходит процесс заиления водохранилища взвешенными наносами на равнинных реках?
2. Как происходит процесс занесения водохранилища донными наносами на горных реках?
3. Какие методы расчетов занесения водохранилищ донными наносами вам известны? В чем их достоинства и недостатки?
4. Какие негативные экологические последствия может вызвать строительство водохранилищ на равнинных реках?
5. Почему выгоднее строить водохранилища на горных реках, чем на равнинных?
6. В чем недостатки промывок наносов в водохранилищах?

Отчетные документы

Отчет по работе представляет краткую записку, которая составляется по следующему плану:

1. Цель и задачи работы, ее практическое значение.
 2. Обоснование принятой методики обработки исходной информации, полученные результаты и их критический анализ.
 3. Выводы.
 4. Ответы на контрольные вопросы.
- Приложения к отчету:
1. Таблицы, в которых приведены результаты расчетов.
 2. Графические зависимости.
 3. Программы, если расчеты выполнялись с помощью ЭВМ.

№ 5.2. Расчет основных параметров местного размыва за плотиной ГЭС

В нижние бьефы ГЭС обычно сбрасывается осветленный поток, обладающий значительными скоростями, существенно превышающими их критические значения. Поэтому сразу же за плотиной он начинает размывать русло реки и формировать воронку размыва. Чтобы обеспечить устойчивость плотины и предотвратить ее сдвиг или опрокидывание из-за резкого увеличения глубин в непосредственной близости от сооружения, обычно сооружают рисберму, устраивая на ней различного типа гасители. Их задачей является гашение скоростей потоков до значений, которые наблюдались на реках до строительства плотины ГЭС. Однако и в этом случае скорости потока будут превышать критические размывающие, что совместно с отсутствием поступления наносов из верхнего бьефа приводит к интенсивным размывам русла и формированию воронки размыва. Этот процесс называется *местным размывом*. Он будет продолжаться до тех пор, пока глубины размыва не достигнут критических значений, при которых скорости потока станут равными или меньшими критических несдвигающих скоростей. В этом случае воронка размыва стабилизируется и увеличение глубин прекращается. Однако поток будет продолжать размыв русла реки, но уже ниже по течению воронки местного размыва, что приводит к просадкам уровней и как следствие к увеличению уклонов водной поверхности. Это в свою очередь приведет к увеличению скоростей потока и соответственно к увеличению глубин в воронке размыва. Такой процесс, естественно, не может продолжаться бесконечно, так как имеется ряд факторов, которые препятствуют дальнейшему размыву, т. е. увеличению глубин и падению уровней. К этим факторам относятся: достижение базиса эрозии, выносы крупных фракций наносов притоками, обрушение берегов из-за их подмыва, выходы скальных пород и т. д. [3].

Итак, причинами размывов в нижних бьефах водосбросных сооружений являются: увеличение размывающей способности потока вследствие неполного гашения его избыточной энергии в пределах крепления водосбросных сооружений, сброса в нижний бьеф освобожденного от наносов (так называемого освет-

ленного) потока и концентрации расходов воды на более узком участке по сравнению с бытовыми условиями.

Как известно, русла рек в нижних бьефах гидроузлов могут быть сложены скальными, связными или несвязными грунтами. Методы расчетов параметров воронки местного размыва для каждого из этих грунтов имеют существенные отличия и различную степень разработанности.

Задача работы: расчет основных параметров воронки размыва (наибольшей глубины размыва около рисбермы, длины воронки размыва и др.), образующейся в несвязных грунтах.

Исходные данные: удельный расход воды q , глубина потока в конце рисбермы h_2 , средняя крупность частиц k , отношение $k_5/k = 2,0$. Исходные данные приведены в приложении 22.

Литература:

Барышников Н. Б., Попов И. В. Динамика русловых потоков и русловые процессы, п. 4.5.

Рекомендации по расчету местных размывов русел, сложенных из нескальных грунтов за креплениями средненапорных водосливных плотин.

Порядок выполнения работы

1. Определить максимальную глубину потока в воронке размыва (рис. 5.3) по формуле

$$h_p = k_2 q / v_n, \quad (5.8)$$

где k_2 — коэффициент, учитывающий увеличение размывающей способности потока за счет повышения турбулентности, возникающей при сопряжении бьефов; v_n — средняя критическая неразмывающая скорость потока.

Определить критическую скорость по формулам (3.1) и (3.12). При расчетах v_n по (3.12) в соответствии с рекомендациями в лабораторной работе № 3.1, параметр n' определяется по графикам, приведенным на рис. 3.1, или по приближенной формуле

$$n' = 1 + \frac{1}{0,3 + [v^2 / (gk)^3]^{1/3}}, \quad (5.9)$$

где ν — кинематическая вязкость, определяется по гидравлическим справочникам при $t = 15^\circ\text{C}$; параметр $m \approx 1$; $C_{yn}^H = 8\rho\nu(g\nu)^{1/3}/k$ (при $k > 0,20$ мм, $C_{yn}^H = 1$); k_1 — коэффициент однородности наносов, изменяющийся от 0,05 до 0,75. В расчетах рекомендуется принимать равным 0,50.

Коэффициент k_2 при числах Фруда в конце рисбермы, изменяющихся от 0,05 до 0,2, рекомендуется определять по формуле [32]

$$k_2 = 0,87 + 3,25\text{Fr} + 0,3M, \quad (5.10)$$

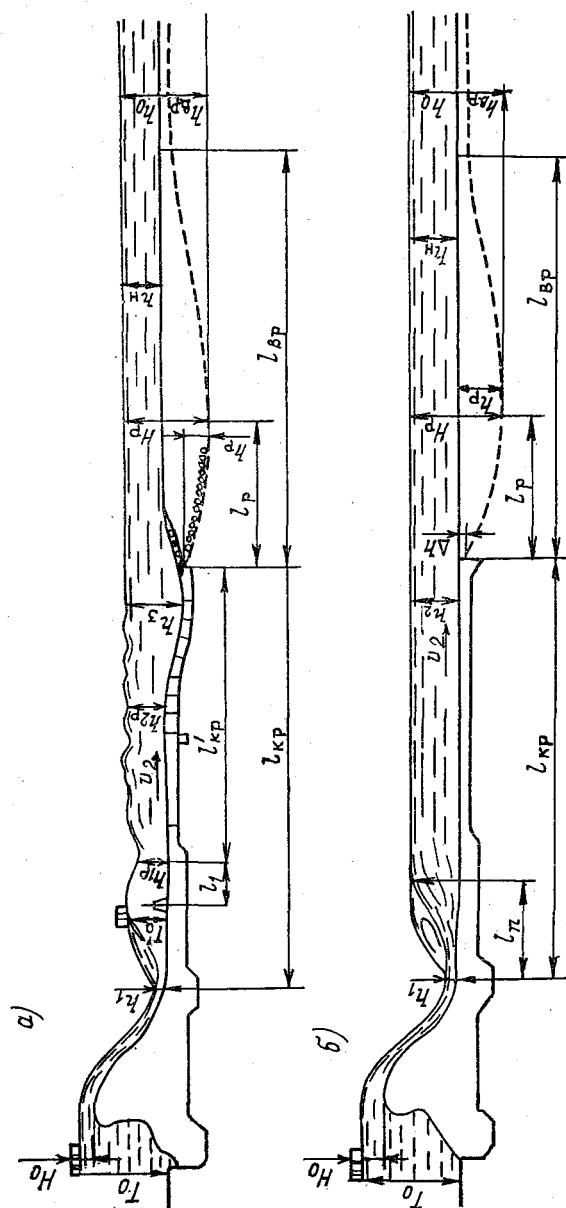


Рис. 5.3. Схема местного размыва.
 а — при наличии концевой крепи в виде ковша; б — при наличии зуба.

где $Fr = v^2/(gh_p)$; $M = u'_{\max}/v$ — параметр турбулентности в конце рисбермы или в ковше; зависит от типа рисбермы, наличия и типов гасителей на ней и других факторов. Методика его расчета приведена в [33].

Для приближенных расчетов в зависимости от типа рисбермы значение k_2 рекомендуется принимать равным 1,1—1,2. Поскольку $k_2 = 1,2$ приводит к некоторому запасу глубин, оно и рекомендовано для расчетов.

Необходимо учитывать, что для разнозернистых грунтов расчетное значение наибольшей глубины размыва будет несколько завышено из-за недоучета отмостки дна, существенно повышающей значение критической скорости. Для расчетов критических скоростей при наличии отмостки рекомендуются специальные формулы или методы расчетов [3, 25, 33]. В качестве примера можно привести формулу, разработанную в подразделениях Минводхоза:

$$v_n = \left(\frac{h}{0,7k_5} \right)^2 \sqrt{\frac{2mg}{0,4n'} \frac{(\rho_1 - \rho) k_{отм}}{\rho}}, \quad (5.11)$$

где

$$k_{отм} = k + \frac{h(1 - k_0)(1 - p_0)}{1 - h(0,95 - p_0)/k_5}; \quad (5.12)$$

p_0 — координата кривой гранулометрического состава наносов, соответствующая среднему значению их крупности; k_0 — коэффициент однородности исходного грунта.

2. Рассчитать глубину размыва Δh непосредственно около жесткой рисбермы (см. рис. 5.3) в случае неукрепленного песчано-гравелистого грунта при изменении числа Фруда в этом сечении в пределах $Fr = 0,05 \div 0,2$ по формуле

$$\Delta h = h_0 \left[\frac{0,4h_k}{h_2} (1 + M) - 0,1 \right], \quad (5.13)$$

где $h_0 = q/v_n$ — глубина, соответствующая неразмывающей скорости v_n ; $h_k = \sqrt[3]{\alpha_k q/g}$ — критическая глубина; α_k — коэффициент Кориолиса, который принимается равным 1,1; M — параметр турбулентности в конце рисбермы, рассчитывается в соответствии с рекомендациями [33]. В случае отсутствия каких-либо исходных данных для ориентировочных расчетов принять $M = 0,5$.

3. Определить расстояние l_p от конца жесткой рисбермы до створа с максимальной глубиной в воронке размыва.

Значение l_p (см. рис. 5.3) рекомендуется определять с помощью табл. 5.4 в зависимости от параметра $u'_{\max}/v$ и максимальной глубины размыва h_p . Здесь $v_k = q/h_k = \sqrt{gq^2/\alpha_k}$; $u'_{\max}$ — максимальная пульсационная скорость в конце крепления.

При длине крепления $l_{кр} > 25 h_2$ (за расчетную глубину h_2 принимается глубина, соответствующая расчетному расходу

воды). Значение l_p и общая длина воронки размыва l_v могут быть приняты:

$$l_p \approx 3,5h_p, \quad (5.14)$$

$$l_{vp} \approx (9 - 10)h_p. \quad (5.15)$$

ТАБЛИЦА 5.4

Сведения о максимальной пульсации скоростей и относительных расстояниях l_p/h_p от конца рисбермы до створа максимального размыва

$u'_{\max}/v_k \dots \dots \dots$	0,05	0,1	0,15	0,2	0,3—0,8
$l_p/h_p \dots \dots \dots$	5,5	5,0	4,5	3,8	3,5

4. Определить длину участка l_n нижнего бьефа (от конца крепления), на котором происходит затухание турбулентности потока, до уровня, соответствующего равномерному потоку:

$$l_n \approx 20h_p. \quad (5.16)$$

Контрольные вопросы

1. С какой целью ниже плотины ГЭС строится рисберма?
2. Вследствие каких причин возникает местный размыв русла реки ниже сооружения?
3. От чего зависят размеры водоворота в воронке размыва?
4. Какую опасность для сооружения представляет местный размыв?
5. Каковы особенности местного размыва русла при связных грунтах?
6. Каковы особенности местного размыва в скальных грунтах?
7. Когда местный размыв прекращается?

Отчетные документы

Отчет по работе аналогичен отчету по работе № 5.1.

№ 5.3. Деформации русла в нижних бьефах ГЭС

Как указывалось в лабораторной работе № 5.2, после стабилизации воронки размыва поток транзитом проходит над ней, практически не получая наносов. В то же время скорости его движения больше критических, следовательно, он обладает способностью транспортировать наносы. Таким образом, имеются два основных фактора, предопределяющих размыв русла, т. е. $v > v_k$ и $G > Q_s$. Это приводит к размыву на участке большой протяженности, длина которого в нижних бьефах крупных ГЭС может достигать нескольких сотен километров [3, 5].

Глубина размыва русла зависит от скорости потока, его глубины, крупности и состава наносов и других факторов, т. е.

$$h_p = f(v, k, h, k_i/k, \dots). \quad (5.17)$$

При расчетах обычно используют гидродинамический метод, но иногда и гидроморфологический. Гидродинамический метод основан на системе уравнений одномерной гидравлики для двухфазного потока без бокового притока, состоящей из уравнений: — движения

$$I = \frac{\alpha_B}{g} \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\alpha_K v^2}{2g} + z + h \right) + \frac{\alpha_S \rho_1 v q_S}{\rho g F}, \quad (5.18)$$

— неразрывности жидкой фазы потока

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial [F(1-S)]}{\partial t} = 0, \quad (5.19)$$

— неразрывности твердой фазы потока

$$\frac{\partial Q_S}{\partial x} + \frac{\partial (FS)}{\partial t} = q_S, \quad (5.20)$$

— деформации русла

$$q_S = \frac{\rho_{гр}}{\rho_1} \left(-B \frac{\partial z}{\partial t} + h_{6p} \frac{\partial B}{\partial t} \right), \quad (5.21)$$

где α_K , α_B и α_S — коэффициенты соответственно Кориолиса, Буссинеска и учитывающий неравномерность распределения наносов по живому сечению потока; $\rho_{гр}$, ρ_1 и ρ — плотности соответственно грунта, слагающего русло, наносов и воды; S — средняя по сечению концентрация наносов; q_S — расход притока или оттока наносов, приходящийся на единицу длины потока при массообмене между потоком и руслом при русловых переформированиях; z — отметка дна; h_{6p} — средняя глубина русла при уровне затопления его бровки.

Эта система уравнений незамкнута, так как число неизвестных в ней превышает число уравнений, поэтому для ее решения делаются допущения, детальный анализ которых приведен в [5].

В то же время обязательным при применении любого метода является назначение граничных условий, в качестве которых в створе гидроузлов ($x = 0$) в начальный момент времени ($t = 0$) необходимо задать гидравлические и геометрические характеристики потока и русла.

Сложность задачи и необходимость допущений для ее решения привели к разработке большого количества методов, к сожалению, иногда дающих результаты, существенно отличные от натурных данных. Учитывая, что детальный анализ как гидродинамических, так и гидроморфологических методов выполнен

в [5], а также в учебном пособии [3], в данном пособии он не приводится.

В большинстве случаев русловые потоки рассматривают как медленно изменяющиеся, и при расчетах русловых деформаций их представляют в виде квазистационарных течений на каждом временном шаге продолжительностью Δt . При этих допущениях

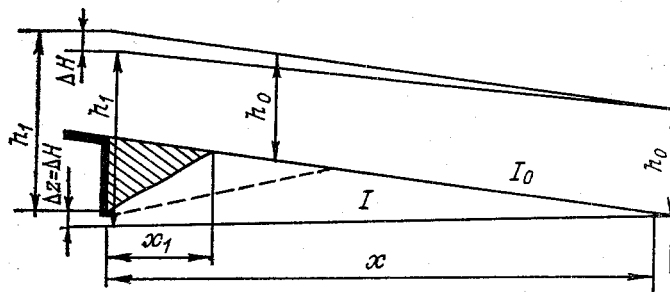


Рис. 5.4. Схема к расчету общего размыва приближенным методом.

система уравнений (5.18) — (5.21) значительно упрощается и представляется в виде уравнений:

— движения (уравнение Бернулли)

$$\sqrt{\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\alpha_K v^2}{2g} + z + h \right)} = I, \quad (5.22)$$

— неразрывности жидкой фазы потока

$$Q = \text{const}, \quad (5.23)$$

— баланса массы наносов и деформации русла

$$\frac{\rho_1}{\rho_{\text{гр}}} \frac{\partial Q_S}{\partial x} = -B \frac{\partial z}{\partial t} + h_{\text{бр}} \frac{\partial B}{\partial t}. \quad (5.24)$$

Расчет общего размыва при ограниченной исходной информации о морфометрии русла, составе наносов и твердом стоке и вызванное им понижение уровня можно оценить по приближенному методу И. И. Леви. В основу расчета по этому методу (рис. 5.4) положено уравнение баланса наносов в виде

$$\rho_{\text{гр}} \Delta W / \rho_1 = G \Delta t, \quad (5.25)$$

где ΔW — объем размываемого грунта за время Δt ; G — транспортирующая способность потока за пределами зоны общего размыва, где движение предполагается равномерным, а насыщение потока наносами — соответствующим транспортирующей способности.

Русло схематизируется в виде призматического канала шириной B , назначаемой по картографическим материалам. Уклон дна

I_0 определяется из условий равенства нормальной глубины потока h_0 ниже участка размыва средней глубине при руслоформирующем расходе. Последний часто принимают равным максимальному расходу воды, при котором поток проходит в бровках меженного русла, т. е. близким к $Q_{\max}$ 50 %-ной обеспеченности [2].

Объем размыва за время Δt , отсчитываемое с момента начала эксплуатации гидроузла, до створа, удаленного от гидроузла на расстояние x (см. рис. 5.4), определяется по уравнению

$$\Delta W = \frac{B}{2} [(h_1 - h_0)(x - x_1) + \Delta H x], \quad (5.26)$$

где $h_1 = Q_{\text{рф}}/Bv_n$ — глубина, соответствующая неразмывающей скорости потока v_n ; x_1 — длина участка местного размыва, при отсутствии точных данных принимается равной 200—500 м; ΔH — понижение уровня в створе гидроузла.

Задача работы: расчет объема размыва русла в нижнем бьефе крупной ГЭС приближенным методом И. И. Леви (при условии квазистационарного течения), т. е. по уравнениям (5.22) — (5.26). Расчет по второму методу И. И. Леви выполняется в порядке НИРС по указанию преподавателя.

Исходные данные: руслоформирующий расход воды $Q_{\text{рф}}$, ширина призматического русла B , шероховатость русла n , продолжительность расчетного паводка t , первоначальный уклон дна I_0 , крупность наносов k (русло принимается сложным равнозернистыми грунтами), плотность наносов $\rho_1 = 2,65 \text{ т/м}^3$, грунта $\rho_{\text{гр}} = 1,6 \text{ т/м}^3$, воды $\rho = 1,0 \text{ т/м}^3$, длина зоны местного размыва $x_1 = 500 \text{ м}$, температура воды 5°C , кинематическая вязкость $\nu = 1,52 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$. Варианты индивидуальных заданий приведены в приложении 23.

Л и т е р а т у р а:

Барышников Н. Б., Попов И. В. Динамика русловых потоков и русловые процессы, п. 4.5.

Векслер А. Б., Доненберг В. М. Переформирование русел в нижних бьефах крупных гидроэлектростанций, гл. 4.

Рекомендации по расчету трансформации русел в нижних бьефах гидроузлов.

Порядок выполнения работы

1. Определить глубину потока в бытовых условиях, используя для этого формулу Шези—Маннинга:

$$Q_{\text{рф}} = \frac{1}{n} B h_0^{5/3} I_0^{-1/2},$$

$$h_0 = \left(\frac{Q_{\text{рф}} n}{B \sqrt{I_0}} \right)^{0,6}. \quad (5.27)$$

2. Определить среднюю скорость потока v .
3. Вычислить среднюю глубину размыва в створе гидроузла и неразмывающую среднюю скорость потока, используя для этого формулу (3.12) или (3.1):

$$h_1 = Q_{\text{рф}} / v_n B. \quad (5.28)$$

4. С помощью критерия $\frac{\omega}{v} \frac{C}{\sqrt{2g}}$ определить форму движения наносов. Для этого по табл. 5.5 определить значение гидравлической крупности.

ТАБЛИЦА 5.5

Гидравлическая крупность частиц наносов ω (м/с)

Крупность частиц k мм	Температура воды °С			
	5	10	15	20
0,150	0,011	0,0122	0,0133	0,0143
0,173	0,0130	0,0152	0,0166	0,0178
0,20	0,0168	0,0184	0,0199	0,0213
0,25	0,0228	0,0248	0,0267	0,0285
0,30	0,0292	0,0315	0,0337	0,0360
0,35	0,0354	0,0381	0,0408	0,0433
0,40	0,0419	0,0452	0,0480	0,0507
0,50	0,0547	0,0584	0,0617	0,0646
0,60	0,0671	0,0708	0,0743	0,0775
0,70	0,0786	0,0822	0,0857	0,0890
0,80	0,0842	0,0940	0,0977	0,1007
0,90	0,0999	0,1038	0,1073	0,1102
1,00	0,1090	0,1129	0,1167	0,1196
1,2	0,127	0,130	0,133	0,136
1,4	0,143	0,146	0,149	0,151
1,6	0,158	0,160	0,163	0,165
1,8	0,170	0,173	0,176	0,178
2,0	0,183	0,185	0,187	0,189
2,2	0,194	0,197	0,199	0,199
2,5	0,211	0,212	0,212	0,212

При этом необходимо учитывать следующие граничные условия [33]:

— при $\frac{\omega}{v} \frac{C}{\sqrt{2g}} > 3,3$ наносы перемещаются влечением по дну;

— при $\frac{\omega}{v} \frac{C}{\sqrt{2g}} < 1,1$ наносы перемещаются во взвешенном состоянии;

— в интервале $1,1 \leq \frac{\omega}{v} \frac{C}{\sqrt{2g}} \leq 3,3$ происходит совместное движение влекаемых и взвешенных наносов.

5. Определить расход наносов Q_s (м³/с), принимая его равным транспортирующей способности потока G , т. е. $Q_s = G$, исполь-

зую для этого формулу К. И. Россинского или В. Н. Гончарова в виде:

$$G = \frac{1 + \varphi}{2200} v_n k (v/v_n)^{4,33} B, \quad (5.29)$$

где φ — параметр турбулентности; определяется по табл. 5.6.

ТАБЛИЦА 5.6

Значения параметра турбулентности поведения наносов φ

k мм	Температура воды °С			
	5	10	15	20
0,06	21	18,2	15,8	14,0
0,1	9,75	8,40	7,3	6,5
0,2	3,95	3,55	3,25	3,0
0,4	2,27	2,18	2,09	2,0
0,6	1,76	1,71	1,67	1,63
0,8	1,48	1,44	1,42	1,40
1,0	1,29	1,28	1,25	1,24
1,2	1,18	1,16	1,15	1,13
1,4	1,04	1,03	1,02	1,04
1,5	1,00	1,00	1,00	1,00

6. Определить понижение уровня воды в размытом русле, используя для этого метод В. И. Чарномского [5, 34]:

$$x(I - I_f) = \mathcal{E}_2 - \mathcal{E}_1, \quad (5.30)$$

где

$$\mathcal{E}_1 = h_1 + \frac{\alpha_K Q^2}{2gB^2h_1}; \quad \mathcal{E}_2 = h + \frac{\alpha_K Q^2}{2gB^2h}, \quad (5.31)$$

$\mathcal{E}_1, \mathcal{E}_2$ — удельная энергия сечения соответственно в створе гидроузла и в створе, совпадающем с концом участка размыва, длина которого изменяется в процессе расчета (табл. 5.7);

I — уклон дна на участке размыва

$$I = I_0 - (h_1 - h + \Delta H)/x, \quad (5.32)$$

I_f — уклон трения;

$$I_f = \frac{Q^2 n^2}{B^2 h_{cp}^{10/3}}, \quad (5.33)$$

h_{cp} — средняя глубина на участке размыва

$$h_{cp} = \frac{h_1 + h}{2}.$$

Задаваясь различными значениями x , из уравнения (5.31) определить значения ΔH .

7. По зависимости (5.26) или

$$\Delta W = 0,5B [(h_1 - h_0 + \Delta H)x - (h_1 - h_0)x_1] \quad (5.34)$$

рассчитать объемы размывов, соответствующие различным значениям x (табл. 5.7).

ТАБЛИЦА 5.7

Результаты расчетов

x м	ΔH м	ΔW м ³	t годы
1 000			
2 000			
3 000			
5 000			
7 500			
10 000			
15 000			
20 000			
25 000			
30 000			

8. Определить время размыва

$$t = \rho_{\text{гр}} \Delta W / (\rho_1 G), \quad (5.35)$$

соответствующее различным значениям объемов размыва.

Результаты расчетов свести в табл. 5.7.

Контрольные вопросы

1. Что является причинами общего размыва русла в нижнем бьефе гидроузлов?
2. Какие причины замедляют и какие прекращают общий размыв русла в нижнем бьефе гидроузлов?
3. Как работа гидроузла влияет на ледовый режим реки в нижнем бьефе?
4. В каких случаях применяются приближенные методы расчетов русловых деформаций в нижних бьефах ГЭС?
5. Назовите основные допущения, принимаемые при решении системы уравнений (5.18) — (5.21).

Отчетные документы

Отчет по работе аналогичен отчету по работе № 5.1. Однако необходимо обратить особое внимание на большое количество методик расчета и выполнить анализ принятых в них допущений.

№ 5.4. Местный размыв у опор мостов

При расчетах мостовых переходов одним из важных факторов является учет русловых деформаций, возникающих за счет стеснения потока дамбами, перекрывающими поймы, и руслового потока — мостовыми опорами. Надежность расчетных методов в значительной степени определяет надежность работы мостовых переходов. Однако как в отечественной, так и в зарубежной практике эксплуатации мостов нередко случаи их разрушения из-за подмыва промежуточных опор. Причинами этого является несовершенство методов прогноза и расчета глубин размыва у опор мостов. К сожалению, сложное взаимодействие вихревой структуры потока у мостовой опоры с грунтом русла не представляется возможным описать средствами гидромеханики или одномерной гидравлики. Поэтому приходится использовать данные натурных и лабораторных экспериментов для выявления основных факторов и зависимости глубины местного размыва от них. Исходя из этого рассмотрим физическую картину процесса размыва и выполним анализ влияния основных факторов, определяющих ее.

Сооружения мостовых переходов, стесняя реку, повышают интенсивность турбулентности потока и увеличивают его скорости в подмостовом русле, что сопровождается увеличением его глубин, вызывая тем самым *общий размыв* русла. Около опор мостов поток резко изменяет свою структуру и, взаимодействуя с грунтом русла, вызывает его интенсивный размыв, называемый *местным размывом* у мостовых опор. Помимо этих двух видов деформаций, возникающих под влиянием возведения мостовых переходов, необходимо учитывать тип руслового процесса и соответствующие ему русловые деформации.

Наименее изученным из этих деформаций является местный размыв. Общая картина процесса местного размыва представлена на рис. 5.5. Как видно на рисунке, струи потока, набегая на опору, ударяются о ее поверхность и изменяют свое направление. По бокам опоры из-за местного сжатия образуются скорости, превышающие примерно в 2 раза скорости потока. Со стороны лобовой грани струи потока расслаиваются. В верхней части потока они устремляются вверх, образуя на ширине опоры стоячую волну набега, т. е. кинетическая энергия потока переходит в потенциальную. Это приводит к образованию нисходящих течений на передней грани опоры с тупым носом, которые, опускаясь и отталкиваясь от дна, изменяют свое направление на обратное по отношению к направлению течения потока, а затем вблизи дна закручиваются в вихрь. Этот донный вихрь, или валец, с горизонтальной осью вращения подковообразно охватывает опору, а его струи захватывают частицы грунта и большую их часть выносят за пределы опоры ниже по течению.

Размыв у боковых граней опоры несколько опережает размыв перед лобовой гранью, но по прошествии некоторого времени

боковые размывы соединяются с размывами у лобовой грани опоры и здесь образуется наибольшая глубина воронки размыва.

Форма опоры в значительной степени определяет интенсивность турбулентности и как следствие глубину размыва около нее. Поэтому учет формы, являющейся независимым фактором, обычно выполняется с помощью коэффициента формы опоры $k_{\text{Ф}}$.

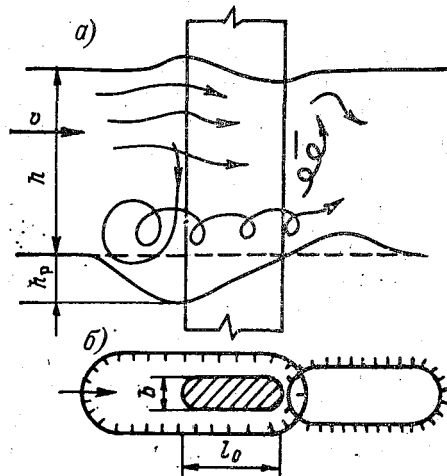


Рис. 5.5. Общая картина местного размыва у опоры моста.

а — схема распределения струй потока при его набеге на опору, *б* — схема деформаций русла у мостовой опоры.

За опорой возникает кильватерная система вихрей, причем в непосредственной близости от нее в зоне разряжения восходящих струй образуются самостоятельные вихри с вертикальной осью вращения. За опорой интенсивность вихрей уменьшается, но шлейф от повышенной турбулентности верхних слоев потока («дорожка Кармана») тянется на несколько длин опоры.

Глубина местного размыва зависит от скоростей потока, глубины воды перед опорой, расхода и режима перемещения наносов. Значительное влияние на глубину размыва и характер их изменения оказывает донногрядовый режим перемещения наносов. Если наносы не поступают в воронку размыва, то зависимость глубин от времени эксперимента представляет собой плавную линию. При донногрядовом режиме движения наносов они поступают в воронку размыва неравномерно, поэтому зависимость $h_p = f(t)$ имеет пульсирующий характер (рис. 5.6). Особенно большие пульсации глубин размывов наблюдаются при поступлении в воронку размыва мезоформ (ленточных гряд, побочней и др.).

Глубина и форма воронки размыва у опор также зависит от рода грунтов, слагающих русла рек. Особенно различаются размывы в связных и несвязных грунтах. К сожалению, размывы в связных грунтах изучены еще недостаточно.

Глубины местных размывов имеют свои пределы, так как основные параметры потока и русла, определяющие глубину раз-

мыва, имеют ограниченные значения. Изучение и расчет глубин местного размыва у опор мостов, безусловно, имеют большое практическое и научное значение, так как в значительной степени определяют надежность работы мостов. Это тем более важно, что, по данным различных исследований [17 и др.], наибольшие глубины местных размывов, зафиксированные на р. Ганг, достигают 30 и даже 40 м.

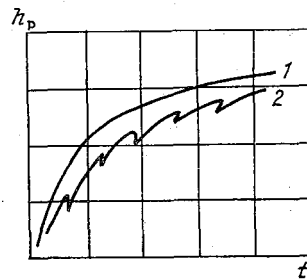


Рис. 5.6. Хронологический график изменения глубины местного размыва русла при отсутствии наносов (1) и при их поступлении в воронку размыва в виде рифелей (2) по В. С. Муромову.

Задача работы: расчет наибольших глубин местного размыва у опор мостов по различным методикам.

Исходные данные: средняя скорость потока v ; средняя глубина h , крупности наносов средняя k и k_{85} ; ширина опоры b ; коэффициенты формы k_ϕ и косины струй k_k (принять $k_k = 1,0$). Данные для расчета см. в приложении 24.

Л и т е р а т у р а:

Барышников Н. Б., Попов И. В. Динамика русловых потоков и русловые процессы, п. 4.6.

Журавлев М. М. Местный размыв у опор мостов.

Порядок выполнения работы

1. Рассчитать глубину местного размыва у мостовой опоры. По формуле В. С. Муромова

$$h_p = \left(h_0 + 0,014 \frac{v - v_k}{\omega} b \right) k_\phi k_k, \quad (5.36)$$

где h_0 — глубина размыва при скоростях, равных критическим, вычисляемая по формуле

$$h_0 = \frac{6,2\beta_0 h}{(v_k/\omega)^{\beta_0}}. \quad (5.37)$$

Коэффициент β_0 определяется по формуле

$$\beta_0 = 0,18 (b/h)^{0,87}$$

или по табл. 5.8;

b — ширина опоры; ω — гидравлическая крупность (см. табл. 5.5).

Для грунта, состоящего из разных фракций, гидравлическую крупность определяют по формуле

$$\omega = \sum \omega_i p_i / 100, \quad (5.38)$$

p_i — весовое содержание фракций в грунте, %; ω_i — средняя гидравлическая крупность данной фракции грунта

$$v_k = 3,6 \sqrt[4]{hk}. \quad (5.39)$$

ТАБЛИЦА 5.8

Значения параметра β_0

b/h	β_0	b/h	β_0	b/h	β_0
0,04	0,0110	0,40	0,080	2,0	0,330
0,06	0,0156	0,50	0,098	3,0	0,465
0,08	0,0200	0,60	0,115	4,0	0,600
0,10	0,0242	0,80	0,148	5,0	0,720
0,20	0,0450	1,0	0,180		

По формуле Ярославцева

$$h_p = 10k_\phi k_b (\alpha_v + k_h) v^2 / 2g - 30k_{85}, \quad (5.40)$$

где k_h — коэффициент, учитывающий влияние глубин на размыв и определяемый по формуле $\lg k_h = 0,17 - 0,35 h/b$; k_b — коэффициент, учитывающий влияние ширины опоры на размыв, определяемый по формуле $\lg k_b = -0,28 \sqrt[3]{v^2/(gb)}$; α_v — параметр, зависящий от распределения скоростей на вертикали и изменяющийся от 0,6 до 1,0 (в зависимости от места опоры в русле). Принять равным 0,8; k_{85} — крупность зерен, мельче которых в грунте содержится 85 % массы зерен.

По формуле Инглиса

$$h_p = 1,73h^{0,78}b^{0,22} - h, \quad (5.41)$$

или

$$h_p = 1,70q^{0,52}b^{0,22} - h. \quad (5.42)$$

Здесь все параметры приведены в футах (1 фут = 0,304 м).

По формуле Джайна

$$h_p = 1,84b^{0,7}h^{0,17}(v_k/\sqrt{g})^{0,25}, \quad (5.43)$$

где v_k определяется по формуле (5.21).

По формуле Журавлева

$$h_p = b^{0,4}h^{0,6}(v/v_{взм})^m k_\phi k_k, \quad (5.44)$$

где $v_{взм} = \sqrt[3]{g\omega h} (h/k)^{0,06}$ — скорость взмучивания; m — параметр, принимаемый равным 1,0, если $v/v_{взм} > 1,0$ и 0,67, если $v/v_{взм} \leq 1,0$.

По формуле Союздорнии при поступлении наносов в воронку размыва ($v > v_k$)

$$h_p = 1,1 \sqrt{b h} (v/v_{взм})^m k_\phi k_k, \quad (5.45)$$

для осветленного потока ($v < v_k$)

$$h_p = 1,1 b^{0,6} h^{0,4} (v/v_{взм})^m k_\phi k_k, \quad (5.46)$$

где $m = 0,5 + 0,24v/v_{вд}$.

2. Сравнить результаты расчетов и статистическим методом оценить отклонение глубин размывов от аналогичных, но полученных по формуле Союздорнии. Последняя принята за реперную условно.

Контрольные вопросы

1. Объясните причины местного размыва.
2. Как влияет косина струй на глубину местного размыва?
3. Перечислите основные факторы, определяющие глубины местного размыва, и укажите, как они влияют на нее.
4. Как влияет на глубину местного размыва сток донных наносов?
5. Как влияет форма опоры на глубину местного размыва?

Отчетные документы

Отчет по работе аналогичен отчету по работе № 5.1.

№ 5.5. Общий размыв подмостовых русел

Сооружение мостового перехода на реке создает изменения гидрологического режима в связи с обычно существенным стеснением речного потока. Это вызывает значительное нарушение естественного хода русловых процессов на реке и, как правило, возникновение русловых деформаций, имеющих важное значение для различных водопользователей. Поэтому их учет при проектировании и строительстве мостовых переходов является обязательным.

Общий размыв подмостовых русел — наиболее важная составляющая размыва, непосредственно связанная со степенью стеснения реки.

До второй половины XIX века отсутствовали научно обоснованные методы расчета мостовых отверстий, что приводило к разрушению мостов или увеличению их пролетов. В 1876 г. известный русский мостостроитель профессор Н. А. Белелюбский в результате анализа данных многочисленных натурных измерений пришел к выводу, что размывы, возникающие при стеснении потока, прекращаются при снижении скоростей под мостом до бы-

товых. Исходя из этого он предложил рассчитывать глубину размыва под мостом на основе значения бытовой скорости в русле. Впоследствии это положение получило название постулата Белелюбского и применяется в проектной практике до настоящего времени как частный случай решения задачи о размывах под мостами. Однако в методе Белелюбского были сделаны и недостаточно обоснованные допущения. Это привело к тому, что глубины размыва под мостами в ряде случаев значительно превышали расчетные по методикам, основанным на постулате Белелюбского. Особенно велики погрешности расчетов были на реках с поймами. Действительно, расчет основан на неправильном допущении, что после стеснения потока дополнительную нагрузку получают только пойменные участки подмостового отверстия, где средние пойменные скорости ($v_{п. 6}$) возрастают до бытовых значений в русловой части потока ($v_{р. 6}$), а в русле они практически не изменяются. Фактически же возрастают средние скорости как в пойменной ($v_{п. 3}$), так и в русловой частях потока ($v_{р. 3}$). Таким образом, допущение о постоянстве коэффициента размыва не всегда выполнялось. Поэтому был применен метод пропорциональных эпюр, в соответствии с которым скорости в русловой и пойменной частях отверстия моста увеличиваются при стеснении потока одинаково в β раз, т. е.

$$v_{р. 6}/v_{р. 3} = v_{п. 6}/v_{п. 3}. \quad (5.47)$$

Отсюда следует, что уклоны водной поверхности руслового и пойменного потоков увеличиваются также одинаково [23].

Из методов, основанных на принципе Белелюбского, наибольшее распространение получили:

— для русел с сечением простых форм метод Л. Л. Лиштвана:

при несвязных грунтах

$$h_{п.р} = \left(\frac{mh_{р.в}}{0,68k^{0,28}\beta} \right)^{\frac{1}{x+1}}, \quad (5.48)$$

при связных грунтах

$$h_{п.р} = \left(\frac{mh_{р.в}}{0,60\gamma_r^{1,18}\beta} \right)^{\frac{1}{x+1}}; \quad (5.49)$$

— для русел с сечением сложной формы, частным случаем которых являются русла с поймами, метод И. И. Херхеулидзе:

$$q_z = A_1 + q_6, \quad (5.50)$$

$$h_{п.р} = (q_z/B_1)^{\frac{1}{x+1}}, \quad (5.51)$$

где $m = Q/(h_{р. 6} l_{м\mu})$ — величина постоянная для данного мостового перехода; $h_{р. 6}$ и $h_{р. в}$ — средние глубины воды русла в быто-

вых условиях под мостом и на вертикали; l_m — ширина отверстия моста; μ — коэффициент сжатия потока опорами моста; q_z — расчетное значение элементарного расхода воды на вертикали; A_1 — постоянный параметр, учитывающий положение вертикали в подмостовом русле, пойменный расход воды на участке, перекрытом дамбой, и другие характеристики; B_1 — постоянная, зависящая от степени стеснения и сжатия потока; x — показатель, зависящий от рода грунтов; значение $\frac{1}{x+1}$ изменяется от 0,7 до 0,8.

В последующий период широкое распространение получили методы, основанные на уравнении баланса наносов. Одним из инициаторов их развития в СССР является О. В. Андреев, который в 1965 г. довел их до расчетных формул отдельно для руслового и пойменного участков моста в связи с различными причинами прекращения размыва [39].

О. В. Андреев считает, что на пойменных участках в бытовых условиях средняя скорость потока $v_{п.б}$ меньше критической неразмывающей $v_{п.н}$, т. е. $v_{п.б} < v_{п.н}$. Размыв на этом участке может быть только в том случае, если при стеснении потока скорость $v_{п.с}$ превысит критическую неразмывающую, т. е. $v_{п.с} > v_{п.н}$.

При размыве поймы площадь живого сечения увеличивается, следовательно, скорость потока будет уменьшаться. Размыв прекратится, когда $v_{п.с} = v_{п.н}$.

Исходя из этого О. В. Андреевым для расчета глубин размыва на пойменном подмостовом участке рекомендована следующая формула:

$$h_{п.м} = \beta_{п.б} q_{п.б} / v_{п.н}, \quad (5.52)$$

где $\beta_{п.б}$ — коэффициент стеснения, характеризующий увеличение расхода воды на пойменном участке подмостового русла; $q_{п.б}$ — расход воды на единицу ширины потока на пойменном участке (под мостом) в бытовых условиях; $v_{п.н}$ — критическая средняя неподвижная скорость.

На русловом подмостовом участке причина размыва несколько отлична, так как даже бытовые скорости ($v_{р.б}$) больше критических неразмывающих, т. е. $v_{р.б} > v_{р.н}$. Но при бытовых условиях поток перемещает определенный расход руслоформирующих наносов, т. е. система поток—наносы—русло находится в равновесии. При сжатии потока перед мостовым переходом создается подпор, препятствующий поступлению наносов в подмостовое русло. В то же время скорости потока возрастают и значительно превышают критические, что приводит к увеличению транспортирующей способности потока под мостом. Следовательно, наблюдается нарушение баланса между поступлением наносов в подмостовое русло сверху по течению и их выносом из-под моста потоком. Это приводит к деформации размыва русла в подмостовом отверстии.

Применив к этому участку русла уравнение баланса наносов и решив его в конечных разностях, О. В. Андреев получил выражение для расчета средних глубин размыва в виде

$$\Delta h_p / \Delta t = (G_2 - G_1) / (\Delta l B_p) = (G_2 - G_1) / \Omega, \quad (5.53)$$

где G_2 и G_1 — расходы руслоформирующих наносов в створе мостового перехода и выше него; Δl — длина расчетного участка; B_p — расчетная ширина зоны размыва подмостового русла; Ω — площадь размыва.

Соответственно объем грунта, смываемого за время Δt , равен

$$W = \Delta h_p \Omega. \quad (5.54)$$

Размыв прекратится, если $\Delta h_p / \Delta t = 0$.

Решая (5.53) и введя ряд допущений, в частности принимая формулу для расчета расхода наносов в следующем общем виде:

$$G = A_2 v^m B_p (1 - v_n/v) / h^{k_1}, \quad (5.55)$$

Андреев получил окончательный вид формулы для расчета средней предельной глубины размыва

$$h_{p.m} = h_{p.б} (B_{p.б} / B_{p.m})^{2/3} (Q_{p.m} / Q_{p.б})^{8/9}, \quad (5.56)$$

где $A_2 = f(k)$; m и k_1 — постоянные, принимаемые $m = 4$ и $k_1 = 0,4 \div 0,5$; h_p , B_p и Q_p — соответственно глубина, ширина и расход воды в подмостовом русле (р. м) и в бытовых условиях (р. б).

Следует отметить, что увеличение ширины подмостового русла по сравнению с бытовыми условиями приводит к уменьшению глубины общего размыва. Установлено [23, 39], что каждому мостовому переходу соответствует определенная устойчивая ширина подмостового русла $B_{p.m}$, которая в общем случае меньше ширины отверстия моста l_m , т. е. $B_{p.m} < l_m$. Это отличается от условий, принятых в постулате Белелюбского, который считал, что $B_{p.m} = l_m$.

Фактором, оказывающим существенное влияние на глубину размыва, является продолжительность воздействия расчетного расхода воды. Действительно, формула (5.56), применяемая для максимального расчетного расхода воды, дает значение предельного размыва в предположении, что времени стояния наивысшего уровня практически достаточно для стабилизации размыва. Для развития размыва до предельного значения на существенном удалении от оси моста должны быть вымыты очень большие объемы грунта, на что требуется значительное время. В реальных же условиях его недостаточно, так как максимальные уровни и расходы воды проходят обычно за несколько часов, иногда суток. Однако при прохождении расчетного паводка по уже размыву предшествующими паводками дну возможен размыв, близкий к предельному расчетному.

Таким образом, формула (5.56) и другие для расчетов глубины предельного размыва могут давать результаты, близкие к фактическим. Однако на реках с большими поймами и паводками малой продолжительности, несущих к тому же крупные наносы, фактические глубины размывов могут быть значительно меньше предельных, определенных по формуле (5.56), тогда использование таких формул может привести к излишним запасам глубин и как следствие к излишним запасам устойчивости сооружений, что значительно удорожает его стоимость. Поэтому для расчетов в последние годы используют балансовые методы в явном виде, сочетая их с расчетными гидрографами паводков и решая задачу с помощью ЭВМ.

Для этих целей формула (5.53) преобразовывается

$$\Delta h_{mi} = (G_{(m+1)i} - G_{mi}) / (B_{pm} \Delta l_{pm}), \quad (5.57)$$

где Δh_{mi} — среднее понижение (повышение) дна русла на расчетном участке длиной Δl_{pm} за интервал времени Δt_i ; G_{mi} и $G_{(m+1)i}$ — расходы руслоформирующих наносов в начальном и конечном створах расчетного участка; B_{pm} — средняя ширина m -го участка.

В Союздорпроекте и Гипротрансмосте разработаны программы расчетов русловых деформаций подмостовых русел на основе формулы (5.57), названные «Гидран-1», «Гидран-2» и «Гидран-3». Примеры расчетов по программе «Гидран-3» приведены в [39]. Из-за ограниченного объема пособия и большого объема программы «Гидран-3» она не приводится.

Задача работы: расчет предельной глубины размыва подмостового русла по методике О. В. Андреева и глубины размыва по методике Л. Л. Лиштвана. Сравнение и анализ полученных результатов. По указанию преподавателя расчет может быть выполнен по программе «Гидран-3».

Исходные данные: расход воды $Q_{p.6}$; соотношение подмостового расхода воды в сжатом состоянии и в бытовых условиях $Q_{сж}/Q_{p.6}$; средняя глубина русла $h_{p.6}$; крупность равнотернистых грунтов, слагающих подмостовое русло k_p ; ширина отверстия моста l_m ; коэффициент сжатия потока опорами моста $\mu = 0,95$; ширина русла под мостом после размыва $B_{p.m} = 0,9 l_m$; расчетная продолжительность паводка T соответствует времени затопления поймы; длина зоны общего размыва L_p ; коэффициент стеснения потока поймы β_p . Для пойменного участка подмостового русла принять $h_{п.6} = 0,5 h_{p.6}$; $k_{п.6} = 0,3 k_p$; $k_{сп}/k_{п.6} = 2$. Варианты расчетных заданий см. в приложении 25.

Л и т е р а т у р а:

Барышников Н. Б., Попов И. В. Динамика русловых потоков и русловые процессы, п. 4.6.2.

Лукашук Л. В. Общий размыв русел на мостовых переходах.

Федотов Г. А. Расчеты мостовых переходов с применением ЭВМ.

Порядок выполнения работы

1. Рассчитать глубину общего размыва русла под мостом по методике Л. Л. Лиштвана по формуле (5.48).

2. Ввести поправку на расчетную продолжительность паводка, используя для этого таблицу Л. Л. Лиштвана и А. П. Иванчука (табл. 5.9).

ТАБЛИЦА 5.9

Значения поправочных коэффициентов, τ , учитывающих продолжительность паводков

$0,5 B_p L_p$ тыс. м ²	$\frac{Q_{сж}}{Q_{р. б}}$	Время затопления пойм T сут					
		3	10	15	30	60	150
5—20	1,2	0,93	0,95	0,96	0,98	1,0	1,0
	1,5	0,85	0,90	0,93	0,97	1,0	1,0
	1,8	0,79	0,87	0,90	0,96	1,0	1,0
	2,1	0,74	0,84	0,88	0,95	1,0	1,0
	2,5	0,71	0,82	0,87	0,94	1,0	1,0
20—100	1,2	0,92	0,94	0,95	0,97	0,98	1,0
	1,5	0,82	0,87	0,89	0,93	0,97	1,0
	1,8	0,76	0,83	0,86	0,91	0,96	1,0
	2,1	0,71	0,80	0,83	0,90	0,95	1,0
	2,5	0,67	0,76	0,80	0,88	0,94	1,0
100—300	1,2	0,90	0,92	0,93	0,94	0,96	1,0
	1,5	0,78	0,83	0,85	0,87	0,91	1,0
	1,8	0,71	0,77	0,79	0,83	0,88	1,0
	2,1	0,65	0,72	0,75	0,81	0,87	1,0
	2,5	0,60	0,68	0,72	0,79	0,86	1,0

3. Рассчитать глубину общего размыва подмостового русла по методике О. В. Андреева, по формуле (5.56).

4. Ввести поправку к глубине размыва на расчетную продолжительность паводка, используя для этого табл. 5.9. Для этого необходимо предварительно вычислить объем тела размыва $W_p = 0,5 L_p B_p$.

5. Выполнить расчет глубины общего размыва подмостового русла балансовым методом, используя для этого программу «Гидран-3» (см. Г. А. Федотов. Расчеты мостовых переходов с применением ЭВМ. С. 181—204).

6. Выполнить сравнение и анализ результатов расчетов глубин общего размыва подмостового русла, полученных различными методами.

7. Рассчитать глубину общего размыва на подмостовом участке поймы по методу О. В. Андреева [формула (5.52)].

8. Сравнить глубины общего размыва на русловом и пойменном участках. Объяснить причины их расхождения.

Контрольные вопросы

1. Объясните причины, вызывающие общий размыв подмостовых русел и пойм.

2. Приведите основные факторы, определяющие глубины общего размыва подмостовых русел.

3. Как влияет слоистость грунтов в подмостовом русле на глубину его общего размыва? Как это учитывается в расчетных формулах?

4. Каковы особенности размыва пойменных подмостовых участков?

5. Как влияет продолжительность прохождения паводков на глубину размыва подмостовых русел? Как это учитывается в расчетных методиках?

6. Как влияет форма гидрографа стока на глубину размыва подмостового русла? Как это влияние учитывается в расчетных методиках?

7. Чем определяется верхний и нижний пределы общего размыва подмостовых русел и чем они отличаются от гипотетического русла?

8. В чем отличие методов расчетов глубин общего размыва подмостовых русел в связных грунтах?

Отчетные документы

Отчет по работе аналогичен отчету по работе 5.1.

№ 5.6. Гидравлический расчет крупных земляных каналов

Строительство земляных каналов осуществлялось еще с древних времен. Однако это были сравнительно небольшие каналы, основной задачей которых был подвод пресной воды на сельскохозяйственные угодья. В связи с развитием торговых связей резко возросла роль судоходства, что привело к строительству малых судоходных каналов, интенсивное развитие которого в России началось еще при Петре I.

В современных условиях ежегодно строится значительное количество каналов различных размеров, в том числе и больших (в соответствии с классификацией В. С. Алтунина [1], табл. 5.10), имеющих многофункциональное назначение. В частности, большие и очень большие каналы используются для орошения и судоходства, на их отдельных участках располагаются регулирующие водохранилища и даже ГЭС.

Укрепление берегов русел больших и очень больших каналов экономически нецелесообразно, поэтому характерным для них

является развитие различных типов русловых процессов. Действительно, такие каналы в принципе мало отличаются от зарегулированных рек, вытекающих из больших и средних озер.

Одной из основных задач при проектировании больших и очень больших каналов является сведение к минимуму плановых деформаций. Так как такие каналы отторгают значительные тер-

ТАБЛИЦА 5.10

Классификация динамически устойчивых магистральных каналов

Класс сооружения	Q м ³ /с	Тип канала	Назначение канала	Период эксплуатации	Ожидаемые местные деформации
IV	<35	Малый	Орошение или водоснабжение	Вегетация	Эрозия дамб и откосов, заиление, зарастание, просадки, пучение грунта и т. д.
III	35—350	Средний	То же	Вегетация	То же
II	350—800	Большой	То же, судоходство и энергетика	Круглогодично	То же и обрушение берегов (в первую очередь от судовых волн), деформации от ледовых явлений
I	>800	Очень большой	То же	То же	То же

ритории, включая и плодородные сельскохозяйственные угодья, проектировщики стремятся сделать их плановые размеры наименьшими, т. е. рассчитать размеры каналов таким образом, чтобы соотношение их ширины B и максимальной глубины h_m было минимальным. Этому обычно препятствует стремление потока к расширению русел, особенно при меандрирующих типах руслового процесса. Следовательно, одной из основных задач гидравлического расчета каналов является определение их плановых размеров, обычно характеризуемых отношением B/h_m . Аналитические исследования не привели к разработке практических решений данной проблемы, поэтому в основу расчетов были положены рекомендации, основанные на анализе отечественного и зарубежного опыта, накопленного в процессе эксплуатации больших каналов.

Вторым важным фактором является создание такого режима, при котором отсутствовали бы существенные высотные деформации дна каналов, приводящие к быстрому выводу их из строя действующих. Обычно эта проблема решается на основе допущения о том, что средние скорости течения воды в канале или на

скоростных вертикалях должны быть больше критических неразмывающих, но меньше срывающих, т. е.

$$v_n < v < v_c. \quad (5.58)$$

Как следует из анализа многочисленных работ, посвященных этой проблеме [3, 25 и др.], в частности приведенного в лабораторной работе № 3.1, в настоящее время имеется очень много формул для определения значений критических скоростей, результаты расчетов по которым могут существенно отличаться друг от друга. Следует отметить, что в результате длительной дискуссии, проводившейся в 80-х годах на базе «Союзгипроводхоза», посвященной разработке и, главное, применению методов расчетов больших земляных каналов, появилась возможность создать объективную методику расчетов [32].

Третьим важным фактором является сток наносов в каналах. Несмотря на разработку различных типов водозаборных устройств, в которых применяются разные конструкции и приспособления, направленные на то, чтобы задержать поступление влекомых наносов в каналы, эта проблема, к сожалению, еще не решена и наносы из рек продолжают поступать в каналы. Сама структура потока при его делении такова, что без этих приспособлений в каналы поступала бы подавляющая часть стока влекомых наносов [3, 11]. Поэтому третьей важной задачей является обеспечение такого режима потока, при котором расход влекомых наносов O_s был бы равен транспортирующей способности потока G_b , т. е.

$$Q_s \approx G_b. \quad (5.59)$$

Анализ методов гидравлических расчетов больших земляных каналов выполнен в учебном пособии [3], а детальное изложение методов расчетов, разработанных в процессе указанной выше дискуссии и принятых в качестве расчетных в системе Минводхоза, приведено в «Рекомендациях по гидравлическому расчету крупных каналов» [32]. Рассмотрим основные положения этих методик.

Расчет предлагается выполнять по одной из двух методик. При этом приняты следующие основные допущения: движение воды в канале принимается равномерным, уклон водной поверхности равным уклону дна, гидравлический радиус для больших каналов равным их средней глубине, т. е. $R \approx h$.

Основными расчетными уравнениями являются:

$$\tau = \rho g h I; \quad (5.60)$$

$$v = C \sqrt{h I}; \quad (5.61)$$

$$C = f(h, n), \quad (5.62)$$

где τ — действующее касательное напряжение; h — средняя глубина канала; I — уклон дна канала, равный уклону его водной поверхности.

Из (5.60) и (5.61) получают

$$\tau_{\text{доп}} = \rho g v_{\text{доп}}^2 / C_{\text{доп}}^2. \quad (5.63)$$

Обычно рассматриваются трапециевидальная или параболическая форма поперечного сечения русла канала (возможна и полигональная форма). Коэффициенты откоса m принимаются в соответствии с действующими нормативами или расчетом на устойчивость грунтов.

Важным является определение допустимых размеров каналов, характеризуемых отношением его ширины B к максимальной

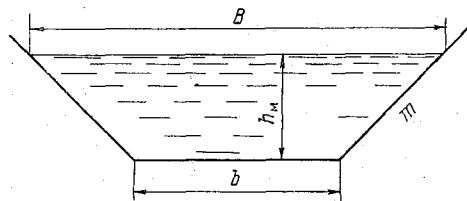


Рис. 5.7. Поперечное сечение канала трапециевидальной формы
 $m = (B - b) / (2h_m)$.

глубине h_m , т. е. B/h_m . При трапециевидальной форме в средней («активной») части русла канала поток имеет равные глубины, а при параболическом очертании — почти равные, отвечающие максимальной глубине h_m . В этих условиях распределение средних на вертикалях скоростей по ширине средней части русла приобретает выровненный характер.

Эту область водного потока следует рассматривать как формирующуюся при постоянной глубине h_m , ширине b (рис. 5.7) и продольном уклоне I , отвечающем этой глубине h_m .

Отношение средней скорости «активной» части v_m , определяемой по максимальной глубине, к средней скорости всего сечения v , найденной по R или h (в формуле (5.61)), принимается равным 1,13—1,15, тогда

$$v = \frac{v_m}{(1,13 \div 1,15)} = 0,87 \div 0,89 v_m,$$

$$\text{т. е. } v = \psi v_m; \quad \psi = 0,87 - 0,89. \quad (5.64)$$

Методика расчета больших земляных каналов основана на том, что средняя скорость на вертикали v_m не должна превышать допускаемую (неразмывающую) скорость для данного грунта $v_{\text{доп}}$, т. е. $v_m \leq v_{\text{доп}}$. Эта методика называется методикой допускаемых или неразмывающих скоростей (МДС).

При расчетах по допускаемым касательным напряжениям (метод допускаемых или неразмывающих касательных напряжений — МКН) касательное напряжение на вертикали не должно превышать допускаемое касательное напряжение $\tau_{\text{доп}}$, т. е. $\tau \leq \tau_{\text{доп}}$.

При наличии транспорта наносов необходимо учитывать некоторое увеличение скоростей в связи с движением наносов.

Задача работы: гидравлический расчет основных параметров потока в канале, построенном в несвязных и связных грунтах.

Исходные данные: расчетный расход воды Q ; средняя крупность частиц, слагающих русло канала k ; параметр $\alpha_1 = k/k_5$, связный грунт, характеристики состава грунта отдельных участков ложа канала; $m = (B - b)/(2h_m)$ — коэффициент откоса канала; коэффициент шероховатости n , соответствующий транспорту наносов в донногрядовой фазе их перемещения (принять равным 0,030); расчетная скорость $v_{расч}$ принимается равной $1,1 v_{доп}$. При расчетах по программе «Гидран-3» гидрограф стока и другие параметры задаются преподавателем. Варианты расчета даны в приложении 26.

Литература:

Алтуни В. С. Мелиоративные каналы в земляных руслах.
Барышников Н. Б., Попов И. В. Динамика русловых потоков и русловые процессы, п. 4.8.

Рекомендации по гидравлическому расчету крупных каналов.

Порядок выполнения работы

Расчет по методике допустимых скоростей (МДС).

1. При расчетах применяется метод приближения, поэтому сначала необходимо задаться значением глубины для средней части сечения h_m , приняв форму сечения канала трапециoidalной (см. рис. 5.7).

2. Для глубины h_m рассчитать допустимую скорость течения

$$v_{доп} = v_{доп h=1 м} \cdot h_m^{0,2}. \quad (5.65)$$

Значение $v_{доп h=1 м}$ определяется по табл. 5.11 на основе исходной информации о k и α_1 .

ТАБЛИЦА 5.11

Значения средних допускаемых (неразмывающих) скоростей $v_{доп}$ и касательных напряжений $\tau_{доп}$ для русла канала с $h = 1,0$ м (несвязные грунты)

$n = 0,02$

k мм	$\alpha_1 = 0,5$		$\alpha_1 = 0,3$		$\alpha_1 = 0,2$	
	$v_{доп}$ м/с	$\tau_{доп}$	$v_{доп}$ м/с	$\tau_{доп}$	$v_{доп}$ м/с	$\tau_{доп}$
0,15	0,40	0,082	0,52	0,128	0,62	0,194
0,25	0,47	0,084	0,58	0,133	0,67	0,194
0,37	0,52	0,096	0,64	0,145	0,75	0,198
0,50	0,57	0,108	0,70	0,162	0,81	0,218
0,75	0,65	0,128	0,79	0,188	0,87	0,228
1,00	0,70	0,145	0,83	0,205	0,89	0,235

3. Определить среднюю расчетную скорость течения в канале

$$v_{\text{расч}} = 1,1 v_{\text{доп.}} \quad (5.66)$$

4. Рассчитать продольный уклон канала, соответствующий полученным значениям h_m и $v_{\text{расч}}$, по формуле

$$I = v_{\text{расч}}^2 / (C_{\text{расч}}^2 h_m). \quad (5.67)$$

Значение коэффициента Шези рекомендуется определять по табл. 5.12 или по формуле Павловского.

ТАБЛИЦА 5.12

Рекомендуемые значения коэффициента Шези C

h_m	Коэффициент Шези C при n , равном			
	0,020	0,025	0,0275	0,030
4	62,3	51,4	47,0	44,0
5	64,2	53,2	48,8	45,8
6	65,6	54,7	50,2	47,3
7	67,0	56,0	51,4	48,3
8	68,1	57,2	52,5	49,4
9	69,2	58,2	53,4	50,4
10	70,1	59,0	54,4	51,1
11	71,0	60,0	55,2	51,9
12	71,8	60,8	55,9	52,7
13	72,5	61,5	56,5	53,4
14	73,2	62,1	57,0	53,8
15	73,8	62,8	57,4	54,3

5. Определить значение параметра $A_1 = B/h_m$ для заданного грунта, используя данные, приведенные в табл. 5.13, а затем расчетную ширину канала B и ширину канала по дну b :

$$B = A_1 h_m, \quad (5.68)$$

$$b = 2B - m h_m. \quad (5.69)$$

6. Определить значение средней скорости, используя для этого расчетную скорость $v_{\text{расч}}$, полученную в п. 3. Коэффициент ψ принять равным 1,13:

$$v = v_{\text{расч}} / 1,13.$$

7. Определить среднюю глубину поперечного сечения русла $h_{\text{ср.}}$.

8. Используя данные о средней скорости течения v , ширине канала B и его средней глубине $h_{\text{ср.}}$, подсчитать расход воды Q_p .

9. Сравнить расчетное значение расхода воды Q_p с заданным значением Q . Определить погрешность (%) расчетов расхода воды $\Delta Q/Q = (Q - Q_p)/Q$. Если эта погрешность не будет превышать 3 %, то расчет заканчивается. В противном случае расчет

необходимо повторить, но задаваясь другими значениями глубины h_m .

10. Выполнить аналогичные расчеты для связного грунта.

11. Задаваясь значением глубины для средней части канала h_m , аналогичным расчетному значению по методу МДС, выполнить расчеты по методу МКН. Следовательно, значения параметра A_1 , коэффициента шероховатости и ширины русла B будут теми же, что и в п. 5.

12. Сравнить результаты расчетов и сделать выводы.

ТАБЛИЦА 5.13

Рекомендуемые значения B/h м

Q м ³ /с	Песчаные несвязные грунты $k=0,15 \div 0,30$ мм	Супеси и легкие суглинки	Глинистые грунты
250	17,0	11,3	7,0
400	18,0	12,0	7,5
500	19,0	13,0	8,0
750	19,5	13,7	8,7
1000	20,0	14,5	9,0
1250	20,0	15,0	10,0
2000	21,0	16,0	10,0
2400	21,5	16,5	10,5

Контрольные вопросы

1. Как влияют ветровые и судовые волны на устойчивость берегов каналов?
2. Какие функциональные назначения каналов вам известны?
3. В чем особенности расчетов каналов, проложенных по участкам, сложенным из несвязных грунтов, при их сопряжении с участками из связных грунтов?
4. В чем особенности работы каналов в зимних условиях?
5. Какие методы гидравлического расчета параметров больших земляных каналов вам известны? В чем их особенности?
6. Как влияет транспорт наносов на деформации русел каналов?

Отчетные документы

Отчет о проделанной работе аналогичен отчету по работе № 5.1.

5.3. Экспериментальные работы

№ 5.7. Динамика кривых подпора и занесение верхнего бьефа (плоская задача)

Плотины, возводимые на реках, нарушают естественный режим водотока, разделяя его на верхний и нижний бьефы. В верх-

нем бьефе возникают одновременно процессы заиления и занесения водохранилища, вызывающие повышение русла реки и отметок свободной поверхности выше выклинивания подпора. Все эти процессы взаимосвязаны, и на различных по режиму водотоках каждый из них может иметь преобладающее значение.

Процессы занесения на горных реках протекают значительно быстрее, чем на равнинных. При этом в месте начального выклинивания подпора формируется призма занесения, голова которой движется вниз к плотине, а хвост призмы поднимается вверх по течению. Причем отношение длины части призмы, находящейся в водохранилище, ко всей ее длине примерно равно 0,3 [7]. Скорость движения призмы определяется количеством наносов, поступающих с верхних участков, и характером изменения глубин в водохранилище.

Как показали исследования В. Н. Гончарова [7], транспортирующая способность потока при постоянном расходе воды находится в обратной зависимости от глубины в степени, близкой к 5, т. е. $G \approx aH^{-5}$.

В связи с тем что глубины в водохранилище постепенно увеличиваются к плотине, а поступление наносов к уступу призмы уменьшается, скорость движения уступа по мере продвижения призмы в глубь водохранилища замедляется.

Нерусловые наносы обычно откладываются между призмой занесения и плотиной, иногда образуя донные гряды. При продвижении в водохранилище объем призмы занесения увеличивается также за счет поглощения ранее отложившихся нерусловых наносов.

Распространение хвоста призмы занесения выше зоны начального выклинивания подпора приводит к повышению отметок дна выше водохранилища и как следствие к повышению отметок свободной поверхности.

Указанные процессы описаны для условий равномерного режима бытового потока и неизменного напора на плотине. В натуральных условиях все эти процессы усложняются из-за сезонных и годовых колебаний жидкого и твердого стока рек, колебаний уровней верхнего бьефа сооружений, неравенства глубин по ширине потока и др.

В связи со сложностью натуральных процессов для выявления лишь наиболее существенных факторов этих процессов в лаборатории приходится ограничиться условиями плоской задачи.

Задачи работы: ознакомление студентов со сложными явлениями изменения кривых подпора и процессами занесения и заиления водохранилища в условиях плоской задачи.

Л и т е р а т у р а:

Барышников Н. Б., Попов И. В. Динамика русловых потоков и русловые процессы, п. 4.3.

Гончаров В. Н. Динамика русловых потоков, гл. 13.

Описание установки и методика выполнения эксперимента

В ЛГМИ работа выполняется на большом плоском лотке с переменным уклоном длиной 12 м (рис. 5.8). В конце лотка установлен мерный водослив. На стенках лотка, выполненных из стекла, точно через 1 м нанесены шкалы с миллиметровыми делениями. Нули этих шкал совмещены с дном лотка.

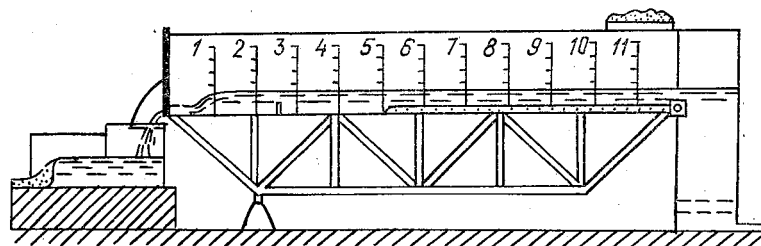


Рис. 5.8. Схема установки для изучения процесса занесения водохранилища (плоская задача).
1—11 — номера створов.

На время опыта в конце лотка на расстоянии 1 м от его торца размещается модель водосливной плотины высотой 5 см.

Работа выполняется бригадой в составе 4—5 человек. Состав бригады распределяется по видам работ следующим образом: один человек выделяется на подачу наносов в лоток, второй — на регистрацию положения уступа и хвоста призмы занесения (им же осуществляется контроль времени и подача команды). Этот студент является старшим на время эксперимента, остальные члены бригады наряду с общими наблюдениями за развитием процесса производят отсчеты отметок свободной поверхности и дна по шкалам, закрепленным на стенках лотка. В связи с тем что количество створов, в которых производится отсчет отметок, равно десяти, на каждого из студентов приходится от трех до пяти створов.

Ход работы:

1. Установить заданный расход воды (совместно с преподавателем).

2. Определить точку начального выклинивания подпора. Для этого необходимо сделать отсчеты отметок свободной поверхности по всем 10 рейкам. По этим данным вычертить профиль свободной поверхности по длине лотка и по нему определить место начального выклинивания подпора, уточнив его положение с помощью визуальных наблюдений.

3. Определить скорость движения уступа и хвоста призмы занесения. Для этого одновременно с началом подачи наносов

в поток фиксируется время (по секундомеру). Интенсивность подачи наносов в лоток должна быть равна его транспортной способности. Практически это достигается следующим образом. Подача песка в поток осуществляется равномерно по всей ширине лотка. Интенсивность подачи равномерно возрастает до тех пор, пока песок не начнет здесь же откладываться. Это указывает на состояние небаланса, т. е. подача наносов оказалась больше транспортной способности потока. Поэтому далее несколько уменьшают интенсивность подачи до тех пор, пока все наносы, подаваемые в поток, будут им перемещаться. После чего непрерывно поддерживают подачу наносов на этом уровне.

Через каждые пять минут после начала подачи песка в лоток подается команда «отсчет» (секундомер при этом не отключается). По этой команде все снова записывают показания. Иногда во время отсчета поверхность дна и свободная поверхность бывают волнистыми. Отсчет при этом должен быть равен полусумме отсчетов вершины и подошвы ближайшей к рейке волны (гряды). Аналогичные отсчеты производятся непрерывно через каждые три—пять минут до тех пор, пока уступ призмы занесения не достигнет плотины. В промежутке между отсчетами производятся визуальные наблюдения за нерусловыми наносами, которые откладываются между уступом призмы занесения и плотиной, иногда в виде донных гряд.

Старший в бригаде в это время производит определение местоположения хвоста и уступа призмы занесения и определяет высоту уступа призмы занесения. При определении положения хвоста и уступа призмы занесения производится измерение расстояний (линейкой) от уступа или хвоста призмы до ближайшей рейки. При этом в бланке (см. приложение 26) отмечается, на каком расстоянии, выше или ниже такой-то рейки располагается хвост или уступ призмы. Так как хвост призмы движется значительно быстрее уступа, а длина рабочей части лотка невелика, то хвост призмы занесения после двух-трех отсчетов достигает места подачи наносов, после чего наблюдения за его движением прекращаются.

Старший обязан следить за тем, чтобы каждый член бригады участвовал во всех видах наблюдений.

4. Определить основные параметры установки: ширину лотка, расстояние между створами и высоту плотины. Произвести измерение температуры воды и контрольное измерение расхода воды в конце опыта.

Обработка экспериментальных данных и их анализ

1. По данным нивелировки определить уклон дна установки.
2. Определить среднюю и пятипроцентную (k_5) крупности песка, используя интегральную кривую механического состава наносов, полученную в работе № 3.4.

3. Используя материалы отсчетов отметок свободной поверхности и дна, а также данные о положении и высоте уступа и хвоста призмы занесения, необходимо построить (отдельно за каждый момент времени) совмещенные продольные профили уровней и поверхности призмы занесения. При построении необходимо учитывать, что жесткое дно установки не горизонтально, а имеет уклон (см. п. 1).

4. По графикам, указанным в п. 3, определить отметку уровня воды в точке начального выклинивания кривой подпора за каждый момент времени. По этим данным далее необходимо построить график изменения отметок свободной поверхности во времени, причем отметку уровней следует откладывать по оси ординат, а время — по оси абсцисс.

5. Построить график распространения уступа и хвоста призмы занесения. Для этого по оси ординат следует откладывать время, а по оси абсцисс вправо — расстояние от точки начального выклинивания кривой подпора до хвоста призмы занесения, а влево — расстояние от той же точки до уступа призмы занесения. При построении графика зависимости распространения хвоста призмы занесения от времени следует помнить, что длина лотка является недостаточной. Поэтому хвост призмы уже после двух-трех отсчетов достигает места подачи наносов и дальнейшее его распространение прекращается.

6. Определить неподвижную и срывающую средние скорости потока для створа 6 в момент времени $t = 20$ мин и сравнить их со средними скоростями потока.

7. Определить глубину потока над уступом призмы занесения $h_{пр}$ за каждый момент времени (используя для этого графики, построенные в п. 3), а также, во сколько раз эта глубина больше бытовой h_6 . Полученные результаты осреднить и сравнить с расчетной величиной, получаемой по формуле В. Н. Гончарова $h_{пр} = 1,32 h_6$.

8. Для характеристики режима потока на установке вычислить числа Рейнольдса и Фруда в створе 6 в момент времени $t = 20$ мин.

9. Описать процесс перемещения наносов, обратив особое внимание на отложение взвешенных частиц и характерные особенности потока, наблюдавшиеся при переносе наносов в водохранилище, а также отметить особенности занесения водохранилища в створе уступа и в створе хвоста призмы занесения.

Отчетные документы

Приложения к отчету включают:

- совмещенные продольные профили свободной поверхности и отметок дна, т. е. положения призмы занесения;
- график изменения уровня воды в месте начального выклинивания подпора;

- график распространения уступа и хвоста призмы занесения;
- бланки с результатами опытов.

№ 5.8. Местный размыв за гидротехническими сооружениями

Плотины, создающие регулирующие водохранилища, отсекают доступ русловых наносов в нижний бьеф на длительное время. Аналогичное явление происходит при строительстве водосливов и других мерных гидрометрических сооружений на малых реках, создающих существенный подпор.

Пройдя подпорное сооружение, поток поступает в нижний бьеф с достаточно высокими скоростями, которые, несмотря на различного рода гасители, устанавливаемые в нижнем бьефе, как правило, несколько больше бытовых. При этом поток обладает определенной транспортирующей способностью и русловые наносы он получает за счет прежде всего местного размыва приплотинного участка реки. Этот местный размыв интенсивно протекает в начальный период, а затем постепенно затухает, переходя к стабильному состоянию.

Образование местного размыва непосредственно за сооружением представляет весьма серьезную опасность для всего сооружения. Поэтому проектировщики при расчетах сооружений всегда учитывают основные параметры зон местного размыва, как-то: ее максимальную глубину, глубину размыва у рисбермы, длину и др. Расчетные методы оценки этих параметров, разработанные рядом советских исследователей (В. Н. Гончарова, К. И. Россинского, И. И. Леви, К. С. Поповой и др.), дают вполне удовлетворительные результаты.

Значения основных расчетных параметров этой зоны (наибольшей глубины, ширины и объема) зависят от скорости, с которой поток сходит с рисбермы, режима потока, крупности частиц, слагающих русла, а также от степени подтопления нижнего бьефа нижерасположенными сооружениями.

Задачи работы: изучение процесса местного размыва за сооружением (на модели в условиях плоской задачи), установление основных параметров зоны размыва и их изменения во времени, а также визуальные наблюдения за структурой и механизмом потоков в зоне местного размыва.

Л и т е р а т у р а:

Барышников Н. Б., Попов И. В. Динамика русловых потоков и русловые процессы, п. 4.5.

Рекомендации по расчету местных размывов русел, сложенных из нескальных грунтов, за креплениями средненапорных водосливных плотин (П—90—80).

Описание установки и методика выполнения эксперимента

В ЛГМИ эта работа выполняется в большом плоском лотке, в верхней части которого (рис. 5.9) смонтирована часть рисбермы с прилегающей к ней частью русла, выполненного из разнозернистого песка. Длина рисбермы 2 м, а длина нижерасположенного участка русла 3 м.

$$h = 9.7 \text{ см} \quad B = 14 \text{ см}$$

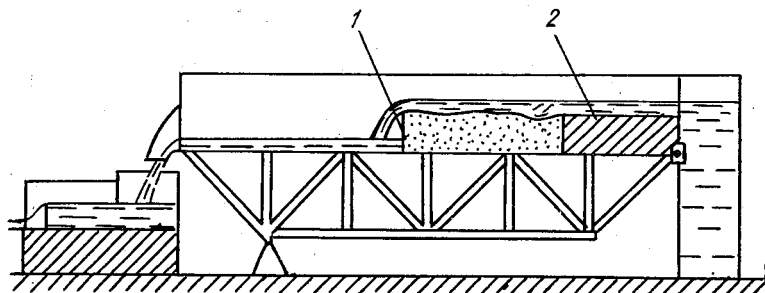


Рис. 5.9. Схема установки для изучения процесса местного размыва за рисбермой.

1 — деревянный щит, 2 — рисберма.

Измерение расходов воды на установке осуществляется с помощью мерного водослива, а измерение скоростей — трубкой Пито—Дарси или микровертушкой, закрепленной на специальной тележке, перемещающейся вдоль лотка.

Перед пуском воды на установку лабораторным нивелиром определяются отметки дна по оси потока в трех точках рисбермы (в начале, конце и посередине). Помимо этого, через 0,5 м определяются отметки песчаного дна русла (погрешность нивелировки ± 1 мм). При этом обязательно определение отметки гребня щита, расположенного в конце песчаного русла (см. рис. 5.9).

Одновременно с этим приготавливают три куска кальки длиной 1 м, шириной 25 см каждый и наклеивают их на стеклянную стенку лотка с таким расчетом, чтобы верхний край кальки был на 7 см выше линии дна. На кальку переносят линию дна и дециметровую сетку со стенок лотка.

Немедленно после пуска заданного расхода воды включается секундомер и производится фиксация свободной поверхности на кальке. В первые 30 мин фиксация отметок свободной поверхности и отметок дна производится на кальке каждые 5 мин, а в последующее время — через каждые 10 мин. Такие измерения производятся до тех пор, пока не произойдет относительная стабилизация русла в зоне местного размыва. Далее в створе, расположенном на 0,5 м выше конца рисбермы, трубкой Пито производится измерение скоростей течения на трех вертикалях трехточечным способом, положение уровня при этом фиксируется

по рейке, выполненной из миллиметровки и наклеенной в створе измерений.

В период интенсивного размыва производятся тщательные визуальные наблюдения за движением жидкости в водоворотной зоне. Изучение характера движения струй в толще потока в этой зоне производится с помощью флюгера и марганцовокислого калия (KMnO_4), а также посредством наблюдений за движением наносов. Наблюдение за движением поверхностных струй осуществляется с помощью поплавков-опилок. Наблюдения сопровождаются зарисовками-схемами.

После стабилизации дна в зоне местного размыва производится детальное измерение значения и направления скорости на вертикали, расположенной по оси в точке с наибольшей глубиной размыва. В начале и конце опыта измеряется температура и расход воды по водосливу. Продолжительность опыта не должна превышать 1 ч.

Обработка экспериментальных данных и их анализ

$I = \frac{\Delta H}{L}$ ✓ 1. По данным нивелировки определить уклон дна установки до начала эксперимента.

✓ 2. По данным измерений скоростей течения вычислить расход воды, подаваемой на установку, и сравнить его с измеренным по водосливу.

3. На основании зарисовок и визуальных наблюдений вычертить схемы линий токов в пределах водоворотной зоны.

4. По кривой механического состава песка, полученной в работе № 3.4, определить среднюю (k) и пятипроцентную (k_5) крупности наносов, формирующих дно потока.

5. Обработка калек. Определить по калкам за каждый момент времени глубину наибольшего размыва, длину зоны местного размыва, объем размыва (на единицу ширины потока), уровень воды и глубину в створе, расположенном на расстоянии $l_{\text{вр}}$ (рис. 5.3). Все данные свести в таблицу. По данным таблицы вычертить графики изменения этих параметров во времени.

6. По данным измерений скоростей на осевой вертикали в точке наибольшего размыва построить эпюру распределения скоростей по глубине потока.

7. Для периода относительной стабилизации русла вычислить максимальную глубину h_p , длину $l_{\text{вр}}$ в зоне местного размыва по формулам (5.8) — (5.15).

Подсчитать объем размыва в зоне местного размыва по формуле

$$W = 2/3 l_{\text{вр}} h_p.$$

Сравнить расчетные данные с экспериментальными. Дать анализ причин отклонений.

8. Оформить и обвести тушью мгновенные профили свободной поверхности и дна.

9. Вычислить числа Re и Fg для потока на рисберме и в створах наибольшего размыва и в конце зоны местного размыва (на расстоянии $l_{вр}$ от рисбермы) (для стабилизированного русла).

Отчетные документы

Приложения включают в себя:

- схемы линий токов в пределах водоворотной зоны,
- кривую механического состава песка,
- кальки с нанесенными на них уровнями воды и отметками дна в пределах зоны местного размыва,
- графики изменения наибольшей глубины и длины зоны местного размыва во времени,
- эпюру распределения скоростей по глубине потока на осевой вертикали в месте наибольшего размыва,
- бланки с данными опытов.

№ 5.9. Местный размыв у мостовой опоры

Общие положения приведены в лабораторной работе № 5.4, а также в учебном пособии [3] и ряде монографий [17 и др.]. Необходимо лишь подчеркнуть, что экспериментальные работы являются наиболее наглядным видом учебных занятий, позволяющим не только наблюдать за ходом деформаций, но и одновременно вскрывать и фиксировать изменения внутренней структуры потока, не забывая при этом о влиянии масштабного эффекта.

Задача работы: изучение процесса местного размыва у мостовых опор различной формы, расположенных в русле с деформируемым дном.

Литература:

Барышников Н. Б., Попов И. В. Динамика русловых потоков и русловые процессы, п. 4.6.

Журавлев М. М. Местный размыв у опор мостов, гл. 1 и 4.

Описание установки и методика выполнения эксперимента

Изготовление различных моделей опоры моста не представляется сколько-нибудь сложным и может быть выполнено в любой учебной мастерской. Поэтому целесообразно, помимо простейших моделей в виде параллелепипеда или цилиндра, сделать модели, копирующие устои мостов, встречающиеся в данном регионе. Это также позволит экспериментально проверить значения коэффициентов формы опор, в частности приведенных в монографии М. М. Журавлева [17].

Работа в ЛГМИ выполняется на экспериментальной установке, детальное описание которой приведено в лабораторной работе № 3.3. На этой установке монтируется модель опоры, план и разрез которой приведены на рис. 5.10.

Работа начинается с формирования вокруг укрепленной в лотке опоры песчаного дна высотой до 10 см. С этой целью на

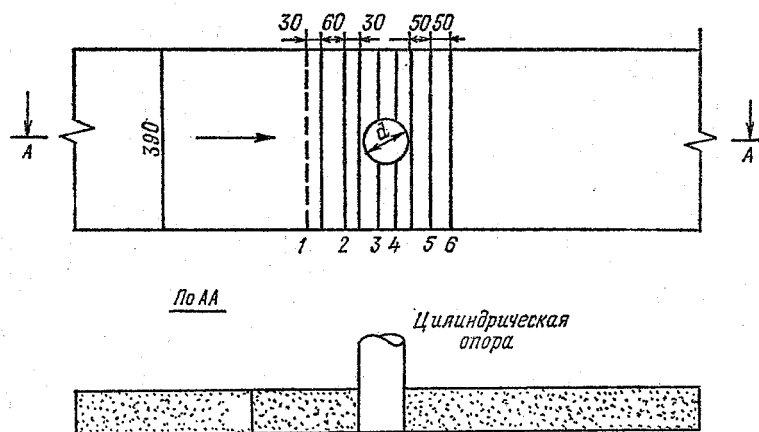


Рис. 5.10. План установки с мостовой опорой.

1 — 6 — номера створов.

жесткое дно лотка длиной 3 м насыпается насыщенный водой песок и разравнивается. Затем с помощью мерной иглы, установленной на тележке, и лабораторного нивелира определяют отметки дна около опоры по ее периметру и в створах 1—6 по пять точек в каждом створе (см. рис. 5.10).

После подачи на установку расхода воды, заданного преподавателем (при спокойном режиме), выполняются визуальные наблюдения за деформациями дна и сопутствующими им явлениями: изменением направления донных и поверхностных струй в районе опоры, размерами перемещаемых частиц наносов из района размыва и другими характеристиками.

Все визуальные наблюдения регистрируются в бланке опытов. Одновременно с визуальными наблюдениями выполняются измерения:

а) отметок свободной поверхности по периметру опоры и в пяти точках в створах 1—6;

б) скоростей на пяти вертикалях трехточечным способом в створе 1;

в) температуры воды.

Систематически, через 10 мин, проверяется стабильность подачи расхода воды на установку.

После стабилизации размыва у опоры и формирования воронки размыва опыт прекращается.

Для сохранения полученного рельефа дна необходимо одновременно с прекращением подачи воды на установку закрыть жалюзи, расположенные в конце установки. Этим обеспечивается постепенный сброс воды с установки и устраняются дополнительные, нежелательные деформации.

После сброса воды с установки необходимо выполнить следующие работы:

- а) измерить отметки песчаного дна в тех же точках, что и перед экспериментом;
- б) зарисовать на бланке — схеме установки зоны размыва и аккумуляции наносов.

Перед началом эксперимента производится отбор пробы песка для производства механического анализа ситовым методом.

Обработка экспериментальных данных и их анализ

1. Подсчитать расходы воды, измеренные гидрометрическим способом, в створе 1 и по водосливу, оценить точность измерения гидрометрическим способом.
2. Построить эпюры распределения скоростей по глубине потока.
3. Построить профиль свободной поверхности потока между створами 1 и 6.
4. Построить интегральный график механического состава песка, слагающего дно потока, и определить по нему 5 %-ную крупность k_5 .
5. Определить среднее значение крупности фракций по выражению

$$k = \sum k_i p_i / \sum p_i.$$

6. По формулам В. Н. Гончарова (3.1) и Ц. Е. Мирцхулава (3.12) вычислить значения средних и донных критических неподвижных скоростей на всех вертикалях, в которых измерялись скорости течения. Сравнить их с измеренными скоростями. Объяснить причины расхождений.

7. По данным измерений построить план деформаций русла в горизонталях. Горизонтالي провести через 0,5 см. В случае большой плотности они проводятся через 1,0 см.

8. Оформить бланки зарисовок визуальных наблюдений.

9. По формулам Муромова (5.35) — (5.39), Ярославцева (5.40), Инглиса (5.41) и (5.42), Джайна (5.43), Журавлева (5.44) и Союздорнии (5.45) и (5.46), приведенным в лабораторной работе № 5.4, подсчитать максимальную глубину размыва русла у мостовой опоры для условий опыта и для различных форм мостовых опор.

10. Выполнить сравнение и анализ расчетных и экспериментальных данных. Обратит особое внимание на характер изменения отметок свободной поверхности в различные фазы местного

размыва (до периода его стабилизации и в этот период) и при различных режимах поступления наносов (безгрядном и донногрядном) в воронку размыва. Указать основные причины несовпадения экспериментальных и расчетных по различным формулам значений глубин местного размыва.

Отчетные документы

Приложения включают:

- план рельефа свободной поверхности,
- план деформации дна в горизонталях,
- совмещенные поперечные профили песчаного дна в створах до и после размыва,
- график гранулометрического состава песка,
- эпюры распределения скоростей по глубине потока,
- бланки опытов с данными экспериментов.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

Варианты расчетного задания к лабораторной работе № 2.1

№ варианта	h_1	h_2	k_s мм	I
	см			
1	5,0	10,0	1,53	0,005
2	6,6	11,0	1,53	0,005
3	5,2	10,6	1,60	0,005
4	5,3	10,8	1,52	0,005
5	5,8	12,0	1,54	0,005
6	5,5	11,5	1,57	0,005
7	5,9	12,5	1,59	0,005
8	10,1	20,9	2,53	0,005
9	10,5	21,0	2,50	0,004
10	10,0	20,2	2,59	0,004
11	10,6	21,0	2,51	0,004
12	10,8	21,5	2,54	0,004
13	10,3	20,6	2,57	0,004
14	10,2	20,8	2,55	0,004
15	15,3	30,5	5,0	0,004
16	15,0	30,0	5,7	0,003
17	15,5	31,2	5,1	0,003
18	15,6	31,8	5,3	0,003
19	15,2	31,2	5,8	0,003
20	15,8	32,0	5,6	0,003
21	101	255	3,2	0,0005
22	100	253	3,5	0,0005
23	103	252	3,6	0,0005
24	102	250	3,7	0,0005
25	105	257	3,8	0,0005

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

Программа расчетов на языке „Бейсик”

```

10 REM ВВОД ИСХОДНЫХ ДАННЫХ
20 INPUT ' ВВЕДИТЕ ГЛУБИНУ H = ' ; H
30 INPUT ' ВВЕДИТЕ УКЛОН = ' ; I
40 INPUT ' ВВЕДИТЕ K 5 = ' ; K5
50 D = 0.7 * K5
100 INPUT ' ВВЕДИТЕ V м/с = ' ; V
110 INPUT ' ВВЕДИТЕ U м/с = ' ; U
120 INPUT ' ВВЕДИТЕ КОЭФ. ШЕЗИ C = ' ; C
200 REM ОПИСАНИЕ И ФОРМИРОВАНИЕ МАССИВА Y/H
210 DIM H1 (9)
220 FOR I = 2 TO 9
230 READ H1 (I)
240 NEXT I
250 DATA 0.1, 0.2, 0.4, 0.5, 0.6, 0.8, 0.9, 1.0
260 H1 (1) = D
270 REM РАСЧЕТ И ПЕЧАТЬ МЕСТНЫХ СКОРОСТЕЙ
280 FOR I = 1 TO 9
290 U = U * LGT (16.7 * H * H1 (I) / D + 1) / LGT (16.7 * H / D)
300 U1 = U * SQR (1 - (0.57 + 3.3 / C) * (1 - H1 (I)) ^ 2)
310 U2 = (U - 24.0 * V / C) * (1 - H1 (I)) ^ 2
320 PRINT H1 (I); ' (Г) ' ; U; U / V; ' K ' ; U1; U1 / V; ' Б ' ; U2; U2 / V
340 PRINT
400 NEXT I
500 END

```

СПИСОК ИДЕНТИФИКАТОРОВ

- H — глубина потока (м)
- I — уклон
- $K5$ — k_5 (м)
- D — шероховатость дна $\Delta=0,7K5$
- V — средняя скорость по Гончарову (м/с)
- $U\varnothing$ — максимальная скорость по Гончарову (м/с)
- C — коэффициент Шези
- $H1(1)$ — массив значений y/H
- U — местные скорости по Гончарову (м/с)
- $U1$ — местные скорости по Караушеву (м/с)
- $U2$ — местные скорости по Базену (м/с)

ИНСТРУКЦИЯ ПОЛЬЗОВАТЕЛЮ

Программа написана на языке «БЕЙСИК» версия TDM

1. Программа выполняет расчет местных скоростей потока для заданных глубин в абсолютных и относительных значениях согласно п. 2 лабораторной работы № 2.1.
 2. Рекомендуется указывать форматы печати в соответствии с используемой версией языка.
 3. При вводе данных необходимо соблюдать соответствующую размерность.
 4. При желании, возможно вычисление параметров, вводимых в строках 100—120, в самой программе (строки 100—199) или в непосредственном режиме компьютера.
 5. В теле цикла (строки 280—400) можно рассчитать изменение относительных скоростей вихрей по глубине потока (п. 2 лабораторной работы № 2.1), используя свободные строки 350—390. Вывод на печать результатов расчета п. 5 желательно завершить оператором PRINT без продолжения.
- Набор и выполнение программы занимают 15—20 мин.

ПРИЛОЖЕНИЕ 3

Данные натурных измерений скоростей в точках

ТАБЛИЦА 3.1

Эксперимент № 2

05.08.1982 г.

р. Турунчук

Вертикаль № 1

Точка № 1

$h = 2,62$ м, $T = 300$ с,

$y = 0,10$ м, $\Delta t = 1$ с

T	Мгновенная скорость, см/с											
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	24	33	37	33	22	37	26	35	33	22	28	26
2	25	35	24	35	26	35	24	33	28	22	26	27
3	22	42	26	26	26	37	26	24	28	35	22	25
4	28	44	33	26	26	37	28	37	29	31	20	28
5	22	48	37	34	33	44	24	39	26	31	24	26
6	27	50	33	39	33	44	22	33	31	30	26	24
7	27	48	28	35	26	45	26	26	26	26	26	26
8	27	67	26	35	28	39	26	33	31	20	26	35
9	33	46	37	33	28	44	22	31	31	21	27	26
10	29	37	33	35	33	28	22	31	28	22	31	35
11	29	37	28	33	33	28	22	26	33	22	24	35
12	31	37	34	37	22	24	26	28	24	26	33	37
13	42	37	28	37	25	24	35	28	26	28	33	22
14	37	44	26	37	28	28	26	33	31	31	31	31
15	42	35	35	39	26	35	26	34	24	28	31	31
16	44	28	35	33	24	28	28	28	31	22	28	36
17	46	33	35	33	22	28	33	26	31	32	22	39
18	39	31	37	26	24	34	26	25	28	28	33	39
19	37	26	37	28	24	44	33	26	26	28	28	40
20	33	24	31	33	26	44	28	26	28	33	28	42
21	24	37	26	26	22	37	28	33	28	30	26	42
22	22	44	22	24	33	28	22	31	31	35	24	42
23	27	33	34	24	24	33	26	33	31	33	24	44
24	26	33	37	22	33	28	33	24	28	26	26	33
25	33	33	33	24	26	33	26	35	20	31	33	31

ТАБЛИЦА 3.2

Эксперимент № 2

05.08.1982 г.

р. Турунчук

Вертикаль № 1

Точка № 2

$h = 2,62$ м, $T = 300$ с,

$y = 0,53$ м, $\Delta t = 1$ с

T	Мгновенная скорость, см/с											
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	37	49	45	47	37	49	39	36	39	31	41	31
2	39	47	39	49	39	47	35	26	35	31	44	27

11*

T	Мгновенная скорость, см/с											
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
3	34	47	45	49	39	47	35	28	37	35	39	27
4	28	55	43	49	39	49	43	37	35	31	39	33
5	36	55	49	47	39	46	39	43	26	31	39	39
6	43	55	47	49	39	49	37	39	28	33	40	45
7	43	49	43	49	35	39	43	45	35	39	41	55
8	39	39	39	45	33	43	45	43	35	35	39	54
9	49	47	49	47	35	43	37	37	35	33	39	49
10	47	49	54	47	35	43	39	37	33	33	45	55
11	43	47	46	47	26	45	39	37	33	37	43	51
12	43	53	49	43	33	45	37	45	31	39	33	49
13	43	54	49	45	43	45	33	43	31	48	35	39
14	43	53	49	37	39	49	37	41	31	41	35	43
15	41	49	45	45	39	43	43	37	28	31	39	47
16	37	49	43	45	39	45	45	37	24	37	33	51
17	37	45	47	45	45	47	47	43	24	40	37	53
18	47	45	47	43	44	45	43	55	28	40	28	51
19	43	45	47	39	57	45	39	49	31	39	28	45
20	49	43	47	37	57	45	37	41	27	39	30	47
21	49	45	43	39	55	43	35	37	27	41	27	47
22	47	43	45	35	55	43	43	31	28	41	31	41
23	49	45	47	39	49	37	49	33	31	45	28	43
24	53	45	49	37	49	39	49	37	28	41	31	43
25	53	43	47	39	49	39	43	39	27	48	27	45

ТАБЛИЦА 3.3

Эксперимент № 2

05.08.1982 г.

р. Турнчук

 $h = 2,62 \text{ м}, T = 300 \text{ с.}$

Вертикаль № 1

 $y = 1,05 \text{ м}, \Delta t = 1 \text{ с}$

Точка № 3

T	Мгновенная скорость, см/с											
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	56	47	50	56	52	60	41	52	41	45	53	44
2	56	43	54	56	56	58	43	52	47	43	52	46
3	54	47	56	54	54	58	45	52	52	43	50	52
4	54	56	56	58	52	54	45	43	47	45	41	51
5	54	56	52	62	45	54	45	41	50	45	36	52
6	52	58	58	58	43	52	45	41	45	41	45	60
7	56	45	54	60	34	52	41	47	41	44	45	55
8	56	47	52	54	34	52	43	50	41	43	52	53
9	55	56	47	54	34	56	45	52	39	45	55	53
10	56	54	47	52	34	56	50	47	36	47	56	50
11	56	54	46	53	34	56	50	52	35	45	52	50
12	56	52	46	54	43	53	60	47	30	44	56	47
13	58	54	45	56	43	52	52	50	30	47	52	50
14	56	60	52	58	47	52	52	52	34	52	51	50
15	58	54	56	43	45	52	52	49	45	52	41	47
16	53	52	54	52	55	52	54	47	32	52	41	52

T	Мгновенная скорость, см/с											
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
17	56	47	52	54	54	47	47	43	32	47	36	52
18	58	50	52	54	58	47	52	44	32	50	32	43
19	56	45	52	52	56	43	52	43	39	45	36	45
20	50	53	52	52	54	41	47	45	30	52	38	43
21	43	56	54	52	56	34	45	52	32	47	41	47
22	52	56	53	53	47	34	41	50	36	54	41	50
23	45	53	56	47	54	45	45	46	45	56	41	47
24	44	52	56	45	52	44	43	45	45	56	39	52
25	50	47	54	52	52	45	47	39	50	54	43	54

ТАБЛИЦА 3.4

Эксперимент № 2

05.08.1982 г.

р. Турунчук

 $h = 2,62$ м, $T = 300$ с,

Вертикаль № 1

 $y = 2,09$ м, $\Delta t = 1$ с

Точка № 4

T	Мгновенная скорость, см/с											
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	59	44	54	56	49	56	41	56	52	59	54	56
2	54	43	56	60	47	50	43	47	49	61	53	59
3	55	45	56	56	50	50	47	54	54	61	56	57
4	54	41	61	59	52	50	50	52	56	61	54	52
5	54	47	60	55	52	52	52	50	57	61	56	55
6	54	43	56	52	50	59	56	47	57	60	60	54
7	50	47	56	54	47	56	47	54	54	56	59	57
8	50	45	50	52	47	54	50	59	50	61	59	55
9	52	50	54	52	47	45	50	56	47	57	55	56
10	52	43	53	54	43	52	50	59	50	61	53	56
11	49	54	45	54	44	52	50	59	52	61	54	52
12	49	53	46	56	50	53	47	54	57	59	55	50
13	52	56	47	59	50	56	50	57	56	55	55	52
14	50	56	47	63	45	52	50	57	54	56	55	50
15	51	56	56	59	47	45	56	59	50	56	52	52
16	54	56	52	54	41	45	56	59	54	54	52	52
17	54	54	56	45	47	52	54	66	54	54	54	52
18	54	56	52	56	52	52	56	57	57	54	52	54
19	54	54	49	45	52	54	59	61	52	52	54	54
20	52	56	47	54	45	54	56	59	54	54	52	52
21	45	56	50	52	43	50	59	54	56	56	56	47
22	45	56	54	50	50	50	65	47	56	54	55	49
23	47	56	56	50	54	45	56	54	55	55	52	54
24	50	54	59	50	52	45	57	52	54	55	54	54
25	47	54	56	50	55	45	61	52	56	50	54	52

ТАБЛИЦА 3.5

Эксперимент № 2

05.08.1982 г.

р. Турунчук

Вертикаль № 1

Точка № 5

 $h = 2,62$ м, $T = 300$ с, $y = 2,42$ м, $\Delta t = 1$ с

T	Мгновенная скорость, см/с											
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	55	47	57	55	55	49	53	63	55	61	57	58
2	55	43	57	55	53	47	51	59	56	61	59	57
3	55	43	55	57	53	57	49	55	57	62	59	57
4	57	43	55	55	59	65	49	55	58	53	57	57
5	55	43	57	55	53	65	53	55	59	59	59	59
6	55	43	55	54	49	57	53	55	55	60	60	57
7	53	45	53	53	53	63	57	55	53	60	59	63
8	53	47	57	49	53	61	55	55	53	59	59	61
9	53	53	55	47	53	55	53	53	53	61	59	63
10	53	53	57	49	53	55	49	55	53	61	57	59
11	51	55	56	53	47	55	53	55	51	61	57	63
12	53	55	56	53	45	56	51	47	55	59	57	63
13	51	57	59	53	49	56	55	57	61	59	56	57
14	51	63	47	53	47	57	55	57	61	57	59	57
15	59	63	49	59	49	59	55	57	61	57	61	59
16	59	59	49	59	49	59	53	57	61	57	60	59
17	55	56	57	57	55	47	44	51	61	58	59	61
18	55	53	55	55	49	55	57	54	59	59	57	61
19	49	53	47	55	47	55	57	56	61	55	55	63
20	49	53	45	57	49	55	57	63	57	57	55	59
21	47	55	49	55	49	59	49	63	59	55	55	53
22	46	55	55	55	54	57	55	59	59	55	59	51
23	49	55	55	55	54	63	55	56	57	55	55	53
24	47	57	55	55	54	59	63	55	59	55	57	53
25	49	57	57	55	54	55	65	55	60	57	57	55

ТАБЛИЦА 3.

Эксперимент № 2

05.08.1982 г.

р. Турунчук

Вертикаль № 2

Точка № 1

 $h = 7,15$ м, $T = 300$ с, $y = 0,10$ м, $\Delta t = 1$ с

T	Мгновенная скорость, см/с											
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	33	35	28	33	35	42	33	27	24	38	22	33
2	28	33	28	27	31	42	33	24	24	33	32	30
3	39	34	28	28	30	46	35	28	20	33	21	34

T	Мгновенная скорость, см/с											
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
4	33	35	22	28	32	41	38	33	20	25	23	31
5	28	38	20	28	33	32	34	41	24	27	23	27
6	33	34	21	26	35	41	31	42	32	25	26	30
7	34	36	26	26	31	38	44	35	23	23	31	30
8	28	35	33	47	31	33	39	32	24	31	38	24
9	34	35	33	47	33	31	39	38	28	35	45	36
10	31	35	33	41	33	35	42	39	30	35	31	46
11	28	33	31	39	33	31	46	33	20	46	37	26
12	39	32	31	35	33	34	46	32	26	39	28	32
13	39	33	31	33	31	32	44	31	26	38	28	33
14	44	33	31	33	32	31	42	35	30	38	28	30
15	39	39	28	35	34	34	37	35	28	31	30	24
16	44	28	28	33	31	44	36	35	31	37	33	24
17	44	37	37	39	33	44	42	38	33	37	36	22
18	42	26	33	37	45	35	40	39	31	37	24	23
19	42	28	24	36	42	39	36	38	31	39	31	27
20	47	26	39	35	46	30	31	33	31	25	26	33
21	44	26	31	30	44	31	31	34	31	25	26	34
22	42	22	28	39	43	33	35	36	28	22	25	31
23	44	20	28	41	42	42	31	31	37	37	24	32
24	44	26	33	42	38	28	44	26	35	24	23	32
25	46	31	26	35	42	33	28	24	38	24	22	32

ТАБЛИЦА 3.7

Эксперимент № 2

05.08.1982 г.

р. Турунчук
Вертикаль № 2 $h = 7,15 \text{ м}$, $T = 300 \text{ с}$,

Точка № 2

 $y = 1,43 \text{ м}$, $\Delta t = 1 \text{ с}$

T	Мгновенная скорость, см/с											
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	53	49	45	35	41	35	47	43	34	43	26	32
2	47	47	49	36	35	41	43	43	34	41	24	31
3	51	53	47	35	35	43	49	44	37	35	24	33
4	51	47	47	33	45	44	48	47	32	33	27	37
5	53	49	39	28	41	47	47	42	35	37	22	47
6	49	36	40	33	41	46	46	42	32	43	26	49
7	37	37	34	33	44	45	43	46	34	45	33	50
8	31	37	33	49	41	49	44	45	34	51	37	49
9	39	43	33	45	45	45	43	45	28	45	35	44
10	33	45	28	47	45	45	43	43	36	43	37	45
11	37	49	37	47	42	51	47	36	37	43	37	46
12	37	51	33	49	46	41	51	37	36	41	28	43
13	43	49	31	48	43	45	51	41	39	50	28	35
14	47	41	33	51	43	43	54	40	45	49	37	40
15	44	49	31	51	39	49	57	39	49	49	30	45
16	42	39	33	45	41	45	52	39	47	45	33	43

T	Мгновенная скорость, см/с											
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
17	39	37	37	48	41	41	54	37	45	47	36	40
18	44	39	39	49	40	40	54	36	43	47	39	35
19	41	39	39	40	43	40	59	37	43	41	42	35
20	39	39	33	35	39	41	47	35	45	41	40	39
21	37	37	39	38	45	36	49	34	46	45	38	39
22	46	37	37	39	43	39	52	36	45	45	35	41
23	43	39	35	39	41	41	48	43	48	45	31	37
24	47	46	35	41	41	45	43	43	43	35	34	37
25	45	41	37	41	41	49	33	37	43	28	33	32

ТАБЛИЦА 3.8

Эксперимент № 2

05.08.1982 г.

р. Турунчук
Вертикаль № 2
Точка № 3

$h = 7,15$ м, $T = 300$ с,
 $y = 2,86$ м, $\Delta t = 1$ с

T	Мгновенная скорость, см/с											
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	58	64	58	56	68	60	64	64	72	61	58	57
2	64	58	61	54	68	64	68	63	69	63	59	62
3	62	57	59	54	62	66	69	64	68	67	59	66
4	60	56	58	58	62	67	67	65	67	66	61	61
5	52	58	56	63	60	66	66	64	66	64	64	66
6	47	60	56	60	58	66	64	64	64	64	59	65
7	58	66	56	62	58	64	58	62	64	65	60	67
8	62	68	56	58	60	66	62	62	65	63	56	68
9	58	58	58	58	60	66	68	60	66	62	50	69
10	60	60	60	58	60	69	64	62	64	64	42	67
11	60	62	56	60	57	70	62	63	65	64	51	64
12	56	62	56	60	52	72	62	64	66	62	54	63
13	60	62	54	60	55	73	59	63	66	62	52	62
14	58	62	52	62	56	75	61	64	66	62	56	64
15	56	56	52	64	61	75	62	66	66	61	51	65
16	55	58	47	62	63	70	64	68	64	66	49	66
17	55	60	49	66	67	70	64	68	62	65	50	69
18	56	60	54	64	64	69	61	68	64	65	52	66
19	64	62	56	65	60	72	60	66	62	64	54	65
20	64	58	54	64	55	70	57	67	62	54	69	65
21	58	58	58	68	54	66	60	65	60	56	58	62
22	63	58	56	68	56	63	62	64	58	58	58	62
23	67	58	60	68	56	64	64	67	59	60	60	60
24	66	52	60	68	58	67	67	67	60	62	57	64
25	64	54	58	68	62	66	66	67	61	61	54	62

ТАБЛИЦА 3.9

Эксперимент № 2

05.08.1982 г.

р. Турунчук
Вертикаль № 2
Точка № 4

 $h=7,15$ м, $T=300$ с, $y=5,72$ м, $\Delta t=1$ с

T	Мгновенная скорость, см/с											
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	67	63	63	63	65	67	63	56	63	63	59	67
2	63	63	61	63	70	67	64	59	64	64	57	67
3	65	63	61	63	70	65	62	57	64	63	56	65
4	63	63	61	65	72	67	59	56	63	64	55	64
5	63	61	59	65	72	65	56	56	63	64	54	61
6	63	63	57	70	73	66	53	59	62	65	56	64
7	59	63	57	72	71	69	64	55	65	65	56	66
8	59	63	59	72	67	70	56	57	62	63	59	65
9	59	63	59	61	67	70	56	59	63	63	59	64
10	59	65	61	65	67	67	59	56	63	64	56	63
11	57	52	61	63	69	69	60	55	62	65	56	63
12	65	65	61	63	69	70	46	57	63	64	56	62
13	57	65	59	61	67	67	61	57	63	65	56	63
14	59	63	57	63	67	69	60	57	63	63	52	63
15	59	61	67	63	69	66	59	62	63	67	50	63
16	59	61	61	63	70	67	61	63	63	66	47	63
17	63	61	67	65	70	65	57	67	63	67	45	63
18	62	59	61	66	72	65	59	66	61	66	56	62
19	65	55	63	66	69	66	59	69	61	66	59	61
20	65	54	63	66	72	67	61	67	63	61	61	62
21	65	63	63	65	73	69	60	65	62	61	66	61
22	64	65	61	67	73	63	59	67	63	63	66	60
23	63	61	61	65	72	65	59	70	62	60	65	60
24	61	63	59	65	70	65	60	66	63	57	66	61
25	63	63	63	65	67	63	61	65	63	59	66	61

ТАБЛИЦА 3.10

Эксперимент № 2.

05.08.1982 г.

р. Турунчук
Вертикаль № 2
Точка № 5

 $h=7,15$ м, $T=300$ с, $y=6,95$ м, $\Delta t=1$ с

T	Мгновенная скорость, см/с											
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	67	65	59	73	65	68	62	65	63	66	56	67
2	65	63	57	69	67	71	63	67	63	67	61	67
3	63	64	60	69	69	69	63	69	60	65	62	67

T	Мгновенная скорость, см/с											
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
4	63	63	59	69	69	68	62	66	60	67	60	68
5	61	59	59	67	67	67	63	65	61	67	63	68
6	60	61	63	69	67	67	63	65	65	67	63	68
7	59	61	57	69	67	72	53	64	65	65	65	66
8	57	61	57	69	65	71	65	61	66	65	63	65
9	59	61	59	67	65	69	63	64	63	65	63	63
10	59	61	63	67	65	70	65	65	63	64	63	63
11	61	63	63	67	65	68	63	64	64	65	64	62
12	61	63	67	67	69	68	63	64	62	65	65	63
13	61	63	63	66	68	66	63	63	62	67	66	65
14	61	63	63	63	67	64	62	64	63	67	67	64
15	65	63	61	65	67	65	61	67	63	65	69	65
16	62	61	66	65	69	65	62	69	61	67	67	63
17	62	61	66	67	70	63	63	67	59	66	67	63
18	64	56	69	67	71	65	59	69	61	54	58	65
19	65	55	67	66	71	63	58	67	60	68	67	65
20	65	55	67	65	70	65	58	66	63	59	67	67
21	64	59	63	63	70	65	56	68	64	57	66	66
22	64	57	69	63	72	63	61	67	63	57	68	64
23	64	53	69	65	71	65	63	64	65	61	68	65
24	64	53	67	67	70	64	62	63	65	62	67	65
25	65	55	69	67	69	63	65	65	66	59	69	65

ТАБЛИЦА 3.11

Эксперимент № 2

05.08.1982 г.

р. Турнчук

 $h = 6,51$ м, $T = 300$ с,

Вертикаль № 3

 $y = 0,10$ м, $\Delta t = 1$ с

Точка № 1

T	Мгновенная скорость, см/с											
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	35	41	41	42	33	35	32	39	34	30	43	33
2	64	38	41	38	34	39	37	41	35	25	39	32
3	41	37	37	35	39	42	34	42	44	34	45	31
4	38	34	34	35	44	42	37	39	44	28	41	26
5	40	41	44	37	42	33	35	35	39	32	35	31
6	35	42	45	41	44	36	37	39	45	30	33	30
7	33	39	46	42	47	38	34	48	41	35	34	42
8	31	41	47	39	44	44	36	45	44	36	32	38
9	33	37	39	45	44	37	35	50	39	36	27	44
10	39	39	39	42	42	33	33	48	39	35	32	42
11	42	35	39	45	39	37	37	49	37	37	31	48
12	37	39	41	46	37	38	41	43	36	39	35	42
13	41	39	41	46	35	45	36	43	35	39	39	41
14	38	42	35	48	35	38	39	42	33	34	39	46
15	36	37	45	48	34	38	35	39	34	39	37	41

T	Мгновенная скорость, см/с											
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
16	37	39	46	38	33	37	33	44	37	35	35	38
17	46	37	46	37	33	37	32	44	38	33	31	44
18	39	42	48	36	32	43	30	42	41	31	44	44
19	39	41	41	38	33	43	33	42	46	38	44	46
20	46	36	48	31	34	42	33	39	42	35	42	43
21	45	36	46	35	36	39	36	38	34	33	38	46
22	48	46	53	35	42	35	31	36	36	33	42	48
23	48	47	50	37	42	35	31	37	38	37	44	44
24	47	42	50	38	37	30	42	31	38	43	42	42
25	45	37	46	43	33	28	43	34	34	45	38	43

ТАБЛИЦА 3.12

Эксперимент № 2

05.08.1982 г.

р. Турнчук

 $h=6,51$ м, $T=300$ с,

Вертикаль № 3

 $y=1,31$ м, $\Delta t=1$ с

Точка № 2

T	Мгновенная скорость, см/с											
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	47	59	60	51	57	45	51	55	54	53	45	58
2	49	52	62	54	53	43	51	57	53	51	47	56
3	47	60	61	58	51	40	51	58	55	51	47	55
4	50	59	64	57	51	42	51	59	53	55	47	51
5	51	53	61	55	52	39	51	55	54	59	49	52
6	49	55	60	53	50	44	53	55	51	53	49	51
7	48	56	59	53	51	43	55	55	53	61	48	49
8	53	56	56	53	50	43	53	55	45	59	55	53
9	51	50	55	54	46	46	54	51	47	63	50	55
10	61	51	59	55	49	45	53	55	47	61	48	49
11	61	55	58	54	51	47	53	53	43	56	47	51
12	55	56	64	53	53	49	58	51	49	56	45	55
13	61	59	63	54	56	51	61	52	45	56	45	47
14	60	56	63	55	58	53	55	50	52	56	45	51
15	59	54	59	53	54	57	49	51	52	57	41	53
16	56	57	59	51	56	56	57	47	50	57	42	53
17	55	55	60	49	54	53	54	49	50	56	41	51
18	57	55	62	51	54	49	54	48	51	53	51	49
19	59	56	60	51	57	49	55	50	45	48	49	49
20	58	54	57	53	56	50	55	51	43	52	43	47
21	61	58	55	55	55	48	57	55	48	57	40	41
22	59	57	47	55	53	47	59	53	45	53	44	45
23	50	58	47	53	53	47	56	53	45	53	52	49
24	57	59	51	54	49	49	54	54	45	53	55	47
25	56	60	45	56	48	51	55	53	49	47	56	53

ТАБЛИЦА 3.13

Эксперимент № 2

05.08.1982 г.

р. Турунчук
Вертикаль № 3
Точка № 3

 $h = 6,51 \text{ м}, T = 300 \text{ с},$ $y = 2,60 \text{ м}, \Delta t = 1 \text{ с}$

T	Мгновенная скорость, см/с											
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	56	58	62	60	55	52	53	62	64	66	56	64
2	57	56	65	64	52	49	55	62	64	65	56	66
3	61	58	67	63	56	54	56	61	62	62	62	64
4	54	55	66	62	52	44	60	62	64	62	61	64
5	60	56	66	62	53	45	63	62	64	59	58	64
6	59	64	64	57	54	46	63	62	62	63	69	64
7	56	66	58	59	52	47	62	62	62	62	57	54
8	52	68	61	56	49	47	66	58	59	63	55	47
9	58	69	58	58	56	52	64	60	60	62	56	54
10	60	65	57	60	58	54	64	56	64	58	58	47
11	62	64	59	58	58	50	63	54	62	56	54	47
12	64	64	61	56	58	56	64	50	61	57	57	54
13	64	62	62	55	57	60	60	54	60	56	62	50
14	63	65	62	57	58	56	62	58	61	54	54	58
15	64	63	64	58	56	55	59	58	61	54	55	54
16	63	60	63	57	56	52	58	54	57	58	52	52
17	63	62	61	58	58	57	58	52	57	59	51	52
18	60	58	61	60	60	54	55	52	60	58	52	52
19	60	63	62	64	59	55	54	54	63	54	54	54
20	64	65	60	64	58	54	57	54	64	53	57	56
21	62	66	59	56	55	52	56	64	62	54	58	54
22	59	64	58	58	51	54	60	61	60	58	60	54
23	62	63	58	56	52	58	60	64	62	58	60	50
24	59	64	58	55	50	56	58	64	63	56	62	52
25	60	64	58	56	47	52	61	60	65	56	64	52

ТАБЛИЦА 3.14

Эксперимент № 2

05.08.1982 г.

р. Турунчук
Вертикаль № 3
Точка № 4

 $h = 6,51 \text{ м}, T = 300 \text{ с},$ $y = 5,21 \text{ м}, \Delta t = 1 \text{ с}$

T	Мгновенная скорость, см/с											
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	55	56	65	63	59	56	59	61	70	56	66	64
2	55	59	61	65	59	57	62	63	67	54	61	57
3	53	62	61	63	55	56	61	63	63	59	65	67

T	Мгновенная скорость, см/с											
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
4	54	63	61	63	56	55	64	61	62	56	62	65
5	56	63	62	63	57	54	67	61	61	57	62	65
6	53	63	63	61	55	53	65	60	57	59	57	65
7	52	62	62	59	55	54	63	59	57	59	51	50
8	56	63	61	60	52	53	62	60	59	61	56	47
9	56	63	61	59	59	56	61	59	61	63	59	47
10	59	63	61	57	59	59	59	61	59	63	57	45
11	59	63	60	56	59	63	59	63	59	63	59	47
12	57	61	57	57	61	59	60	62	60	61	59	47
13	60	60	59	55	60	60	57	63	59	57	62	47
14	60	61	59	52	59	59	57	65	59	57	63	45
15	62	60	57	52	60	59	56	65	56	61	63	52
16	61	59	56	52	61	59	56	64	57	61	63	54
17	59	59	59	52	61	54	55	65	55	61	60	52
18	60	59	57	55	61	56	55	65	52	57	61	52
19	61	59	55	56	61	55	59	64	50	57	60	52
20	60	59	57	59	62	56	61	65	50	59	61	54
21	61	60	56	61	63	57	61	63	50	59	61	61
22	61	61	61	60	63	61	64	63	53	59	61	65
23	60	62	61	60	60	62	62	67	53	61	61	63
24	56	64	63	59	60	62	63	66	53	61	62	61
25	54	65	63	60	57	63	62	70	54	65	63	57

ТАБЛИЦА 3.15

Эксперимент № 2

05.08.1982 г.

р. Турунчук

 $h=6,51$ м, $T=300$ с,

Вертикаль № 3

 $y=6,31$ м, $\Delta t=1$ с

Точка № 5

T	Мгновенная скорость, см/с											
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	61	69	71	65	62	60	65	65	67	52	65	64
2	61	65	71	65	63	61	65	66	63	51	63	65
3	52	64	72	64	61	61	65	65	63	57	63	65
4	63	64	68	65	63	63	67	67	65	61	62	65
5	67	63	67	63	63	66	68	67	65	59	61	65
6	67	65	63	63	65	63	71	69	63	58	63	65
7	67	65	63	60	65	62	70	68	62	55	61	65
8	61	65	62	57	65	57	67	67	65	58	61	59
9	59	67	61	56	61	60	67	67	64	61	60	63
10	64	68	58	57	62	61	65	69	65	65	61	61
11	64	68	58	60	61	75	64	67	63	67	62	55
12	64	69	59	63	61	69	65	69	65	62	64	61
13	64	65	59	65	61	61	65	67	65	64	63	58
14	65	64	59	67	60	61	65	68	62	59	63	59
15	66	62	59	65	58	63	65	67	63	59	65	55

T	Мгновенная скорость, см/с											
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
16	66	59	60	65	59	63	67	70	64	61	65	63
17	66	64	59	65	61	64	69	68	60	63	66	65
18	65	65	62	65	61	65	67	67	59	63	66	61
19	63	64	62	63	64	63	64	68	57	62	63	65
20	66	64	61	65	59	63	63	68	56	61	64	65
21	63	65	57	61	59	63	63	67	56	63	63	61
22	65	65	59	65	61	63	62	65	55	65	63	67
23	67	60	61	64	65	64	65	63	52	65	65	59
24	68	60	63	62	65	64	65	62	52	66	65	63
25	71	67	63	65	65	63	65	60	51	64	67	63

ТАБЛИЦА 3.16

Эксперимент № 2

05.08.1982 г.

р. Турунчук
Вертикаль № 4
Точка № 1

$h=5,83$ м, $T=300$ с,
 $y=0,10$ м, $\Delta t=1$ с

T	Мгновенная скорость, см/с											
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	32	34	41	20	28	37	28	35	31	19	25	26
2	25	42	42	24	35	20	34	50	27	20	30	16
3	26	28	32	26	28	24	38	42	26	20	28	22
4	31	36	33	21	31	28	41	33	37	28	33	21
5	34	33	23	21	36	24	38	30	33	28	39	22
6	50	37	35	31	33	25	31	33	39	34	44	24
7	46	28	24	28	37	17	28	33	42	35	31	26
8	47	22	37	26	39	21	20	30	35	34	34	27
9	44	31	39	33	38	33	31	26	39	26	34	20
10	44	33	41	34	46	30	35	36	41	24	30	22
11	30	39	34	33	36	33	34	46	37	32	34	33
12	28	42	26	31	41	31	28	26	34	24	31	30
13	26	28	37	37	36	30	25	37	34	22	33	24
14	33	20	32	30	37	23	24	39	56	12	33	22
15	39	25	24	23	47	24	28	33	54	15	33	26
16	34	28	22	27	48	22	26	26	56	22	45	37
17	32	26	31	21	35	33	24	33	31	25	28	27
18	24	39	35	26	41	35	32	27	42	26	28	27
19	26	46	31	20	44	21	28	21	34	20	27	34
20	37	45	33	22	45	24	31	23	28	22	23	30
21	37	44	30	17	41	28	22	28	26	25	31	33
22	28	39	28	20	42	26	26	36	27	24	31	33
23	31	39	26	21	35	31	28	35	28	28	30	35
24	28	46	24	24	33	28	22	36	24	24	24	35
25	27	46	28	33	46	31	35	31	21	24	24	33

ТАБЛИЦА 3.17

Эксперимент № 2

05.08.1982 г.

р. Турунчук
Вертикаль № 4
Точка № 2

$h = 5,83$ м, $T = 300$ с,
 $y = 1,17$ м, $\Delta t = 1$ с

T	Мгновенная скорость, см/с											
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	55	59	53	59	57	57	61	63	63	57	66	63
2	61	59	57	61	61	53	60	64	58	55	66	62
3	61	57	59	58	58	49	59	63	55	57	66	59
4	63	61	61	61	51	54	62	61	55	57	61	66
5	61	56	64	61	53	58	61	61	59	53	61	61
6	60	68	66	63	55	59	60	59	59	53	55	63
7	61	67	61	63	57	58	63	63	55	55	58	70
8	62	61	59	63	57	57	63	63	61	51	60	61
9	61	59	58	62	55	59	63	63	59	51	61	61
10	64	66	59	67	55	63	62	61	61	57	58	63
11	66	66	61	70	55	63	66	59	61	55	56	64
12	68	67	57	68	57	61	59	61	59	43	57	59
13	68	61	58	63	63	55	57	61	56	47	67	53
14	70	58	61	63	61	53	58	55	54	47	66	51
15	69	60	57	61	67	49	59	64	55	55	66	57
16	68	58	59	61	59	47	61	68	54	56	66	57
17	70	58	59	61	63	53	63	68	53	46	63	57
18	62	59	59	59	68	55	68	70	53	57	67	55
19	63	56	61	60	66	55	66	63	48	51	63	57
20	59	53	59	55	59	56	66	64	47	51	61	61
21	51	51	55	53	66	61	59	61	54	53	61	61
22	61	49	61	47	59	59	59	61	56	60	61	63
23	59	54	57	49	60	55	61	60	57	66	61	61
24	57	57	53	59	60	59	64	66	57	66	60	61
25	57	59	61	63	61	61	64	63	59	66	59	61

ТАБЛИЦА 3.1

Эксперимент № 2

05.08.1982 г.

р. Турунчук
Вертикаль № 4
Точка № 3

$h = 5,83$ м, $T = 300$ с,
 $y = 2,33$ м, $\Delta t = 1$ с

T	Мгновенная скорость, см/с											
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	60	52	60	58	45	51	53	58	58	55	58	56
2	61	52	63	60	50	51	56	57	60	52	59	57
3	60	57	60	60	50	60	55	56	62	55	60	56

T	Мгновенная скорость, см/с											
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
4	58	58	62	60	49	58	58	55	58	56	60	53
5	61	60	58	60	52	56	58	56	58	58	60	56
6	61	61	62	60	51	59	58	54	60	55	59	52
7	64	60	63	60	55	61	54	58	60	57	60	57
8	62	62	63	60	50	56	58	59	57	56	57	57
9	61	60	61	59	51	57	58	58	54	54	58	56
10	61	65	61	60	51	59	58	59	55	52	58	56
11	62	66	61	59	55	61	58	59	54	59	61	57
12	62	63	59	60	58	58	61	61	54	58	58	58
13	61	61	57	61	56	55	60	62	58	62	58	54
14	64	57	54	59	60	57	59	60	56	58	58	56
15	62	58	57	58	58	58	58	59	53	57	57	56
16	56	58	56	59	59	56	57	57	53	61	56	57
17	58	58	61	57	58	57	57	57	56	64	54	57
18	60	60	60	58	56	56	60	50	54	64	54	58
19	56	60	62	60	56	58	58	59	56	62	54	56
20	52	62	58	60	62	60	60	56	56	62	52	54
21	62	59	55	51	60	58	56	55	55	57	52	54
22	60	55	54	52	60	56	58	56	54	58	51	56
23	59	51	60	53	53	56	58	58	58	58	50	56
24	62	57	55	47	60	54	58	57	56	57	52	54
25	58	57	60	49	54	55	58	58	53	57	52	54

ТАБЛИЦА 3.19

Эксперимент № 2

05.08.1982 г.

р. Турунчук

 $h = 5,83$ м, $T = 300$ с,

Вертикаль № 4

 $y = 4,66$ м, $\Delta t = 1$ с

Точка № 4

T	Мгновенная скорость, см/с											
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	70	63	66	61	63	63	63	57	63	61	62	62
2	67	61	65	60	61	62	61	57	60	63	63	61
3	64	63	65	60	65	61	60	59	63	57	63	56
4	64	61	65	56	66	63	59	56	62	59	61	62
5	65	61	66	56	65	61	59	55	62	60	61	61
6	64	61	65	61	64	60	56	57	61	59	62	60
7	65	63	64	61	64	61	55	59	63	56	60	65
8	64	63	63	60	65	59	56	57	61	56	62	59
9	65	63	65	60	63	59	56	61	63	59	59	63
10	64	65	63	59	61	61	59	61	63	59	60	63
11	63	63	63	59	61	63	59	61	63	56	61	57
12	65	63	63	61	61	63	61	60	61	57	59	63
13	66	63	63	61	61	63	60	64	61	65	61	54
14	66	60	63	56	61	62	60	61	61	62	61	59
15	65	62	63	59	62	63	61	59	63	59	61	59

T	Мгновенная скорость, см/с											
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
16	63	63	63	59	67	60	61	61	63	61	65	56
17	63	63	61	61	59	59	63	62	64	60	61	59
18	64	64	62	61	59	57	60	63	65	59	63	55
19	63	63	61	62	61	61	61	59	64	60	61	64
20	63	61	65	61	61	62	61	59	62	59	61	59
21	62	61	64	61	60	61	61	56	61	61	61	65
22	61	63	65	59	61	56	59	61	63	61	60	65
23	63	65	61	64	62	60	63	60	63	62	60	62
24	60	66	59	63	62	61	59	61	59	61	62	53
25	63	67	61	65	62	61	60	63	59	61	61	63

ТАБЛИЦА 3.20

Эксперимент № 2

05.08.1982 г.

р. Турунчук

 $h=5,83$ м, $T=300$ с,

Вертикаль № 4

 $y=5,63$ м, $\Delta t=1$ с

Точка № 5

T	Мгновенная скорость, см/с											
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	66	61	67	57	65	61	63	68	65	61	63	59
2	66	61	65	58	65	58	63	64	66	62	61	59
3	66	63	66	58	65	59	57	64	61	64	59	59
4	68	64	63	62	64	57	63	60	51	62	59	57
5	65	61	66	61	66	61	59	60	63	65	63	64
6	67	62	63	62	63	59	59	59	61	64	65	61
7	65	61	64	61	65	60	64	61	63	65	58	67
8	65	63	63	61	63	62	63	59	61	63	59	63
9	65	63	62	60	64	61	64	59	63	71	59	63
10	65	64	65	59	65	62	65	60	63	67	61	63
11	65	64	64	61	63	61	68	58	62	65	59	55
12	65	64	66	59	62	61	65	62	63	64	63	61
13	66	62	65	63	62	62	66	61	62	65	61	55
14	63	62	65	67	61	63	65	63	63	60	61	57
15	65	63	63	68	63	63	60	64	63	63	63	61
16	64	63	62	64	63	65	60	64	65	65	60	60
17	64	62	62	63	59	66	62	65	65	63	63	61
18	65	61	61	63	61	65	61	63	63	65	62	55
19	63	61	63	63	65	63	63	63	63	61	59	64
20	62	63	61	63	60	66	63	60	65	63	60	55
21	61	62	63	63	63	65	59	59	65	63	61	55
22	60	63	63	59	63	69	63	59	68	63	58	57
23	60	63	61	59	63	65	59	61	65	62	65	51
24	61	65	60	60	60	68	58	62	61	63	63	57
25	61	63	61	64	58	67	60	63	63	59	64	55

ТАБЛИЦА 3.21

Эксперимент № 2

05.08.1982 г.

р. Турунчук
Вертикаль № 5
Точка № 1

$h = 6,40$ м, $T = 300$ с,
 $y = 0,10$ м, $\Delta t = 1$ с

T	Мгновенная скорость, см/с											
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	38	49	45	42	46	42	37	46	38	35	39	49
2	34	42	39	43	46	48	35	41	35	32	39	50
3	31	48	35	43	44	45	35	49	55	39	45	48
4	33	44	31	48	44	37	46	53	31	38	52	46
5	35	48	33	49	39	39	45	50	35	39	38	43
6	35	47	45	55	44	44	46	49	48	31	50	41
7	35	36	43	45	39	39	45	55	45	24	46	37
8	37	36	45	45	39	34	50	54	33	26	44	37
9	38	36	49	45	33	35	50	53	35	26	44	37
10	41	43	52	49	36	42	48	53	38	35	42	37
11	42	46	37	48	38	36	52	45	37	33	49	39
12	48	46	39	52	38	35	52	43	39	28	42	35
13	46	46	42	53	39	39	47	46	37	33	42	33
14	39	38	35	49	37	41	50	55	31	32	44	31
15	42	38	35	59	38	47	46	49	25	27	44	46
16	38	41	37	61	39	43	52	47	31	33	53	48
17	44	41	37	56	39	38	49	54	35	28	43	46
18	42	39	41	54	35	41	48	54	31	28	39	41
19	38	38	39	50	29	42	48	48	45	42	46	44
20	43	33	36	55	37	49	56	46	46	43	50	43
21	41	44	33	55	35	46	53	44	48	48	38	37
22	35	46	33	55	28	48	52	38	46	52	38	47
23	31	47	37	49	34	47	48	37	44	48	41	47
24	32	45	38	48	39	42	49	39	42	44	55	46
25	38	44	50	48	42	38	47	38	39	38	53	47

ТАБЛИЦА 3.22

Эксперимент № 2

05.08.1982 г.

р. Турунчук
Вертикаль № 5
Точка № 2

$h = 6,40$ м, $T = 300$ с,
 $y = 1,28$ м, $\Delta t = 1$ с

T	Мгновенная скорость, см/с											
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	58	57	41	67	49	55	32	59	50	49	53	61
2	56	59	39	64	47	61	36	63	46	52	51	54
3	56	55	36	61	44	59	39	60	49	52	37	58

T	Мгновенная скорость, см/с											
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
4	54	55	43	51	45	57	46	63	51	51	33	61
5	57	52	49	66	45	62	55	63	51	57	33	63
6	54	57	49	67	43	61	54	61	55	68	45	66
7	57	53	53	55	44	58	54	61	53	68	51	66
8	60	62	48	61	45	53	59	61	51	59	54	66
9	56	55	42	61	43	55	59	55	47	53	46	60
10	59	63	47	61	43	53	59	51	44	59	53	60
11	55	61	52	58	40	57	59	55	43	59	48	58
12	53	59	48	68	39	53	61	61	45	50	47	66
13	59	55	45	68	39	52	65	58	41	59	49	63
14	59	53	46	67	45	56	47	57	47	66	56	59
15	54	54	50	63	47	45	41	57	42	62	53	58
16	59	53	53	66	44	41	33	57	43	62	52	60
17	59	52	53	61	40	40	51	57	42	61	47	61
18	66	47	59	57	38	41	53	57	43	60	45	59
19	64	52	51	55	39	40	54	59	45	61	49	53
20	66	51	66	49	48	43	55	55	49	63	53	60
21	70	50	61	50	55	43	56	51	51	59	59	62
22	71	46	66	51	59	43	57	49	52	59	63	58
23	66	45	63	50	63	41	62	52	49	59	44	57
24	63	41	55	45	59	37	58	51	47	57	63	55
25	57	42	61	47	58	35	59	51	49	53	60	54

ТАБЛИЦА 3.23

Эксперимент № 2

05.08.1982 г.

р. Турунчук
Вертикаль № 5
Точка № 3

$h = 6,40$ м, $T = 300$ с,
 $y = 2,56$ м, $\Delta t = 1$ с

T	Мгновенная скорость, см/с											
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	56	62	52	58	43	39	44	61	54	61	63	60
2	56	57	46	54	44	46	45	61	52	62	62	62
3	52	63	41	58	39	50	55	59	52	57	64	64
4	52	57	38	58	36	49	58	59	50	63	60	67
5	53	60	52	60	36	46	50	62	47	62	65	67
6	52	56	57	58	39	49	53	60	45	66	58	64
7	52	57	57	55	36	53	57	58	42	63	58	63
8	58	55	54	60	36	50	55	58	47	60	58	63
9	57	56	50	65	39	50	58	57	50	61	52	60
10	57	60	49	61	36	45	60	50	51	64	52	58
11	58	57	51	59	35	49	59	54	51	64	57	58
12	63	54	47	58	47	51	60	50	45	65	52	64
13	68	60	50	59	43	50	60	52	50	63	54	59
14	62	58	55	58	46	54	60	52	55	63	51	59
15	63	50	58	56	58	53	60	54	62	64	54	59

T	Мгновенная скорость, см/с											
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
16	64	52	60	59	60	55	61	56	63	64	54	59
17	67	60	62	60	54	54	63	51	64	60	52	58
18	66	60	64	58	50	46	57	53	60	58	50	54
19	64	58	62	58	52	49	58	46	60	55	54	55
20	71	56	62	54	46	51	62	54	59	58	54	59
21	70	55	60	50	47	51	56	58	60	64	51	60
22	64	50	62	52	44	47	52	54	60	65	57	58
23	58	54	64	50	42	46	54	49	62	65	58	55
24	61	55	62	50	40	43	58	52	63	60	52	51
25	63	51	59	49	39	46	59	56	62	63	58	51

ТАБЛИЦА 3,24

Эксперимент № 2

05.08.1982 г.

р. Турунчук

Вертикаль № 5

Точка № 4

 $h = 6,40$ м, $T = 300$ с, $y = 5,12$ м, $\Delta t = 1$ с

T	Мгновенная скорость, см/с											
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	63	70	63	65	61	61	57	64	56	64	73	66
2	66	70	63	65	61	59	65	63	60	63	73	67
3	65	71	63	65	63	61	65	64	61	63	69	67
4	65	67	63	65	63	63	63	63	65	65	67	69
5	65	67	61	67	62	64	65	59	63	65	67	70
6	64	65	60	66	59	59	65	56	69	65	70	70
7	63	67	60	65	60	57	62	54	67	65	70	70
8	63	65	61	66	61	56	63	54	65	64	70	70
9	61	67	61	66	64	59	63	53	60	65	70	70
10	63	66	63	67	60	61	62	52	59	64	72	65
11	61	66	57	66	61	61	63	56	59	63	72	65
12	54	67	59	65	61	61	60	60	57	65	70	65
13	61	67	61	63	64	65	56	57	63	65	70	63
14	56	66	60	61	61	67	61	59	65	67	72	64
15	59	67	59	62	57	65	61	59	67	64	72	64
16	64	67	57	63	57	63	56	61	70	64	72	64
17	67	69	59	63	63	63	59	59	67	63	72	63
18	63	65	59	66	64	62	56	61	62	62	72	65
19	66	65	62	67	63	63	56	62	59	63	70	64
20	67	65	62	65	65	65	56	59	63	63	70	64
21	65	66	63	67	65	63	54	61	63	63	71	63
22	67	67	63	66	63	63	61	62	61	62	66	63
23	69	66	64	63	56	60	64	57	60	64	66	61
24	67	66	64	61	56	61	63	56	61	67	69	66
25	70	65	65	55	60	61	64	56	63	69	67	67

Эксперимент № 2
05.08.1982 г.

ТАБЛИЦА 3,25

р. Турунчук
Вертикаль № 5
Точка № 5

$h = 6,40$ м, $T = 300$ с,
 $y = 6,20$ м, $\Delta t = 1$ с

T	Мгновенная скорость, см/с											
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	77	72	67	59	66	67	65	65	61	62	67	66
2	70	72	65	57	64	67	66	64	60	61	65	65
3	78	73	64	60	63	66	70	63	63	61	67	66
4	68	71	64	59	65	53	73	65	61	65	67	65
5	78	71	62	60	65	61	61	63	65	65	68	67
6	71	67	65	61	68	65	58	64	64	65	71	67
7	67	69	63	63	65	62	58	64	67	65	70	64
8	67	65	61	69	68	69	56	64	67	61	73	65
9	71	64	64	68	71	68	59	60	67	63	69	63
10	69	65	65	65	68	67	55	62	65	65	71	66
11	67	64	62	59	71	62	52	55	66	63	71	62
12	66	67	56	59	67	65	51	53	67	66	71	65
13	67	64	59	66	68	64	49	60	63	64	72	62
14	71	70	60	61	69	67	49	63	66	64	71	61
15	69	65	60	65	65	65	47	61	61	65	73	61
16	71	71	60	60	67	65	50	58	64	63	72	60
17	73	63	61	67	65	67	48	64	65	64	70	63
18	71	66	59	67	67	64	52	63	63	62	69	62
19	69	69	59	68	65	69	59	55	63	61	67	64
20	71	63	63	66	68	66	52	61	63	61	65	63
21	74	65	64	71	69	67	59	65	63	64	63	63
22	70	63	63	69	71	70	65	65	63	65	64	63
23	71	67	65	67	78	69	67	67	65	63	65	62
24	72	64	63	67	71	70	64	67	67	65	67	61
25	73	66	59	67	71	68	65	65	67	65	67	62

ПРИЛОЖЕНИЕ 4

Программы к выполнению лабораторной работы № 2.2

1. ВЫЧИСЛЕНИЕ $\bar{x}$, σ_x , σ_x^2 , k

1. Перейти в режим «Программирование» на адрес 00, нажав клавиши «В/0», «F», «ПРГ».
2. Ввести программу.
3. Перейти в режим «Автоматическая работа», нажав клавиши «F», «АВТ».
4. Ввести в ячейку памяти П4 длину ряда n .
Значение $n=300$ в ячейку памяти П4 вводится последовательным нажатием клавиш «300», «П», «4».
5. Пуск программы на счет с адреса 00 осуществляется нажатием клавиш «В/0», «С/П».

Примечание. Расчет производится по формулам

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}, \quad \sigma_x^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}$$

или

$$\sigma_x^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i)^2 - \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^2 / n}{n-1} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i^2) - \bar{x} \sum_{i=1}^n x_i}{n-1}.$$

Адрес	Клавиша	Код	Пояснение
00	0	00	В регистр x помещаем значение 0
01	П6	46	Занесение значения 0 в ячейку памяти 6
02	П7	47	Занесение значения 0 в ячейку памяти 7
03	ИП4	64	Вызов значения n в регистрах x
04	П3	43	Занесение значения n в ячейку памяти 3
05	С/П	50	Набираем на клавиатуре значение x_i
06	П2	42	Заносим в ячейку памяти 2 значение x_i
07	ИП6	66	Вызов содержимого ячейки 6 в регистр x
08	+	10	Накопление $\sum x_i$
09	П6	46	Занесение $\sum x_i$ в ячейку памяти 6
10	ИП2	62	Вызов x_i в регистр x
11	Fx^2	22	Вычисление x_i^2
12	ИП7	67	Вызов содержимого ячейки 7 в регистр x
13	+	10	Накопление $\sum x_i^2$
14	П7	47	Занесение $\sum x_i^2$ в ячейку памяти 7
15	К ИП3	ГЗ	Модифицированный переход к содержимому ячейки памяти 3, т. е. длина ряда n уменьшается на 1
16	ИП3	63	Высвечивается уменьшенная на 1 длина ряда
17	$Fx=0$	5Е	Если содержимое ячейки 3 равно 0, будет выполняться команда 19, если нет — имеет место возврат к команде 5, т. е. необходимо набрать следующее значение ряда x_i
18	05	05	
19	ИП6	66	Вызов значения $\sum x_i$

Адрес	Клавиша	Код	Пояснение
20	ИП4	64	Вызов значения n
21	$\div$	13	Вычисление $\bar{x} = \left(\sum_{i=1}^n x_i \right) / n$
22	П0	40	Занесение $\bar{x}$ в ячейку памяти 0
23	С/П	50	Высвечивается значение $\bar{x}$
24	ИП6	66	Вызов значения $\sum x_i$
25	$\times$	12	Выполнение операции $\bar{x} \sum_{i=1}^n x_i$
26	ИП7	67	Вызов $\sum_{i=1}^n x_i^2$
27	$\leftrightarrow$	14	Обмен информацией между регистрами x и y
28	—	11	$\sum_{i=1}^n x_i^2 - \bar{x} \sum_{i=1}^n x_i$
29	П5	45	Занесение $\sum_{i=1}^n x_i^2 - \bar{x} \sum_{i=1}^n x_i$ в ячейку памяти 5
30	ИП4	64	Вызов значения n в регистр x
31	1	01	Вызов значения 1 в регистр x , значение n при этом переходит в регистр
32	—	11	Вычисление $n - 1$
33	ИП5	65	Вызов значения $\sum_{i=1}^n x_i^2 - \bar{x} \sum_{i=1}^n x_i$
34	$\leftrightarrow$	14	Обмен информацией между регистрами x и y
35	$\div$	13	Вычисление $\sigma_x^2 = \frac{\sum_{i=1}^n x_i^2 - \bar{x} \sum_{i=1}^n x_i}{n - 1}$
36	С/П	50	Высвечивается значение σ_x^2
37	F $\sqrt$	21	Вычисление σ_x
38	С/П	50	Высвечивается значение σ_x
39	ИП0	60	Вызов $\bar{x}$
40	$\div$	13	Вычисление $k = \sigma_x / x$
41	С/П	50	Высвечивается число k

II. ВЫЧИСЛЕНИЕ НОРМИРОВАННОЙ КОРРЕЛЯЦИОННОЙ ФУНКЦИИ

1. Перейти в режим «Программирование» на адрес 00, нажав клавиши «В/0», «F», «ПРГ».
2. Ввести программу.
3. Перейти в режим «Автоматическая работа», нажав клавиши «F», «АВТ».
4. Ввести в регистры памяти значения n , σ_x^2 , $\bar{x}$, т:

П4 — n (длина ряда)
 П5 — σ_x^2 (дисперсия ряда)
 П8 — $\bar{x}$ (среднее арифметическое ряда)
 П1 — τ (временной сдвиг)

5. Пуск программы на счет с адреса 00, нажав клавиши «В/0», «С/П». Так как память микрокалькулятора не может вместить в себя все члены ряда, необходимо составить таблицу исходных данных — ряд x_i и ряд, сдвинутый на время $\tau(x_{i+\tau})$.

Например, при $\tau=1$

Исходный ряд	Ряд со сдвигом $\tau=1$
10	20
20	30
30	15
15	4
4	1
1	

Каждому значению первого ряда x_i соответствует сдвинутое на 1 шаг значение x_{i+1} .

При $\tau=2$ исходная таблица должна иметь вид:

Исходный ряд	Ряд со сдвигом $\tau=2$
10	30
20	15
30	4
15	1
4	
1 и т. д.	

Адрес	Клавиша	Код	Пояснение
00	0	00	Вызов значения 0 в регистр x
01	ПЗ	43	Запись значения 0 в ячейку памяти ПЗ
02	ИП4	64	Вызов значения n из ячейки памяти 4
03	ИП1	61	Вызов τ в регистр x
04	—	11	Вычисление $n - \tau$
05	ПД	4Г	Занесение $n - \tau$ в ячейку памяти D
06	ПО	40	Занесение $n - \tau$ в ячейку памяти 0
07	С/П	50	Набор значения x_i
08	ИП8	68	Вызов значения $\bar{x}$ из ячейки памяти 8
09	—	11	Вычисление $x_i - \bar{x}$
10	П9	49	Занесение $x_i - \bar{x}$ в ячейку памяти 9
11	С/П	50	Набор значения $x_{i+\tau}$
12	ИП8	68	Вызов значения $\bar{x}$ из ячейки памяти 8
13	—	11	Вычисление $x'_{i+\tau} = x_{i+\tau} - \bar{x}$
14	ИП9	69	Вызов значения $x'_i = x_i - \bar{x}$ в регистр x

Адрес	Клавиша	Код	Пояснение
15	×	12	Вычисление произведения $x'_i \cdot \bar{x}'_{i+\tau}$
16	ИПЗ	63	Вызов содержимого ячейки 3 в регистр x
17	+	10	Вычисление $\sum x'_i \cdot x'_{i+\tau}$
18	ПЗ	43	Запись суммы $\sum x'_i \cdot x'_{i+\tau}$ в ячейку 3
19	К ИПО	Г0	Модификация содержимого ячейки ПО (оно уменьшается на 1)
20	ИПО	60	Вызов в регистр x нового содержимого ячейки 0
21	$Fx = 0$ 07	5E	Если содержимое ячейки ПО будет равно 0, то выполняется команда 23, в противном случае наблюдается возврат к команде 07
22		07	
23	ИПД	6Г	Вызов значения $n - \tau$ в регистр x
24	ИП5	65	Вызов значения σ_x^2 из ячейки памяти 5
25	×	12	Вычисление $(n - \tau) \sigma_x^2$
26	ИПЗ	63	Вызов суммы $\sum x'_i \cdot x'_{i+\tau}$
27	↔	14	Обмен информацией между регистрами x и y
28	÷	13	Вычисление $R(\tau) = \frac{\sum x'_i \cdot x'_{i+\tau}}{(n - \tau) \sigma_x^2}$
29	С/П	50	На табло светится значение $R(\tau)$

III. ПРИ КОРОТКИХ РЯДАХ НАБЛЮДЕНИЙ

$$R(\tau) = \frac{\sum (x_i - \bar{x})(x_{i+\tau} - \bar{x}_{i+\tau})}{(n - \tau) \sigma_{x_i} \sigma_{x_{i+\tau}}}.$$

Если ряд $x_{i+\tau}$ заменить на y_i , то

$$R(\tau) = \frac{\sum (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{(n - \tau) \sigma_x \sigma_y}.$$

Величины $\bar{x}$, $\bar{y}$, σ_x и σ_y определяют по программе, приведенной на с. 182—183.

В регистры памяти при этом вводятся:

П5 — σ_y
П6 — $\bar{y}$
П7 — σ_x
П8 — $\bar{x}$
П0 — $(n - \tau)$

Адрес	Клавиша	Код	Пояснение
00	0	00	Ввод значения 0 в регистр x
01	ПЗ	43	Занесение значения 0 в ячейку памяти 3
02	ИПД	6Г	Вызов $(n - \tau)$ в регистр x
03	П2	42	Занесение $(n - \tau)$ в ячейку памяти 2
04	С/П	50	Набор x_i
05	ИП8	68	Вызов $\bar{x}$ в регистр x
06	—	11	Вычисление $(x_i - \bar{x})$
07	П9	49	Занесение $(x_i - \bar{x})$ в ячейку памяти 9
08	С/П	50	Набор y_i
09	ИП6	66	Вызов значения $\bar{y}$, т. е. $x_{i+\tau}$
10	—	11	Вычисление $y_i - \bar{y}$
11	ИП9	69	Вызов значения $x_i - \bar{x}$
12	×	12	Вычисление $(y_i - \bar{y})(x_i - \bar{x})$
13	ИПЗ	63	Вызов содержимого ячейки памяти 3
14	+	10	Накопление $\Sigma (y_i - \bar{y})(x_i - \bar{x})$
15	ПЗ	43	Занесение в ячейку памяти 3 суммы $\sum (y_i - \bar{y})(x_i - \bar{x})$
16	КИП 2	Г2	Модифицированный переход: $(n - \tau)$ уменьшается на 1
17	ИП2	62	Вызов результата предыдущего действия на регистр x
18	$Fx = 0$	5E	Если содержимое регистра $x \neq 0$, выполняется переход к команде 04. Если $x = 0$, то выполняется команда 20
19	04	04	Вызов значения σ_y
20	ИП5	65	Вызов $n - \tau$ в регистр x
21	ИПД	6Г	Вызов $n - \tau$ в регистр x
22	×	12	Вычисление $\sigma_y (n - \tau)$
23	ИП7	67	Вызов σ_x в регистр x
24	×	12	Вычисление $\sigma_y \sigma_x (n - \tau)$
25	ИПЗ	63	Вызов суммы $\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})$
26	↔	14	Обмен информацией между регистрами x и y
27	÷	13	Вычисление $R(\tau)$
28	С/П	50	Высвечивается значение $R(\tau)$

IV. ВЫЧИСЛЕНИЕ СТРУКТУРНОЙ ФУНКЦИИ

Так же как и в предыдущих случаях, вначале необходимо подготовить исходный ряд к расчету. Для этого необходимо составить таблицу исходных данных для заданного сдвига τ . При этом количество чисел, участвующих в вычислении значений $(x_i - x_{i+\tau})^2$, равно $x - \tau$.

1. Перейти в режим «Программирование» на адрес 00, нажав клавиши «B/0», «F», «ПРГ».
2. Ввести программу.
3. Перейти в режим автоматическая работа, нажав клавиши «F», «ABT».

4. Ввести в ячейку памяти: П1 — $\bar{x}$
 П0 — значение n
 П4 — τ

5. Пуск программы на счет с адреса 00 осуществляется нажатием клавиш „В/О“, „С/П“.

Адрес	Клавиша	Код	Пояснение
00	0	00	Вызов значения 0 в регистр x
01	П5	45	Запись значения 0 в ячейку памяти 5
02	ИП0	60	Вызов значения n в регистр x
03	ИП4	64	Вызов значения τ в регистр x
04	—	11	Вычисление $n - \tau$
05	П2	42	Запись $n - \tau$ в ячейку памяти 2
06	ПД	4Г	Запись $n - \tau$ в ячейку памяти D
07	С/П	50	Набор значения x_i
08	ИП1	61	Вызов $\bar{x}$ в регистр x
09	—	11	Вычисление $x'_i = x_i - \bar{x}$
10	П9	49	Занесение $x_i - \bar{x}$ в ячейку памяти 9
11	С/П	50	Набор $x_{i+\tau}$
12	ИП1	61	Вызов $\bar{x}$ в регистр x
13	—	11	Вычисление $x'_{i+\tau} = x_{i+\tau} - \bar{x}$
14	ИП9	69	Вызов $x_i - \bar{x}$ в регистр x
15	—	11	Вычисление $x'_i - x'_{i+\tau}$
16	Fx^2	22	Вычисление $(x'_i - x'_{i+\tau})^2$
17	ИП5	65	Вызов содержимого ячейки 5 в регистр x
18	+	10	Вычисление $\sum (x'_i - x'_{i+\tau})^2$
19	П5	45	Занесение $\sum (x'_i - x'_{i+\tau})^2$ в ячейку 5
20	КИП 2	Г2	Модификация содержимого ячейки 2
21	ИП2	62	Вызов в регистр x нового содержимого ячейки памяти 2
22	$Fx = 0$	5E	Если содержимое ячейки 2 равно 0, то будет иметь место переход к операции 24, если П2 $\neq$ 0, то возврат к операции 07
23	07	07	
24	ИП5	65	Вызов $\sum_{i=1}^{n-\tau} (x'_i - x'_{i+\tau})^2$
25	ИПД	6Г	Вызов $(n - \tau)$
26	$\div$	13	Вычисление $M(\tau) = \frac{\sum_{i=1}^{n-\tau} (x'_i - x'_{i+\tau})^2}{n - \tau}$
27	С/П	50	На табло значение функции $M(\tau)$

По окончании работы при заданном τ нужно обнулить ячейки памяти. Например, обнуление ячейки памяти П5 достигается следующим образом: нажать клавиши „0“, „П“, „5“ и т. д.

Затем вводят значения нового ряда и нажатием клавиш „В/О“, „С/П“ начинают расчет снова.

V. СПЕКТРАЛЬНАЯ ПЛОТНОСТЬ И ЧАСТОТА

ω	$S(\omega)$					
	1	2	3	4	5	6
0,135	34,167	46,016	69,523	66,575	69,178	23,052
0,269	15,198	10,297	34,144	27,046	31,107	11,094
0,359	10,908	10,487	22,478	24,573	40,128	7,517
0,494	14,222	10,253	34,190	11,864	20,192	2,832
0,583	8,366	7,338	20,536	13,022	26,066	3,160
0,673	9,636	5,288	14,113	15,018	14,316	1,876
0,763	6,260	3,179	9,367	9,954	10,399	4,057
0,898	5,020	5,082	8,701	10,316	11,596	1,460
0,987	3,819	3,550	5,519	6,926	8,635	1,418
1,077	2,714	3,623	4,972	3,486	10,864	1,759
1,167	2,663	2,749	5,324	4,555	8,508	1,940
1,257	2,365	2,627	4,231	4,959	7,478	1,648
1,391	1,519	2,272	4,556	4,699	8,571	1,462
1,481	1,901	1,455	5,197	3,704	6,827	1,372
1,571	2,027	1,444	5,626	5,310	6,078	1,105
1,661	2,237	1,469	2,735	3,043	8,260	1,932
1,795	1,181	1,625	2,714	5,088	5,334	1,095
1,885	1,267	2,231	3,170	3,118	4,277	1,099
1,975	1,271	1,237	2,288	3,042	5,227	1,174
2,064	1,150	1,409	2,977	2,098	4,107	1,126
2,199	1,870	0,971	1,877	2,432	3,789	2,275
2,289	1,316	1,269	2,580	2,393	3,094	1,646
2,379	0,820	1,750	1,948	2,188	3,817	1,022
2,468	1,560	1,411	2,703	1,718	2,885	0,931
2,558	1,304	1,364	3,207	1,469	3,086	1,060
2,693	1,395	2,474	2,010	1,502	3,612	1,632
2,783	1,143	2,560	2,268	1,520	3,305	1,339
2,872	1,264	2,178	2,455	2,476	3,268	1,322
3,007	1,581	1,320	3,007	1,647	3,026	1,604
3,142	0,627	2,448	3,211	1,204	6,469	1,971

ω	$\hat{S}(\omega)$					
8	9	10	11	12	13	14
28,492	85,265	115,586	69,899	18,121	43,876	24,710
10,538	16,613	40,712	33,259	12,539	28,711	40,844
8,356	11,422	28,883	22,029	8,104	20,861	17,629
7,590	16,576	24,827	16,976	4,805	9,558	3,984
3,894	6,443	18,389	16,065	3,399	2,976	5,201
3,403	6,895	6,862	14,247	6,718	4,771	3,420
4,667	5,912	7,611	10,207	1,602	2,931	6,050
3,121	8,429	6,843	6,663	3,193	1,228	4,876
1,746	1,825	4,669	7,430	6,661	3,372	1,123
1,920	3,476	4,769	6,547	3,311	2,188	1,698
1,768	3,216	8,041	8,167	1,940	2,421	2,737
1,214	2,016	3,921	6,419	1,367	0,732	1,116
1,309	2,001	2,453	2,778	1,076	0,726	0,613
1,155	1,416	2,101	6,587	0,858	0,408	1,620
1,097	1,274	2,530	4,852	0,711	0,529	0,878
0,842	2,336	3,208	6,473	0,980	0,752	0,331
1,439	1,042	1,846	4,158	0,857	0,548	2,013
1,413	1,169	1,952	7,718	0,860	0,663	0,939
0,914	1,775	1,937	8,943	0,782	0,541	0,794
1,481	1,527	0,922	5,454	0,864	0,581	1,724
1,487	1,417	2,304	3,577	0,681	0,923	1,391
0,523	0,689	1,172	4,060	0,677	0,721	1,804
0,699	1,298	1,710	2,790	0,954	0,461	1,395
0,702	1,000	2,672	4,896	0,955	1,057	0,548
0,632	0,902	2,528	2,395	1,281	0,960	1,124
1,034	0,597	0,974	4,835	0,708	0,826	1,126
1,710	0,890	1,283	6,210	0,444	0,784	0,468
0,887	0,947	1,100	5,299	0,786	0,277	0,277
1,013	1,480	2,538	3,374	0,573	0,750	0,656
1,016	0,744	1,635	2,705	0,526	0,120	1,451

ω	$S(\omega)$					
15	16	17	18	19	20	21
55,363	25,309	9,870	10,690	20,791	27,000	116,557
23,380	28,914	8,173	7,341	9,282	19,857	44,425
20,223	48,523	3,754	4,975	5,883	24,579	43,007
8,473	9,687	3,824	4,472	4,485	7,915	26,983
2,978	17,574	3,687	4,420	3,420	3,398	17,880
5,407	9,618	3,426	3,207	3,654	4,794	24,160
7,385	11,150	1,660	3,242	3,746	12,617	21,354
2,700	3,523	2,188	1,637	2,202	7,071	17,348
1,278	4,779	1,463	1,367	2,319	7,786	6,676
2,152	3,080	0,781	1,503	2,167	7,199	11,754
4,081	4,018	0,742	1,240	1,642	3,834	8,893
1,379	6,501	0,994	1,054	2,056	2,737	11,642
2,088	3,488	0,416	1,202	0,822	5,432	8,033
1,104	5,480	0,667	1,086	1,513	2,567	7,423
1,046	4,480	0,792	1,047	1,305	3,460	5,021
1,575	5,915	0,785	1,755	1,559	2,300	7,519
1,532	4,823	0,792	0,563	1,294	2,932	4,538
0,911	2,556	0,622	0,677	1,119	2,418	6,117
1,139	5,397	0,787	1,392	1,339	2,617	5,370
1,207	5,634	0,631	2,834	0,845	1,369	3,299
1,730	5,651	0,803	1,525	0,378	1,599	4,560
2,167	4,257	1,029	1,809	0,651	2,503	2,966
1,219	4,125	1,144	2,091	0,901	2,111	4,097
0,907	5,179	0,876	1,267	0,802	1,633	4,349
0,573	4,911	1,012	1,138	0,977	1,498	4,423
0,468	3,330	1,331	2,479	0,949	0,974	4,196
0,702	1,556	1,010	0,675	0,825	1,235	4,948
1,180	2,414	1,438	0,738	1,054	0,923	5,120
0,710	1,518	0,688	0,511	1,177	1,381	4,244
0,315	5,963	0,559	0,798	1,361	1,634	3,008

ω	$S(\omega)$			
22	23	24	25	26
35,259	27,867	85,597	144,415	86,958
16,729	17,410	43,333	23,881	23,837
7,538	11,127	16,120	28,343	24,378
6,472	4,294	13,638	11,805	21,899
4,610	6,093	8,088	13,262	17,054
3,736	5,689	7,887	9,467	13,207
3,596	5,331	9,022	10,820	8,185
2,681	1,820	7,270	6,111	7,494
2,421	2,027	5,450	6,931	4,954
2,371	1,679	3,532	3,896	5,260
2,050	1,418	3,393	4,328	5,836
2,296	3,006	3,567	5,544	6,236
1,788	1,260	2,928	4,071	5,687
1,138	1,710	3,897	3,094	5,457
1,367	1,245	1,631	4,016	7,037
1,268	1,537	2,302	2,161	3,983
1,159	0,783	1,723	2,734	4,392
1,279	0,973	2,327	3,242	3,364
0,841	1,177	1,480	2,031	3,202
0,771	1,580	1,649	2,033	3,581
0,717	0,990	0,976	2,530	3,914
0,643	0,872	0,965	1,801	4,476
0,847	0,740	1,551	2,478	4,513
1,217	0,663	1,516	2,213	4,111
1,203	0,934	1,566	1,774	2,669
0,883	1,217	1,470	1,819	4,104
1,107	0,722	1,672	1,724	3,282
1,081	0,454	1,265	1,774	2,623
0,835	0,497	1,184	1,762	2,827
1,070	0,876	1,556	1,901	3,098

ПРИЛОЖЕНИЕ 5

Варианты расчетного задания к лабораторной работе № 2.3

№ варианта	v см/с	B см	k мм	h см
1	19	45	0,25	5
2	23	65	0,44	7
3	29	75	0,50	10
4	33	95	0,60	12
5	38	110	0,80	15
6	44	130	1,1	15
7	51	160	1,2	16
8	58	200	1,2	18
9	61	220	1,4	30
10	64	230	1,4	30
11	73	240	1,5	31
12	77	250	1,5	40
13	83	290	2,5	41
14	88	330	2,3	42
15	92	350	4,5	45
16	21	35	0,20	4,0
17	26	38	0,30	4,5
18	34	45	0,40	6,0
19	36	65	0,45	7,0
20	46	75	0,70	8,0
21	52	95	0,60	7,5
22	55	110	0,50	9,5
23	63	110	0,8	11
24	66	150	0,9	20
25	73	230	1,5	30

ПРИЛОЖЕНИЕ 6

Варианты расчетных заданий к лабораторной работе № 2.4

№ варианта	h_0 м	B м	k_s мм	I °/°
1	5,0	100	5,0	0,05
2	4,5	120	4,5	0,04
3	4,0	140	4,0	0,04
4	3,5	110	3,5	0,03
5	3,0	100	3,0	0,025
6	7,0	250	2,5	0,02
7	7,5	260	2,5	0,04
8	8,0	350	2,0	0,03
9	12,0	500	3,4	0,05
10	11,0	450	1,4	0,02
11	3,2	70	7,5	0,07
12	4,6	110	0,25	0,01
13	3,8	95	0,75	0,02
14	1,2	25	7,5	0,10

№ варианта	h_0 м	B м	h_s мм	I ‰
15	5,5	50	0,5	0,01
16	5,5	55	0,6	0,01
17	5,7	62	0,4	0,05
18	6	120	0,5	0,008
19	3,5	80	1,0	0,005
20	15,0	750	5,0	0,03
21	12,0	630	1,0	0,001
22	7,2	420	0,7	0,04
23	5,0	120	4,5	0,04
24	6,0	150	0,75	0,008
25	7,0	240	3,0	0,03

ПРИЛОЖЕНИЕ 7

Варианты расчетного задания к лабораторной работе № 2.5

№ варианта	Δ_d мм	Δ_L/Δ_d	H_0 м	I_0 ‰	α_2
1	0,2	3,0	2,0	0,05	1,10
2	0,3	2,9	3,0	0,06	1,15
3	0,4	2,8	2,5	0,07	1,08
4	0,5	2,7	2,6	0,08	1,20
5	0,6	2,6	2,7	0,09	1,10
6	0,7	2,5	2,8	0,10	1,16
7	0,8	2,4	2,9	0,09	1,17
8	0,9	2,3	3,0	0,08	1,18
9	1,0	2,2	2,5	0,07	1,20
10	1,1	2,1	2,6	0,06	1,05
11	1,25	2,0	2,7	0,05	1,06
12	1,3	1,9	2,8	0,06	1,07
13	1,4	1,8	2,9	0,07	1,08
14	1,5	1,7	3,0	0,08	1,09
15	1,6	1,6	1,1	0,09	1,10
16	1,7	1,5	1,2	0,10	1,05
17	1,8	1,4	1,3	0,11	1,10
18	1,9	1,3	1,4	0,12	1,15
19	2,0	1,2	1,5	0,03	1,20
20	2,1	1,1	1,6	0,14	1,25
21	2,2	1,0	1,7	0,15	1,30
22	2,3	1,5	1,8	0,12	1,15
23	2,4	2,0	1,9	0,11	1,10
24	2,5	1,2	1,3	0,10	1,05
25	2,6	1,4	2,0	0,05	1,08

ПРИЛОЖЕНИЕ 8

Коэффициенты шероховатости n по М. Ф. Срибному

№ кате- гории	Характеристика русла и поймы	n
1	Естественные русла в весьма благоприятных условиях (чистые, прямые, незасоренные, земляные, со свободным течением русла)	0,025
2	Русла постоянных водотоков равнинного типа (преимущественно больших и средних рек) в благоприятных условиях состояния ложа и течения воды. Периодические потоки (большие и малые) при очень хорошем состоянии поверхности и формы ложа	0,033
3	Сравнительно чистые русла постоянных равнинных водотоков в обычных условиях, извилистые, с некоторыми неправильностями в направлении струй или же прямые, но с неправильностями в рельефе дна (отмели, промоины, местами камни). Земляные русла периодических водотоков (сухих логов) в относительно благоприятных условиях	0,040
4	Русла (больших и средних рек), значительно засоренные, извилистые и частично заросшие, каменистые, с беспокойным течением. Периодические (ливневые и весенние) водотоки, несущие во время паводка заметное количество наносов, с крупногалечным или покрытым растительностью (травой и пр.) ложем	0,050
5	Русла периодических водотоков, сильно засоренные и извилистые. Сравнительно заросшие, неровные, плохо разработанные поймы рек (промоины, кустарники, деревья, с наличием заводей). Галечно-валунные русла горного типа, с неправильной поверхностью водного зеркала. Порожистые участки равнинных рек	0,067
6	Реки и поймы, весьма значительно заросшие (со слабым течением), с большими глубокими промоинами. Валунные, горного типа, русла с бурливым пенным течением, с изрытой поверхностью водного зеркала (с летящими вверх брызгами воды)	0,080
7	Поймы такие же, как предыдущей категории, но с сильно неправильным косоструйным течением, заводами и пр. Горноводопадного типа русла с крупновалунным извилистым строением ложа, перепады ярко выражены, пенность настолько сильна, что вода, потеряв прозрачность, имеет белый цвет; шум потока доминирует над всеми остальными звуками, делает разговор затруднительным	0,100
8	Характеристика горных рек примерно та же, что и в предыдущей категории. Реки болотного типа (заросли, кочки, во многих местах почти стоячая вода и пр.). Поймы с очень большими мертвыми пространствами, с местными углублениями — озерами и пр.	0,133
9	Потоки типа селевых, состоящие из грязи, камней и пр. Глухие поймы (сплошь лесные, таежного типа)	0,200

ПРИЛОЖЕНИЕ 9

Коэффициенты шероховатости n по И. Ф. Карасеву

n	Характеристика русел и пойм		
	А. Равнинные реки	Б. Полугорные и горные реки	В. Поймы
0,020	Прямолинейные русла канализированных рек в плотных грунтах с тонким слоем илистых отложений	—	—
0,025	Естественные земляные русла в благоприятных условиях, чистые, прямые, со спокойным течением	Искусственные отводы русел, высеченные в скале	Ровная чистая пойма с низкой травой без сельскохозяйственного использования
0,030	Гравийно-галечные русла в тех же условиях	Гравийно-галечные русла в благоприятных условиях (чистые, прямые), $I = 0,8 \div 1,0 \text{ ‰}$	Ровная пойма под пашней без посевов и пастбищем с низкой травой
0,040	Сравнительно чистые русла постоянных водотоков с некоторыми неправильностями в направлениях струй, неровностями дна и берегов и влечением донных наносов	Земляные русла периодических водотоков (сухих логов) в благоприятных условиях. Правильные хорошо разработанные галечные русла в нижнем течении. $I = 3 \div 7 \text{ ‰}$	Ровная пойма, занятая зрелыми полевыми культурами, пастбищем с высокой травой и вырубками без побегов, небольшое количество старореций и мелких проток
0,050	Значительно засоренные русла больших и средних рек, частично заросшие или каменистые, с неспокойным течением. Чистые русла периодических водотоков	Значительно засоренные каменистые русла с бурным течением. Периодические водотоки с крупногалечным покрытием ложа. $I = 7 \div 15 \text{ ‰}$	Пойма, поросшая редким кустарником и деревьями (весной без листвы), изрезанная староречиями
0,065	Скалистые русла больших и средних рек. Русла периодических водотоков, засоренные и заросшие	Галечно-валунные русла с бурным течением. Засоренные периодические водотоки. $I = 15 \div 20 \text{ ‰}$	Пойма под редким кустарником и деревьями с листвой или вырубками с развивающейся порослью
0,080	Речные русла, значительно заросшие, с промоинами и неровностями дна и берегов	Валунные русла в средней и верхней частях бассейна и периодические водотоки с бурным течением и взволнованной водной поверхностью. $I = 50 \div 90 \text{ ‰}$	Поймы, покрытые кустарником средней и большой густоты (весной без листвы)

n	Характеристика русел и пойм		
	А. Равнинные реки	Б. Полугорные и горные реки	В. Поймы
0,100	Русла рек, сильно заросшие, загроможденные стволами деревьев и валунами	Русла водопадного типа преимущественно в верховьях с крупно-валунным ложем и бурным течением. $I = 90 \div 200 \text{ ‰}$	Поймы, занятые лесом при уровне ниже ветвей и кустарником средней и большой густоты с листвой
0,140	Реки болотного типа (заросли, кочки, во многих местах почти стоячая вода)	Русла водопадного типа, загроможденные обломками скал и валунами. $I = 90 \div 200 \text{ ‰}$	Поймы, покрытые лесом при затоплении ветвей и густым ивняком
0,200	—	Русла с завалами из валунов и обломков скал	Глухие, сплошь заросшие, трудно проходимые поймы таежного типа

ПРИЛОЖЕНИЕ 10

Коэффициенты шероховатости n , составленные в ЛГМИ

Гра- дация	Характеристика русел	n		
		мин.	макс.	средн.
1	Естественные земляные русла. Прямолинейные, устойчивые, чистые. Берега задернованы с отдельными кустарниками. Грунт песчано-илистый	0,020	0,025	0,022
2	Умеренно-извилистые, слаборазмываемые. Водная растительность практически отсутствует. Берега крутые, суглинистые, покрыты кустарниками. Грунт песчано-галечный или песчано-каменистый, встречаются отдельные (редкие) валуны	0,026	0,032	0,030
3	Слабоизвилистые, неустойчивые, у берегов слабо зарастают. Берега обрывистые, покрыты редким кустарником и отдельными деревьями. Грунт каменисто-галечный	0,033	0,037	0,035
4	Извилистые, деформируемые. Зарастают водной растительностью. Берега покрыты кустарником и травой. Грунт песчано-галечный	0,038	0,044	0,040
5	Извилистые, деформирующиеся. Зарастают водной растительностью. Берега сильно заросшие кустарником, лесом, местами размываемые. Грунт песчаный, каменистый	0,045	0,055	0,050

Гра- дация	Характеристика русел	n		
		мин.	макс.	средн.
6	Извилистые, деформируемые. Руслу за- росшие, засоренные. Берега сложены из торфянистых и суглинистых грунтов, по- росшие кустарником, лесом, задернованы. Грунт песчано-илистый	0,058	0,062	0,060
7	Значительно заросшие, засоренные топ- ляком, деформирующиеся, меандрирую- щие. Берега невысокие, обрывистые, за- росшие. Слабое течение. Грунт песчаный, илистый	0,065	0,090	0,080

ПРИЛОЖЕНИЕ 11

Коэффициенты шероховатости *n* по В. Т. Чоу

Тип канала и его описание	Значение <i>n</i>		
	минимальное	нормальное	максимальное
Естественные водотоки:			
1. Малые водотоки (ширина па- водкового уровня меньше 30 м):			
а) равнинные:			
чистые прямолинейные с полным заполнением без перекатов или глубоких омутов	0,025	0,03	0,033
то же при наличии камней и во- дорослей	0,03	0,035	0,04
чистые извилистые с омутами и отмелями	0,033	0,04	0,045
то же при наличии водорослей и камней	0,035	0,045	0,05
то же при низком уровне и бо- лее неправильных уклоне и се- чении	0,04	0,048	0,055
чистые извилистые с омутами, отмелями, водорослями и боль- шим количеством камней	0,045	0,05	0,06
заросшие с глубокими омутами при медленном движении	0,05	0,07	0,08
очень заросшие с глубокими омутами или каналы для про- пуска паводковых вод с застряв- шими тяжелыми стволами и по- рослью	0,075	0,1	0,15

Тип канала и его описание	Значение n		
	минимальное	нормальное	максимальное
б) водотоки с хорошим обслуживанием, без растительности, берега обычно крутые, кусты и деревья по берегам заливаются при высоком уровне воды; дно сложено из гравия, булыжника и редких валунов	0,03	0,04	0,05
дно сложено из булыжника с крупными валунами	0,04	0,05	0,07
2. Пойменные водотоки:			
а) пастбища без кустарника:			
низкая трава	0,025	0,03	0,035
высокая трава	0,03	0,035	0,05
б) возделываемые площади:			
без посевов	0,02	0,03	0,04
созревшие рядовые посевы . . .	0,025	0,035	0,045
созревшие сплошные посевы . .	0,03	0,04	0,05
в) кустарник:			
отдельные кусты, обильная растительность	0,035	0,05	0,07
редкие кусты и деревья зимой	0,035	0,05	0,06
то же летом	0,04	0,06	0,08
кустарник средней и большой густоты зимой	0,045	0,07	0,11
то же летом	0,07	0,1	0,16
г) деревья:			
густой ивняк летом	0,11	0,15	0,2
очищенная территория с древесными пнями без поросли	0,03	0,04	0,05
то же с развивающейся порослью	0,05	0,06	0,08
тяжелые застрявшие стволы отдельных поваленных деревьев, небольшой подлесок, уровень паводка ниже ветвей	0,08	0,1	0,12
то же, но уровень паводка достигает ветвей	0,1	0,12	0,16
3. Большие водотоки (ширина паводкового уровня больше 30 м); значение n меньше, чем для малых потоков в идентичных условиях, поскольку эффективное сопротивление берегов при этом меньше:			
а) однородное сечение без валунов или кустарника	0,025	—	0,06
б) неоднородное и шероховатое сечение	0,035	—	0,1

ПРИЛОЖЕНИЕ 12

Коэффициенты шероховатости n по Дж. Бредли

Характеристика сопротивления русла и поймы	n
А. Малые потоки (ширина поверхности при паводковом уровне менее 30 м)	
1. Довольно правильное сечение:	
а) немного травы, мало или совсем никакого кустарника	0,03—0,035
б) густая высокая трава, глубина потока существенно больше высоты травы	0,035—0,05
в) немного травы, мелкий кустарник на берегах	0,035—0,05
г) немного травы, крупный кустарник на берегах	0,05—0,07
д) немного травы, густой ивняк на берегах	0,06—0,08
е) для деревьев в русле с ветвями, погруженными при высоком уровне воды, увеличение всех значений на	0,01—0,02
2. Неправильное сечение с бочагами, слабо меандрирующее русло: в руслах от а) до е) п. I все значения увеличиваются на	0,01—0,02
3. Горные потоки без растительности в руслах, берега обычно крутые, деревья и кустарники по берегам, затопленные при высоком уровне воды:	
а) дно из гравия, галечника и немногочисленных валунов	0,04—0,05
б) дно из галечника и крупных валунов	0,05—0,07
Б. Поймы (смежные с естественными потоками)	
1. Пастбища без кустарника:	
а) низкая трава	0,03—0,035
б) высокая трава	0,035—0,05
2. Обрабатываемые площади:	
а) без посевов	0,03—0,04
б) зрелые пропашные культуры	0,035—0,045
в) зрелые полевые культуры	0,04—0,05
3. Густая высокая трава, разбросанный кустарник	0,05—0,07
4. Редкий кустарник и деревья:	
а) зимой	0,05—0,06
б) летом	0,10—0,16
5. Растительность средняя до плотной:	
а) зимой	0,05—0,06
б) летом	0,06—0,08
6. Густой ненаклоненный ивняк летом	0,15—0,20
7. Вырубка с древесными пнями:	
а) без побегов	0,04—0,05
б) с сильно разросшимися побегами	0,06—0,08

Характеристика сопротивления русла и поймы	n
8. Мощные лесонасаждения строевого леса, несколько спелых деревьев, слабый подлесок:	
а) высота потока ниже ветвей	0,10—0,12
б) высота потока достигает ветвей (n возрастает с глубиной)	0,12—0,16
В. Крупные потоки (ширина поверхности в паводок > 30 м)	
1. Коэффициент шероховатости обычно меньше, чем для малых рек со сходными характеристиками вследствие меньшего эффективного сопротивления, оказываемого неправильными берегами или растительностью на берегах. Значения n могут быть несколько снижены. Значения n для больших рек правильного профиля без валунов или кустарника назначают в пределах	0,028—0,033

Примечания:

1. В случаях когда при расчетах скоростей используют уклоны, вычисленные по горизонтам паводков на значительном протяжении русла, включающем меандры и повороты долины, значения n следует повышать для учета дополнительных потерь, вызываемых извилинами.

2. Для горных русел, где возможна аэрация потока, коэффициенты шероховатости следует повышать на 20—30 %.

ПРИЛОЖЕНИЕ 13

Пример

выполнения лабораторной работы № 2.6 «Расчет пропускной способности русел с поймами»

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

В качестве примера выполним расчеты на основе следующей исходной информации по р. Горынь у с. Оженин за 1967 г.: схемы (планы) участка поста в горизонталях (рис. П.1), профиля поперечного сечения до незатопляемых отметок (рис. П.2), описательной характеристики сопротивлений движению воды в русле и пойме, необходимой для определения коэффициентов шероховатости. Для оценки методики необходима дополнительная информация об измеренных расходах воды при уровнях, превышающих уровни затопления поймы (книжки для измерения расходов воды), и таблицы ИРВ.

ВЫПОЛНЕНИЕ РАБОТЫ

1. По профилю поперечного сечения (рис. П.2) определяем морфометрические характеристики русла и поймы при различных уровнях воды. При этом отделяем русло от поймы вертикальной линией, проходящей по бровке прируслового вала. По этим данным строим кривые зависимостей $h_p = f(H)$, $F_p = f(H)$ (рис. П.3). Как видно на рис. П.2, значение $H_{p.6} = 142$ см, а соответствующее ему значение $h_{p.6} = 0,94$ м получаем по кривой $h_p = f(H)$ при уровне $H_{p.6} = 142$ см. Рассчитываем значения $h_p = 1,10h_{p.6}$ и $h_p = 1,25h_{p.6}$, которые соответственно равны 1,03 и 1,18 м. По кривой $h_p = f(H)$ определяем значения уровня, соответствующее этим глубинам, а по кривой $F_p = f(H)$ — значения площадей поперечного сечения русла. Все результаты сводим в табл. 13.1.

В данном случае расчет параметров потоков целесообразно ограничить относительной глубиной $h_p/h_{p,с}=1,25$, так как при больших глубинах натурная информация о гидравлических характеристиках потоков отсутствует, что будет препятствовать оценке эффективности методики.

2. По схеме участка поста определяем тип взаимодействия потоков. Как видно на рис. П.1, ниже створа поста оси руслового и пойменного потоков расходятся. Следовательно, на данном участке взаимодействие потоков происходит по второму типу по классификации ЛГМИ.

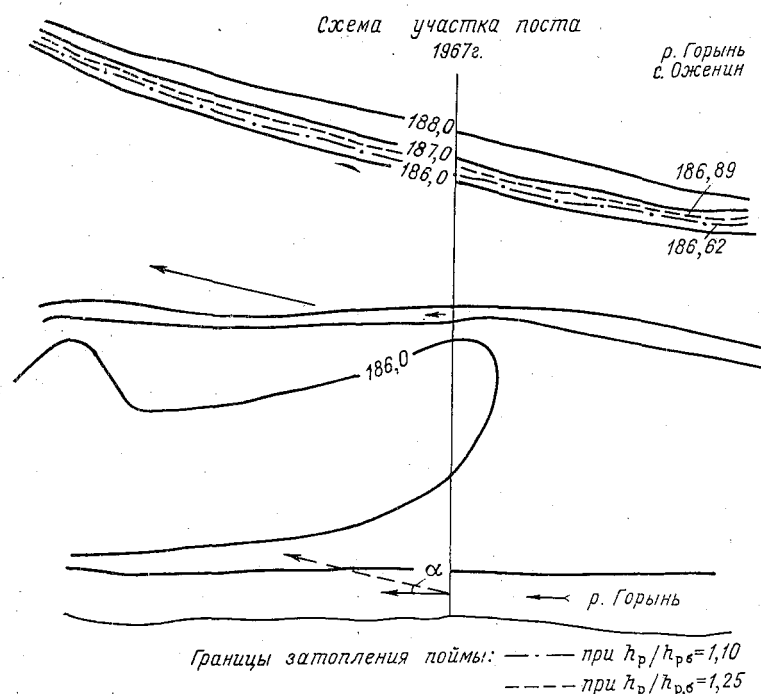
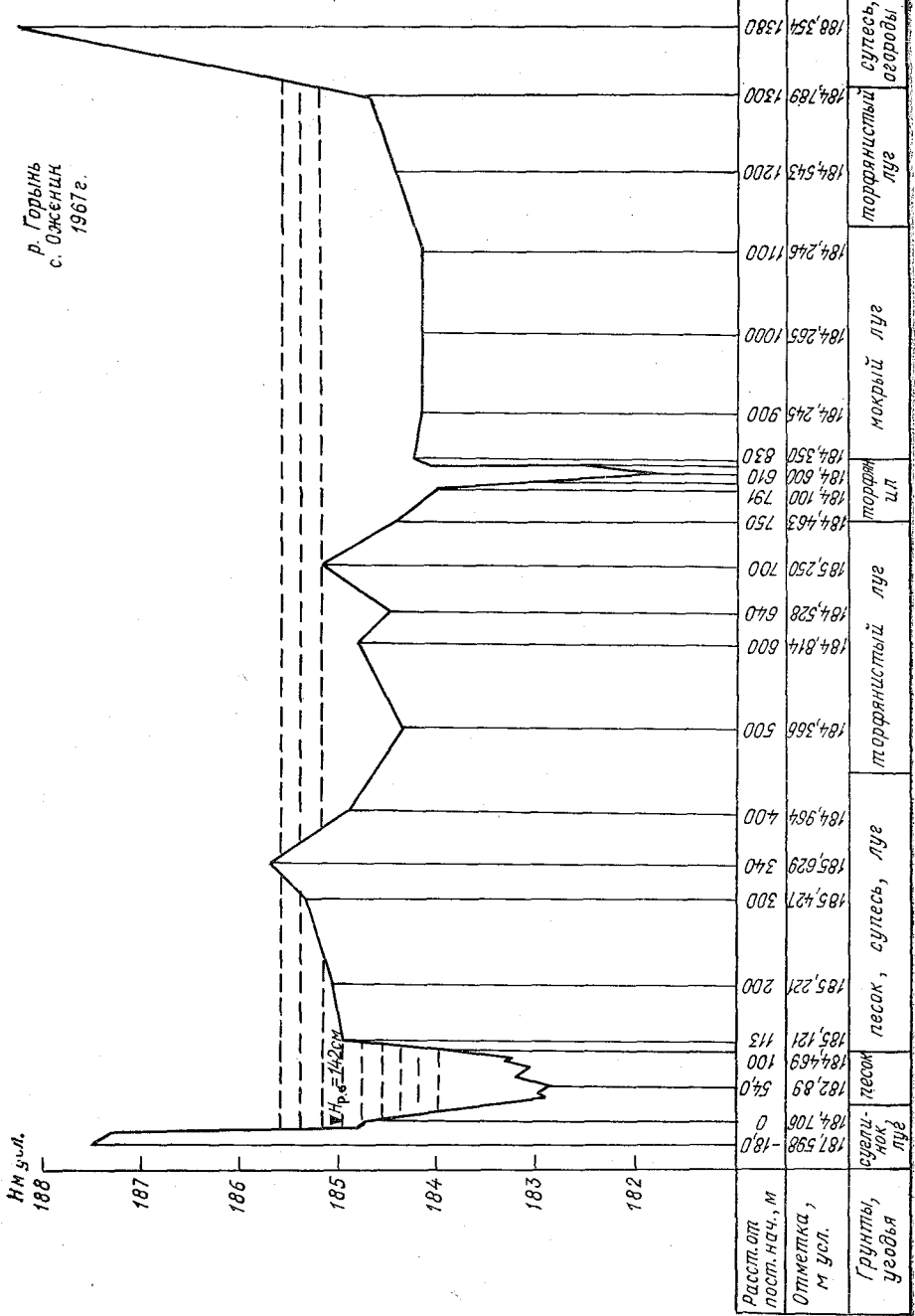


Рис. П.1. Схема участка расположения поста в горизонталях на р. Горынь у с. Оженин.

Для определения угла α предварительно вычислим отметки уровня, соответствующие расчетным глубинам. С этой целью к условной отметке «0» графика, равной 185,07 м, прибавим расчетные значения уровня и получим соответственно 186,62 и 186,89 м. Нанесем эти значения на схему участка поста. Таким образом, направление течения пойменного потока при расчетных значениях уровня будет определяться направлением горизонталей, приведенных по отметкам 186,62 и 186,89 м, которые параллельны горизонталям с отметками 186 и 187 м. После этого с помощью транспортира определяем угол α , равный 10° .

3. Значение уклона водной поверхности при затоплении бровок прирусловых валов определяем по данным наблюдений предшествующего 1966 г. Оно равно 0,17 ‰.

4. По описательной характеристике русла и соответствующим таблицам Срибного, Карасева, ЛГМИ. Чоу (приложения 8—11) получаем значение коэффициента шероховатости $n_p=0,040$, а по таблице Бредли (приложение 12) $n_p=0,037$.



Затем определим поправку к коэффициенту шероховатости за счет учета размеров (B_p) и формы сечения (B_p/h_p) русла реки. Для этого предварительно по профилю поперечного сечения русла получим значения его ширины, соответствующие средним глубинам $h_{p.6}=0,94$, $h_p=1,03$ и $h_p=1,18$ м, и характеристики формы сечения русла соответственно $B_p/h_p=86$, $B_p/h_p=79$ и $B_p/h_p=69$. По этим параметрам и зависимости $\Delta n_p=f(B_p/h_p, B_p)$, приведенной на рис. 2.10, получаем соответствующие значения поправок $\Delta n_{p.6}=-0,008$, $\Delta n_p=-0,009$ и $\Delta n_p=-0,010$. В табл. 13.2 приведены значения коэффициентов шероховатости с учетом этих поправок.

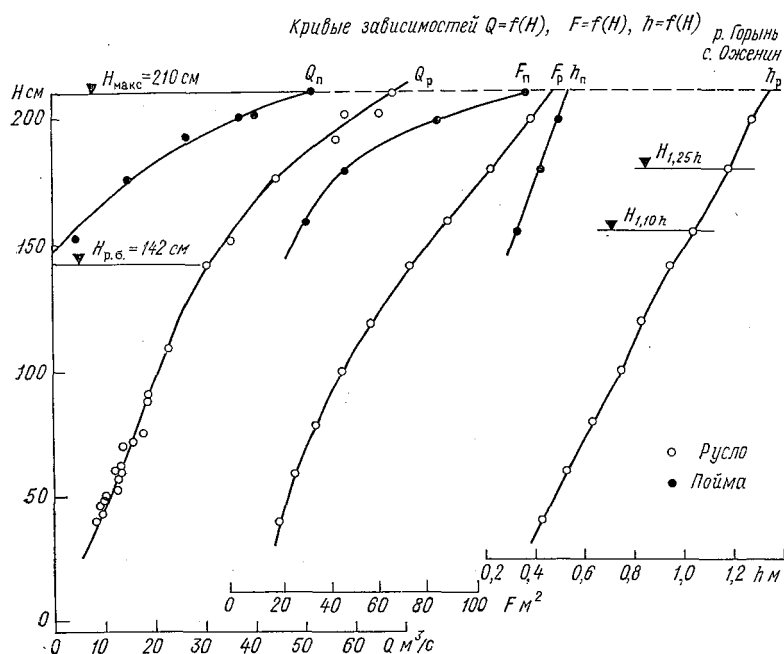


Рис. П.3. Кривые зависимостей $Q=f(H)$, $F=f(H)$ и $h=f(H)$ для р. Горынь у с. Оженин за 1967 г.

5. Выполним расчет значений $v_{p.6}$, основываясь на формуле Шези и используя для этого значения коэффициента шероховатости, приведенные в табл. 13.2:

$$v_{p.6} = \frac{h_{p.6}^{2/3} \cdot I_{p.6}^{1/2}}{n_p} = \frac{0,94^{2/3} \cdot 0,00017^{1/2}}{0,032} = 0,39 \text{ м/с},$$

$$v_p = \frac{0,94^{2/3} \cdot 0,00017^{1/2}}{0,029} = 0,43 \text{ м/с}.$$

Полученные значения заносим также в табл. 13.2.

Рис. П.22. Профиль поперечного сечения до незатопляемых отметок по гидроствору на р. Горынь у с. Оженин за 1967 г.

6. Определяем средние значения скорости руслового потока при расчетных значениях глубины. С этой целью по значению угла $\alpha = -10^\circ$, расчетным значениям относительных глубин $h_p/h_{p.б} = 1,10$ и $1,25$ и кривым $v_p/v_{p.б} = f(h_p/h_{p.б}, \alpha)$, приведенным на рис. 2.7, получаем относительные скорости руслового потока $v_p/v_{p.б}$ при его взаимодействии с пойменным потоком соответственно равные

Таблица 13.1

Значения морфометрических параметров русла при расчетных глубинах

Расчетный параметр	$H_{p.б}$	Соответствующие глубинам	
		$h_p/h_{p.б} = 1,10$	$h_p/h_{p.б} = 1,25$
Уровень воды H см	142	155	182
в условных отметках, м	186,49	186,62	186,89
Площадь поперечного сечения F_p м ²	76,0	83,5	108
Средняя глубина русла h_p м	0,94	1,03	1,18

1,06 и 1,11. Исходя из этого средние скорости руслового потока при соответствующих расчетных относительных глубинах будут иметь следующие значения: 0,41 и 0,43 (по Срибному, Карасеву, ЛГМИ и Чоу), 0,46 и 0,48 (по Бредли).

7. Выполним расчет средних значений скоростей русловых потоков, используя для этого зависимости $I_p/I_{p.б} = f(h_p/h_{p.б}, \alpha)$ и $n_p/n_{p.б} = f(h_p/h_{p.б}, \alpha)$. С этой целью с графических зависимостей $I_p/I_{p.б} = f(h_p/h_{p.б}, \alpha)$ по значению угла $\alpha = -10^\circ$ и относительным глубинам русла (1,10 и 1,25), снимаем относительные значения уклонов водной поверхности, соответственно равные 1,02 и 1,15.

Таблица 13.2

Расчетные значения коэффициента шероховатости и средние значения скорости течения

Автор формулы	$n_{p.б}$	$v_{p.б}$
Срибный	0,032	0,39
Карасев	0,032	0,39
ЛГМИ	0,032	0,39
Чоу	0,032	0,39
Бредли	0,029	0,43

Учитывая, что $I_{p.б} = 0,17\%$, получим расчетные значения уклонов водной поверхности русловых потоков $I_p = 0,174\%$ (при $h_p/h_{p.б} = 1,10$) и $I_p = 0,195\%$ (при $h_p/h_{p.б} = 1,25$).

8. По графическим зависимостям $n_p/n_{p.б} = f(h_p/h_{p.б}, \alpha)$, значениям угла $\alpha = -10^\circ$ и относительных глубин 1,10 и 1,25 определяем значения относительной шероховатости русла: 1,0 и 1,14. Используя значения $n_{p.б}$ (табл. 13.2), полученные на основе таблиц Срибного, Карасева, ЛГМИ и Чоу, получаем $n_p = 0,032$ (при $h_p/h_{p.б} = 1,10$) и $n_p = 0,036$ (при $h_p/h_{p.б} = 1,25$). Соответственно по таблице Бредли $n_p = 0,029$ и $n_p = 0,033$.

9. Выполним расчет пропускной способности русла при расчетных глубинах следующими способами:

1. По методике ЛГМИ, основанной на зависимости $v_p/v_{p.6} = f(h_p/h_{p.6}, \alpha)$. Для расчетов используем данные о средней скорости руслового потока (см. п. 6) и о площади живого сечения, полученные по кривой зависимости $F_p = f(H)$ при соответствующих расчетных глубинах. В результате получим значения пропускной способности русла при определении $v_{p.6}$ на основе таблиц Срибного, Карасева, ЛГМИ и Чоу: $Q_{p.1,10} = 0,41 \times 83,5 = 34,2 \text{ м}^3/\text{с}$; $Q_{p.1,25} = 0,43 \times 108 = 46,8 \text{ м}^3/\text{с}$. Соответственно на основе таблицы Бредли $Q_{p.1,10} = 0,46 \times 83,5 = 38,4$ и $Q_{p.1,25} = 0,48 \times 108 = 51,8 \text{ м}^3/\text{с}$.

По кривой расходов для русловой части потока (рис. П.3), построенной по данным натурных измерений 1967 г., получим следующие значения расходов воды при расчетных уровнях, соответствующих относительным глубинам $h_p/h_{p.6} = 1,10$ и $1,25$: $Q_{p.к.1,10} = 36,0$ и $Q_{p.к.1,25} = 48,0 \text{ м}^3/\text{с}$. Эти значения расходов воды необходимы для оценки погрешностей расчетов. Определим значения этих погрешностей:

на основе таблиц Срибного, Карасева, ЛГМИ и Чоу

$$\sigma_{Q.1,10} = \frac{34,2 - 36,0}{36,0} = -0,05, \text{ или } -5 \%,$$

$$\sigma_{Q.1,25} = \frac{46,4 - 48,0}{48,0} = -0,033, \text{ или } -3,3 \%,$$

на основе таблицы Бредли

$$\sigma_{Q.1,10} = \frac{38,4 - 36,0}{36,0} = 0,066, \text{ или } 6,6 \%,$$

$$\sigma_{Q.1,25} = \frac{51,8 - 48,0}{48,0} = 0,079, \text{ или } 7,9 \%.$$

Таким образом, погрешности расчетов по данной методике находятся в пределах точности измерений расходов воды.

II. По методике ЛГМИ, основанной на зависимостях $I_p/I_{p.6} = f(h_p/h_{p.6}, \alpha)$ и $n_p/n_{p.6} = f(h_p/h_{p.6}, \alpha)$, используя данные о коэффициенте шероховатости при расчетных глубинах, полученные в п. 8, по формуле Маннинга (или Павловского) вычислим значения коэффициента Шези (на основе шкал коэффициента шероховатости Срибного, Карасева, ЛГМИ и Чоу):

$$C_{p1,10} = \frac{1}{n_p} h_p^{1/6} = \frac{1}{0,032} \cdot 1,03^{1/6} = 31,4 \text{ м}^{0,5}/\text{с},$$

$$C_{p1,25} = \frac{1}{n_p} h_p^{1/6} = \frac{1}{0,036} \cdot 1,18^{1/6} = 28,5 \text{ м}^{0,5}/\text{с}.$$

С учетом данных об уклонах водной поверхности, полученных в п. 7, рассчитаем значение пропускной способности русла при расчетных глубинах по формуле $Q_p = F_p C_p \sqrt{h_p I_p}$. Тогда:

$$Q_{p1,10} = 83,5 \cdot 31,4 \sqrt{1,03 \cdot 0,000174} = 35,1 \text{ м}^3/\text{с},$$

$$Q_{p1,25} = 108,5 \cdot 28,5 \sqrt{1,18 \cdot 0,000195} = 46,6 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Соответственно на основе таблицы Бредли:

$$C_{p1,10} = \frac{1}{0,029} \cdot 1,03^{1/6} = 34,6 \text{ м}^{0,5}/\text{с},$$

$$C_{p1,25} = \frac{1}{0,033} \cdot 1,18^{1/6} = 31,1 \text{ м}^{0,5}/\text{с},$$

$$Q_{p1,10} = 83,5 \cdot 34,6 \sqrt{1,03 \cdot 0,000174} = 38,6 \text{ м}^3/\text{с},$$

$$Q_{p1,25} = 108 \cdot 31,1 \sqrt{1,18 \cdot 0,000195} = 50,9 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Определим погрешности расчетов:

$$\sigma_{1,10} = \frac{35,1 - 36,0}{36,0} = -0,025, \text{ или } 2,5 \%,$$

$$\sigma_{1,25} = \frac{46,6 - 48,0}{48,0} = -0,029, \text{ или } 2,9 \%.$$

Соответственно при использовании таблицы Бредли:

$$\sigma_{1,10} = \frac{38,6 - 36}{36} = 0,072, \text{ или } 7,2 \%,$$

$$\sigma_{1,25} = \frac{50,9 - 48}{48} = 0,06, \text{ или } 6,0 \%.$$

Таким образом, и при использовании этой методики погрешности расчетов находятся в пределах точности измерений.

III. По методике, основанной на формуле Шези и таблицах коэффициента шероховатости:

а) Срибного, Карасева, ЛГМИ и Чоу ($n_p = 0,040$):

$$C_{p1,10} = \frac{1}{0,040} \cdot 1,03^{1/6} = 25,1 \text{ м}^{0,5}/\text{с},$$

$$C_{p1,25} = \frac{1}{0,040} \cdot 1,18^{1/6} = 25,7 \text{ м}^{0,5}/\text{с},$$

$$Q_p = F_p C_p \sqrt{h_p I_p}; \quad Q_{p1,10} = 83,5 \cdot 25,1 \sqrt{1,03 \cdot 0,00017} = 27,7 \text{ м}^3/\text{с},$$

$$Q_{p1,25} = 108 \cdot 25,7 \sqrt{1,18 \cdot 0,00017} = 42,1 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Определим погрешности расчетов:

$$\sigma_{1,10} = \frac{27,7 - 36}{36} = -0,23, \text{ или } -2,3 \%,$$

$$\sigma_{1,25} = \frac{42,1 - 48}{48} = -0,123, \text{ или } -12,3 \%;$$

б) таблице Бредли

$$C_{p1,10} = \frac{1}{0,037} \cdot 1,03^{1/6} = 27,1 \text{ м}^{0,5}/\text{с},$$

$$C_{p1,25} = \frac{1}{0,037} \cdot 1,18^{1/6} = 27,8 \text{ м}^{0,5}/\text{с},$$

$$Q_{p1,10} = 83,5 \cdot 27,1 \sqrt{1,03 \cdot 0,00017} = 29,9 \text{ м}^3/\text{с},$$

$$Q_{p1,25} = 108 \cdot 27,8 \sqrt{1,18 \cdot 0,00017} = 45,5 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Определим погрешности расчетов:

$$\sigma_{1,10} = \frac{29,9 - 36}{36} = -0,167, \text{ или } -16,7 \%,$$

$$\sigma_{1,25} = \frac{45,5 - 48}{48} = -0,052, \text{ или } -5,2 \%.$$

10. Как видно из полученных результатов, погрешности расчетов по методике, основанной на формуле Шези, в 2—3 раза больше, чем по двум предшествующим методикам. Это обусловлено не учетом в ней нестационарности движения и массообмена между русловым и пойменным потоками.

11. Выполним расчет пропускной способности поймы.

На основе профиля поперечного сечения поймы рассчитаем площади ее поперечного сечения и средние глубины при различных уровнях. По полученным значениям построим кривые $F_{\pi}=f(H)$, $B_{\pi}=f(H)$ и $h_{\pi}=f(H)$ и на их основе определим расчетные значения глубин и ширины русла. Получим следующие значения: при $h_p/h_{p.6}=1,10$; $F_{\pi}=27,2 \text{ м}^2$; $h_{\pi}=0,32 \text{ м}$; $h_p/h_{p.6}=1,25$; $F_{\pi}=49,8 \text{ м}^2$; $h_{\pi}=0,43 \text{ м}$.

По таблицам определяем значения коэффициента шероховатости поймы. (Пойма супесчаная, ровная, луговая, местами заболоченная. Используется под сенокосы.)

По	Срибному	Карасеву	Чоу	Бредли
	0,045	0,040	0,035	0,045

Принимая уклон водной поверхности потока поймы равным уклону водной поверхности руслового потока, т. е. 0,17‰, получаем:

а) на основе таблиц Срибного и Бредли:

$$C_{\pi 1,10} = \frac{1}{0,045} 0,32^{1/6} = 18,4 \text{ м}^{0,5}/\text{с}, \quad C_{\pi 1,25} = \frac{1}{0,045} 0,43^{1/6} = 19,3 \text{ м}^{0,5}/\text{с};$$

$$Q_{\pi 1,10} = 27,2 \cdot 18,4 \sqrt{0,32 \cdot 0,00017} = 3,7 \text{ м}^3/\text{с};$$

$$Q_{\pi 1,25} = 49,8 \cdot 19,3 \sqrt{0,43 \cdot 0,00017} = 8,1 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Определим погрешность расчетов на основе данных измерений на пойме в 1967 г. при $h_p/h_{p.6}=1,10$, $Q_{\pi.кр}=4,9 \text{ м}^3/\text{с}$ и при $h_p/h_{p.6}=1,25$, $Q_{\pi.кр}=16,1 \text{ м}^3/\text{с}$.

$$\sigma_{\pi 1,10} = \frac{3,7 - 4,9}{4,9} = -0,245, \text{ или } -24,5 \%,$$

$$\sigma_{\pi 1,25} = \frac{8,1 - 16,1}{16,1} = -0,497, \text{ или } -49,7 \%;$$

б) на основе таблицы Карасева:

$$C_{\pi 1,10} = \frac{1}{0,040} 0,32^{1/6} = 20,7 \text{ м}^{0,5}/\text{с},$$

$$C_{\pi 1,25} = \frac{1}{0,040} 0,43^{1/6} = 21,7 \text{ м}^{0,5}/\text{с},$$

$$Q_{\pi 1,10} = 27,2 \cdot 20,7 \sqrt{0,32 \cdot 0,00017} = 4,15 \text{ м}^3/\text{с},$$

$$Q_{\pi 1,25} = 49,8 \cdot 21,7 \sqrt{0,43 \cdot 0,00017} = 9,92 \text{ м}^3/\text{с},$$

$$\sigma_{п1,10} = \frac{4,15 - 4,9}{4,9} = -0,153, \text{ или } -15,3 \%,$$

$$\sigma_{п1,25} = \frac{9,92 - 16,1}{16,1} = -0,38,3 \text{ или } -38,3 \%;$$

в) на основе таблицы Чоу:

$$C_{п1,10} = \frac{1}{0,035} 0,32^{1/6} = 23,3 \text{ м}^{0,5}/\text{с};$$

$$C_{п1,25} = \frac{1}{0,035} 0,43^{1/6} = 24,8 \text{ м}^{0,5}/\text{с};$$

$$Q_{п1,10} = 27,2 \cdot 23,3 \sqrt{0,32 \cdot 0,00017} = 4,67 \text{ м}^3/\text{с};$$

$$Q_{п1,25} = 49,8 \cdot 24,8 \sqrt{0,43 \cdot 0,00017} = 10,6 \text{ м}^3/\text{с};$$

$$\sigma_{п1,10} = \frac{4,67 - 4,9}{4,9} = -0,047, \text{ или } -4,7 \%;$$

$$\sigma_{п1,25} = \frac{10,6 - 16,1}{16,1} = -0,342, \text{ или } -34,2 \%.$$

Выполняя анализ полученных результатов, следует отметить, что погрешности расчетов значительно превышают допустимые пределы. Исключение составляет лишь расчетное значение расхода воды, полученное с помощью таблицы коэффициента шероховатости Чоу, да и то только при относительной глубине русла 1,10. В остальных же случаях погрешности расчетов изменяются от 15,3 до 49,3 %.

Таким образом, методику расчетов пропускной способности пойм нельзя признать надежной. Она требует значительного усовершенствования.

ПРИЛОЖЕНИЕ 14

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ КОМИТЕТ ПО НАУКЕ
И ВЫСШЕЙ ШКОЛЕ РСФСР
ЛЕНИНГРАДСКИЙ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

Кафедра гидрометрии

ОТЧЕТ

по лабораторной работе № 2.8

«Режим потока при обтекании выступов на стенке»

Группа Г-

Состав бригады № 1:

1. _____
2. _____
3. _____
4. _____
5. _____

Руководитель _____

Ленинград 1991 г.

ПРИЛОЖЕНИЕ 15

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ КОМИТЕТ ПО НАУКЕ
И ВЫСШЕЙ ШКОЛЕ РСФСР
ЛЕНИНГРАДСКИЙ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

Кафедра гидрометрии

Тема _____

Ответственный исполнитель _____
(фамилия,

имя, отчество)

ЖУРНАЛ ОПЫТОВ

Серия № _____ Опыт № _____

Основные схемы, исходные условия и характеристики опытов и модели

Общие характеристики
опыта и модели

Схема установки

Характеристика Начало опыта Конец опыта

Время

Температура воды

Отсчет по водосливу

Отметка «0» водослива

Напор H

Расход воды

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15

ПРИЛОЖЕНИЕ 16

Варианты расчетных заданий к лабораторным работам № 3.1 и 3.2

№ вариан- та	<i>B</i>	<i>h₁</i>	Несвязные грунты		Связные грунты		Плотность
	см		<i>k₁</i> мм	<i>k₅/k</i>	грунт	<i>k₁</i> мм	
1	2	3	4	5	6	7	8
1	540	20	0,08	2,5	Глина	0,005	Очень плотная
2	540	20	0,12	2,5		0,006	
3	750	30	0,25	2,5		0,007	
4	960	40	0,40	2,0		0,008	
5	1200	50	0,95	2,0		0,009	
6	1200	50	1,00	2,0		0,011	Плотная
7	1200	50	1,30	2,0		0,010	
8	1700	80	1,50	2,0		0,012	
9	1800	80	2,00	2,0		0,013	
10	1900	80	2,50	2,0		0,014	
11	2000	80	3,00	1,5	Суглинки тяжелые	0,021	Средне- плотные
12	2400	100	4,00	1,5		0,018	
13	2100	100	4,50	1,5		0,019	
14	2400	100	5,00	1,5		0,020	
15	720	25	0,07	2,0		0,017	
16	720	25	0,07	2,0		0,022	Мало- плотные
17	900	35	0,10	2,0		0,023	
18	900	35	0,10	2,0		0,024	
19	1200	45	0,15	2,0		0,025	
20	1200	45	0,15	2,0		0,028	
21	1200	45	0,15	2,0	Суглинки средние	0,050	Плотные
22	1200	45	0,20	2,0		0,045	
23	1500	55	0,20	1,5		0,060	
24	1500	55	0,20	1,5		0,070	
25	1500	55	0,30	1,5		0,065	
26	1500	65	0,30	1,5		0,040	Очень плотные
27	1700	65	0,70	1,5		0,035	
28	540	27	0,08	2,5		0,048	
29	540	27	0,12	2,5		0,062	
30	960	37	0,25	2,5		0,045	
31	1200	47	0,40	2,5	Глина	0,0030	Плотная
32	1400	58	0,75	2,5		0,0035	
33	1400	58	1,00	2,5		0,0025	
34	1400	58	1,30	2,0		0,0040	
35	1800	58	1,40	2,0		0,0045	
36	1800	78	1,50	2,0		0,0050	Средне- плотная
37	1800	78	1,60	2,0		0,0055	
38	1900	78	1,70	2,0		0,0060	
39	2000	78	2,00	2,0		0,0065	
40	2000	96	2,5	2,0		0,0070	

Основные опознавательные признаки типов руслового процесса

1. Ленточногрядовый тип характеризуется наличием в русле единой цепи сползающих гряд, занимающих иногда всю ширину русла. Расстояние между соседними гребнями гряд (шаг) превосходит ширину русла. Пойма не свойственна этому типу. Плановые деформации русла не характерны. Высота гряд меняется по сезонам. Перемещение гряд наблюдается целый год, ослабевая в межень. Этот тип как самостоятельный не имеет большого распространения и наблюдается в местах, где существуют условия, способствующие плановой устойчивости русла.

2. Побочневый тип характеризуется сползанием в половодье единой цепи перекошенных относительно осевой линии русла гребней гряд. Направление перекоса смежных гряд противоположно. В межень выступающие вперед наиболее повышенные части гряд обсыхают, образуя песчаные отмели (побочни), прилегающие к берегам в шахматном порядке. Часто низовая оконечность обсохшего побочни выступает в русло косой, образуя затон. Пониженные затопленные части гребней перекошенных гряд образуют перекаты. Пойма отсутствует. Плановые деформации невелики. Меженное русло при побочневом типе в сравнении с ленточногрядовым более извилисто.

3. Ограниченное меандрирование характеризуется сползанием слабовыраженных излучин, появлением отдельных пойменных массивов с повышенной верховой частью. Побочни перемещаются только вместе с излучиной. Имеют место ограничивающие условия — трудноразмываемые высокие склоны. Пойма полностью перерабатывается.

4. Свободное меандрирование характеризуется наличием одного русла, сильно меандрирующего в широкой пойме. Ограничивающий фактор отсутствует. Поймы сохраняют следы перемещения русла в виде остатков береговых валов (грив), серповидно выгнутых в плане староречий. У вогнутых берегов размещаются плесовые ложбины, которые у сильно развитых излучин распадаются на две части.

5. Незавершенное меандрирование характеризуется наличием на меандрирующей реке спрямляющих протоков; развивается в сильно затопляемых поймах с легко размываемой поверхностью. Ограничивающий фактор отсутствует. Пойма более узкая, чем при свободном меандрировании.

6. Русловая многорукавность характеризуется распластанным руслом. Русло реки в целом не меандрирует. В русле большое количество осередков, островов, разделенных короткими протоками. При преобладании осередков над островами тип руслового процесса называют русловой многорукавностью осередкового типа, при преобладании островов — островного типа.

7. Пойменная многорукавность характеризуется наличием широкой поймы, в которой река протекает многими рукавами. Основное русло выделяется трудно из-за многочисленных, часто равноценных по размерам протоков. Отдельные рукава имеют значительную протяженность и могут рассматриваться как самостоятельные реки того или иного типа.

Измерители руслового процесса

Ленточногрядовый тип руслового процесса

1. Ширина русла B_p (м) — расстояние между бровками противоположных берегов.
2. Ширина меженного русла b (м) — расстояние между правым и левым урезами воды в межень.
3. Шаг гряды λ_r (м) — расстояние между гребнями двух следующих одна за другой гряд.
4. Высота гряды Δ_r (м) — возвышение гребня над подошвой подвалья гряды, измеренное по продольному профилю в том створе, где оно имеет наибольшее значение.
5. Скорость перемещения гряды C_r (м/год) определяется по данным разновременных съемок.

Побочневый тип руслового процесса

Первые два измерителя аналогичны измерителям при ленточногрядовом типе руслового процесса.

3. Шаг побочня $\lambda_{пб}$ (м) — расстояние по прямой между двумя смежными точками перегиба осевой линии меженного русла.
4. Высота гряды (побочня) $\Delta_{пб}$ — превышение гребня побочня над подошвой подвалья, измеренное в створе, где это превышение наибольшее.
5. Скорость перемещения побочня $C_{пб}$ (м/год) определяется по данным разновременных съемок.

Русловая многорукавность

1. Ширина русла B_p (м) — кратчайшее расстояние между бровками противоположных берегов.
2. Ширина меженного русла b (м) — расстояние между правым и левым урезами воды в межень.
3. Ширина поймы $B_{п}$ (м) — расстояние между правым и левым урезами воды в периоды высокой водности за вычетом ширины русла. Ширины русла и поймы приводятся как средние арифметические значения для участка из нескольких измерений по створам, которые расположены друг от друга на расстояниях, равных ширине русла или поймы. Таких равноудаленных друг от друга створов измерений на участке должно быть не менее пяти.
4. Плотность осередков $k_{ос}$ — отношение площади осередков f на выбранном участке русла к полной площади этого участка русла F

$$k_{ос} = f/F.$$

5. Густота осередков m — число осередков, находящихся на участке реки, длина которого равна средней ширине русла (B_p) при данном уровне воды.
6. Средняя площадь осередков $\bar{f}$ (м²) — отношение плотности осередков $k_{ос}$ к их густоте m

$$\bar{f} = k_{ос} B_p^2 / m.$$

Этот измеритель выражает площадь среднего осередка. Величины $k_{ос}$, m и $\bar{f}$ в данной работе определяются при меженном стоянии уровня воды.

7. Скорость перемещения осередков $c_{ос}$ м/год определяется делением площади размыва или намыва f_p на наибольшую длину фронта L_p и время размыва или намыва T

$$c_{ос} = f_p / (L_p T).$$

Здесь T — период между съемками.

Для участка (если осередков несколько) приводится значение скорости для каждого осередка и среднее значение из всех определений. Результаты определений свести в таблицу.

8. Скорость плановых деформаций c_n (м/год) — площадь плановых деформаций (размылов или отложений) берегов, отнесенная к единице времени t (год) и единице протяженности русла L_p :

$$c_n = f_p / (L_p t) \text{ (для берега).}$$

9. Плановая устойчивость русла c_p (1/год) — среднее годовое смещение русла, выраженное в долях от полной ширины русла.

Ограниченное меандрирование

1. Шаг излучины λ_n (м) — расстояние по прямой между двумя смежными точками перегиба осевой линии меженного русла.

2. Угол разворота излучины α_n — угол, образованный касательными к осевой линии русла, проведенными через точки перегиба, ограничивающие данную излучину.

3. Ширина русла B_p (м) — расстояние между бровками противоположных берегов.

4. Ширина меженного русла b (м) — расстояние между урезами противоположных берегов меженного русла.

5. Ширина пояса меандрирования B_m (м) — расстояние между линиями, огибающими вершины правобережных и левобережных излучин.

Свободное меандрирование

1. Шаг излучины λ_n (м) — расстояние по прямой между точками перегиба осевой линии русла, ограничивающими излучину.

2. Длина излучины S_n (м) — расстояние между теми же точками, измеренное по осевой линии русла (фарватеру).

3. Относительная длина излучины S_n/λ_n — отношение длины излучины к ее шагу.

4. Угол входа α_v — угол, образованный линией шага и вектором, направленным в сторону течения по касательной к осевой линии в верховой точке ее перегиба.

5. Угол выхода α_n — угол, образованный продолжением линии шага и вектором, проходящим через низовую точку перегиба.

6. Угол разворота α_p — угол, образованный двумя названными выше векторами и равный сумме углов входа и выхода, т. е.

$$\alpha_p = \alpha_v + \alpha_n.$$

7. Угол сопряжения излучин β — угол, образованный продолжением линии шага вышележащей излучины и линией шага рассматриваемой излучины (см. рис. 4.1). Он равен разности угла входа нижележащей α_{v2} и угла выхода вышележащей излучины $\beta = \alpha_{v2} - \alpha_{n1}$. Если $\alpha_v > \alpha_{n1}$, линия шага отклоняется вправо, если $\alpha_{v2} < \alpha_{n1}$, линия шага отклоняется влево.

8. Высота излучины y_m — расстояние от линии шага до наиболее удаленной точки осевой линии русла.

9. Показатель асимметрии излучины ϵ — тангенс угла γ , образованного перпендикуляром к линии шага, проходящим через ее среднюю точку, с наиболее удаленной точкой осевой линии русла

$$\epsilon = (2x_m - \lambda_n) / (2y_m).$$

Здесь x_m — расстояние между верховой точкой перегиба (начало линии шага) и прямоугольной проекции на линию шага наиболее удаленной точки осевой линии русла.

10. Скорость перемещения береговой линии (подмываемой бровки) c_b . Здесь имеется в виду средняя скорость перемещения береговой линии, определенная для отдельного подмываемого участка, соответствующего одной излучине.

Она определяется по выражению

$$c_6 = F/(LT).$$

Здесь F — площадь размыва; L — длина фронта размыва; T — период между съемками.

Незавершенное меандрирование

1. Длина спрямляемого участка реки S_p (м) — расстояние по осевой линии основного русла от верховой до низовой точки спрямляющей протоки. Величина S_p может быть и больше и меньше длины соответствующей излучины S_n .

2. Длина спрямляющей протоки S_n — расстояние между верховой и низовой точками, измеренное по осевой линии протоки.

3. Относительная длина русла $\alpha_s = S_p/S_n$.

4. Относительная площадь живого сечения русла $\alpha_\Delta = F_p/F_n$. Здесь F_p и F_n — живое сечение соответственно основного русла и протоки. Значение α_Δ будет меняться в зависимости от уровня воды в реке.

Пойменная многорукавность

Пойменная многорукавность является лишь количественным развитием незавершенного меандрирования. Она собирает в себе проявления руслового процесса, присущие руслам рек других типов. Измерители процесса остаются теми же, что и в соответствующих описанных выше типах рек.

ПРИЛОЖЕНИЕ 19

Варианты расчетных заданий к лабораторной работе № 4.1

№ варианта	Масштаб съемки				
	рис. 4.2	рис. 4.3	рис. 4.4	рис. 4.5	рис. 4.6
1	1:2 000	1:2 500	1:5 000	1:10 000	1:25 000
2	1:25 000	1:5 000	1:10 000	1:25 000	1:50 000
3	1:5 000	1:10 000	1:25 000	1:50 000	1:2 000
4	1:10 000	1:2 000	1:50 000	1:2 000	1:2 500
5	1:25 000	1:50 000	1:2 000	1:2500	1:5 000
6	1:50 000	1:25 000	1:2 500	1:5000	1:10 000
7	1:1 000	1:2 000	1:25 000	1:2500	1:5 000
8	1:2 000	1:1 000	1:50 000	1:10 000	1:2 500
9	1:2 500	1:5 000	1:10 000	1:25 000	1:50 000
10	1:5 000	1:2 000	1:25 000	1:50 000	1:1 000
11	1:10 000	1:25 000	1:50 000	1:1 000	1:2 000
12	1:25 000	1:2 000	1:5 000	1:5 000	1:50 000
13	1:50 000	1:500	1:1 000	1:2 000	1:2 500
14	1:500	1:1 000	1:2 000	1:2 500	1:5 000
15	1:1 000	1:500	1:2 500	1:5 000	1:50 000
16	1:2 500	1:500	1:5 000	1:1 000	1:10 000
17	1:5 000	1:1 000	1:500	1:10 000	1:2 000
18	1:10 000	1:2 500	1:1 000	1:2 000	1:500
19	1:25 000	1:2 500	1:1 000	1:50 000	1:10 000
20	1:50 000	1:10 000	1:2 000	1:1 000	1:500
21	1:500	1:5 000	1:2 500	1:10 000	1:25 000
22	1:500	1:10 000	1:5 000	1:25 000	1:50 000
23	1:1 000	1:25 000	1:2 000	1:500	1:2 500
24	1:2 000	1:50 000	1:5 000	1:25 000	1:500
25	1:500	1:50 000	1:2 500	1:2 000	1:10 000
26	1:1 000	1:2 500	1:1 000	1:5 000	1:25 000
27	1:2 000	1:500	1:25 000	1:2 500	1:50 000
28	1:2 500	1:1 000	1:50 000	1:500	1:10 000
29	1:5 000	1:10 000	1:50 000	1:1 000	1:2 000
30	1:10 000	1:5 000	1:25 000	1:500	1:1 000

ПРИЛОЖЕНИЕ 20

Варианты расчетных заданий к лабораторной работе № 4.2

№ вариан- та	Коэффициент		B_0 м	h_0 м	№ вариан- та	Коэффициент		B_0 м	h_0 м
	сжатия	расши- рения				сжатия	расши- рения		
1	0,40	1,03	100	2,00	5	0,48	1,07	120	2,20
2	0,42	1,04	105	2,05	6	0,50	1,08	125	2,25
3	0,44	0,05	110	2,10	7	0,52	1,09	130	2,30
4	0,46	1,06	115	2,15	8	0,54	1,10	135	2,10

№ вариан- та	Коэффициент		B_0 м	h_0 м	№ вариан- та	Коэффициент		B_0 м	h_0 м
	сжатия	расши- рения				сжатия	расши- рения		
9	0,56	1,11	140	2,15	25	0,86	1,05	105	2,10
10	0,58	1,12	145	2,20	26	0,87	1,10	110	2,15
11	0,60	1,13	150	2,25	27	0,88	1,15	115	2,00
12	0,62	1,14	155	2,30	28	0,89	1,20	120	2,00
13	0,64	1,15	160	2,00	29	0,90	1,25	125	2,00
14	0,66	1,16	165	2,05	30	0,41	1,10	130	2,05
15	0,68	1,17	170	2,10	31	0,43	1,15	135	2,05
16	0,70	1,18	175	2,15	32	0,45	1,20	140	2,05
17	0,72	1,19	180	2,20	33	0,47	1,25	145	2,05
18	0,74	1,20	185	2,25	34	0,49	1,30	150	2,10
19	0,76	1,21	190	2,00	35	0,51	1,05	155	2,10
20	0,78	1,22	195	2,10	36	0,53	1,03	160	2,10
21	0,80	1,23	200	2,20	37	0,55	1,04	165	2,10
22	0,82	1,24	205	2,30	38	1,05	1,10	170	2,00
23	0,84	1,25	210	2,35	39	1,06	1,20	175	2,00
24	0,85	1,00	100	2,05	40	1,10	1,25	180	2,00

ПРИЛОЖЕНИЕ 21

Варианты расчетных заданий к лабораторной работе № 5.1

№ варианта	W_0 млн. м ³	l_p км	F_B м ²	S тыс. г/м ³	Q_0 м ³ /с
1	300	30	500	2,0	500
2	250	28	400	2,1	400
3	400	38	650	2,3	700
4	350	32	530	1,9	600
5	280	32	500	2,1	550
6	290	31	450	2,2	440
7	300	28	460	2,1	500
8	280	30	500	2,2	450
9	290	32	510	2,1	500
10	275	36	550	2,5	600
11	310	37	600	2,8	580
12	450	40	320	1,8	500
13	500	42	530	3,0	600
14	600	45	620	2,7	650
15	650	50	640	3,2	700
16	610	48	600	2,8	650
17	260	28	350	2,0	450
18	270	29	370	2,1	500
19	280	30	400	3,2	520
20	290	32	420	2,1	550
21	300	32	540	2,3	540
22	500	40	430	2,2	500
23	510	42	520	1,8	480
24	520	44	530	1,6	550
25	530	45	550	1,5	600

ПРИЛОЖЕНИЕ 22

Варианты расчетных заданий к лабораторной работе № 5.2

№ варианта	q м ² /с	h_2 м	k мм	№ варианта	q м ² /с	h_2 м	k мм
1	40	14,0	0,5	14	35	12,8	0,4
2	42	14,5	0,6	15	37	12,5	0,6
3	44	14,6	0,4	16	39	12,6	0,6
4	46	14,7	0,3	17	41	13,0	0,5
5	48	14,8	0,4	18	43	14,0	0,5
6	50	15,0	0,3	19	45	24,2	0,6
7	38	13,0	0,4	20	47	14,5	0,7
8	36	13,0	0,4	21	49	15,0	0,4
9	34	12,8	0,4	22	51	15,2	0,4
10	32	12,6	0,5	23	53	15,4	0,3
11	31	12,0	0,3	24	55	15,6	0,3
12	30	12,0	0,4	25	57	16,9	0,3
13	33	12,2	0,4				

ПРИЛОЖЕНИЕ 23

Варианты расчетных заданий к лабораторной работе № 5.3

№ варианта	Q рф тыс. м ³ /с	B м	n	I 0/00	k мм
1	3,0	400	0,040	0,070	0,55
2	3,0	420	0,040	0,065	0,60
3	3,0	440	0,045	0,060	0,65
4	3,0	460	0,040	0,055	0,70
5	3,0	480	0,040	0,050	0,65
6	3,5	410	0,035	0,055	0,60
7	3,5	430	0,030	0,060	0,65
8	3,3	450	0,035	0,065	0,60
9	3,2	420	0,040	0,060	0,65
10	3,1	410	0,045	0,065	0,70
11	4,0	500	0,035	0,070	0,55
12	4,1	510	0,030	0,065	0,60
13	4,2	520	0,030	0,070	0,50
14	4,3	530	0,035	0,075	0,55
15	4,5	550	0,040	0,080	0,50
16	4,6	560	0,035	0,085	0,50
17	4,7	570	0,035	0,095	0,45
18	4,8	580	0,030	0,095	0,50
19	4,9	590	0,035	0,100	0,40
20	5,0	600	0,030	0,095	0,45
21	5,2	620	0,040	0,090	0,40
22	5,4	640	0,030	0,085	0,45
23	5,6	660	0,035	0,080	0,40
24	5,8	680	0,030	0,100	0,40
25	6,0	700	0,035	0,095	0,50

ПРИЛОЖЕНИЕ 24

Варианты расчетных заданий к лабораторной работе № 5.4

№ варианта	v м/с	h м	k	k _{ss}	b м	k _φ
			мм			
1	2,0	3,5	0,3	0,5	3,0	1,0
2	2,1	3,6	0,4	0,6	3,2	1,0
3	2,2	3,7	0,4	0,6	3,2	1,0
4	2,3	3,8	0,4	0,6	3,4	0,85
5	2,4	3,9	0,5	0,7	3,5	0,85
6	2,5	4,0	0,5	0,7	3,5	1,24
7	2,6	4,1	0,5	0,7	4,0	1,24
8	2,7	4,0	0,5	0,7	3,5	1,22
9	2,8	3,9	0,3	0,5	3,0	1,22
10	2,9	3,8	0,5	0,5	2,5	0,73
11	3,0	4,0	0,6	0,9	3,0	0,73
12	1,5	2,0	0,3	0,6	4,0	0,65
13	1,6	2,2	0,3	0,6	4,0	0,65
14	1,7	2,4	0,4	0,7	4,0	1,0
15	1,8	2,6	0,4	0,8	3,5	1,0
16	1,9	2,8	0,4	0,8	3,5	1,46
17	2,0	3,0	0,5	0,9	3,2	1,46
18	2,1	3,2	0,5	0,9	2,5	1,46
19	2,2	3,0	0,5	1,0	2,6	1,22
20	2,3	3,0	0,4	0,7	2,7	1,22
21	2,4	3,2	0,6	0,9	2,8	1,22
22	2,5	3,2	0,6	1,0	2,9	1,0
23	1,2	2,0	0,3	0,5	2,0	1,0
24	1,4	2,2	0,3	0,6	2,0	0,85
25	1,5	2,5	0,3	0,6	2,0	0,85

ПРИЛОЖЕНИЕ 25

Варианты расчетных заданий к лабораторной работе № 5.5

№ варианта	$Q_{p.6}$ тыс. м³/с	$\frac{Q_{сж}}{Q_{p.6}}$	h_{p6} м	k_p мм	l_m м	T сут	L_p км	$\beta_{п}$
1	10,0	1,85	10,0	0,40	100	20	12,0	1,5
2	11,0	1,7	11,0	0,30	120	15	14,0	1,6
3	12,0	1,8	12,0	0,50	110	12	15,0	1,6
4	7,0	1,5	8,0	0,25	100	10	8,0	1,7
5	8,0	1,6	8,2	0,30	100	10	8,5	1,7
6	9,0	1,7	8,5	0,35	110	6	8,5	1,8
7	7,5	1,8	6,8	0,40	90	6	6,5	1,8
8	8,5	1,9	7,5	0,25	90	7	7,0	1,8
9	9,5	2,0	10,0	0,50	90	7	10,0	1,5
10	7,0	2,1	6,3	0,25	80	8	5,5	1,5
11	7,2	2,2	6,5	0,25	80	8	6,0	1,5
12	7,4	2,3	7,0	0,30	80	9	6,0	1,6
13	7,6	2,4	7,5	0,30	80	9	7,0	1,7
14	7,8	2,5	8,0	0,30	80	15	7,0	1,8
15	8,0	1,2	8,0	0,40	70	15	7,0	1,9
16	8,2	1,4	8,0	0,40	70	15	8,0	2,0
17	8,4	1,6	7,8	0,40	70	20	9,0	2,1
18	8,6	1,8	7,8	0,25	70	20	9,0	1,6
19	8,8	1,9	9,0	0,35	100	20	10,0	1,6
20	9,0	1,3	9,0	0,40	100	25	10,0	1,8
21	9,2	1,5	9,0	0,40	100	25	11,0	1,8
22	9,4	1,6	10,0	0,50	110	25	12,0	1,8
23	9,6	1,7	10,0	0,50	120	25	12,0	2,0
24	9,8	1,2	11,0	0,50	120	30	14,0	2,0
25	10,0	2,0	11,0	0,50	120	30	15,0	2,0

ПРИЛОЖЕНИЕ 26

Варианты расчетных заданий к лабораторной работе № 5.6

№ варианта	Q м³/с	k мм	$\frac{k_s}{k}$	m	Вид связного грунта
1	500	0,15	2,0	5	Супесь
2	600	0,15	2,0	5	Супесь
3	700	0,20	2,0	5	Супесь
4	750	0,20	3,0	6	Суглинок
5	800	0,18	3,0	6	Суглинок
6	850	0,20	3,0	6	Суглинок
7	900	0,25	4,0	7	Суглинок
8	1000	0,25	4,0	7	Глина
9	1100	0,27	4,0	7	Глина
10	1150	0,28	5,0	8	Глина
11	1200	0,30	5,0	8	Глина
12	1250	0,20	5,0	8	Супесь
13	1300	0,21	2,0	6	Супесь
14	1400	0,22	2,0	6	Супесь
15	1500	0,23	2,0	6	Супесь
16	1600	0,25	3,0	7	Суглинок
17	1700	0,25	3,0	7	Суглинок
18	1800	0,25	3,0	7	Суглинок
19	1900	0,20	4,0	8	Суглинок
20	2000	0,20	4,0	8	Глина
21	2100	0,30	4,0	8	Глина
22	2200	0,30	5,0	9	Глина
23	2250	0,27	5,0	9	Глина
24	2300	0,28	2,0	9	Супесь
25	2400	0,29	3,0	6	Супесь

ПРИЛОЖЕНИЕ 27

Лабораторная работа № 5.1

Кривые подпора и деформации русла в верхнем бьефе плотины

Лабораторная работа № 5.1

“ ” 19 г. Группа №

Начало опыта час. мин. Состав бригады:

Конец опыта час. мин. 1.

Расход $Q = \text{л/с}$ 2.

Ширина потока $B = \text{м}$ 3.

Высота плотины $H_{\text{п}} = \text{м}$ 4.

Уклон дна $I =$ 5.

1. Размещение створов и реек

№ рейки	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Расстояние от плотины														
Отметка дна														

2. Отсчеты начала и конца призмы занесения

№ отсчета	Время, ч., мин.	Начало призмы		Высота призмы	Конец призмы	
		от рейки №	на расстоянии		от рейки №	на расстоянии

3. Отметка дна и уровней потока

№ измерения	Время	Отметки по рейкам					
		рейка №		рейка №		рейка №	
		дно	поверхность	дно	поверхность	дно	поверхность

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алтуни В. С. Мелиоративные каналы в земляных руслах.— М.: Жолос, 1979.— 255 с.
2. Барышников Н. Б. Морфология, гидрология и гидравлика пойм.— Л.: Гидрометеониздат, 1984.— 280 с.
3. Барышников Н. Б., Попов И. В. Динамика русловых потоков и русловые процессы.— Л.: Гидрометеониздат, 1988.— 455 с.
4. Близняк Е. В., Никольский В. М. Гидрология и водные исследования.— М.—Л.: Речной флот, 1946.— 428 с.
5. Векслер А. Б., Доненберг В. М. Переформирование русла в нижних бьефах крупных гидроэлектростанций.— М.: Энергоатомиздат, 1983.— 217 с.
6. Великанов М. А. Гидрология суши.— Л.: Гидрометеониздат, 1981.— 310 с.
7. Гончаров В. Н. Динамика русловых потоков.— Л.: Гидрометеониздат, 1962.— 374 с.
8. Готлиб Я. Л., Донченко Р. В., Пехович А. И., Соколов И. Н. Лед в водохранилищах и нижних бьефах ГЭС.— Л.: Гидрометеониздат, 1983.— 199 с.
9. Гринвальд Д. И., Никора В. А. Речная турбулентность. Л.: Гидрометеониздат, 1988.— 152 с.
10. Гришанин К. В. Теория руслового процесса.— М.—Л.: Транспорт, 1972.— 215 с.
11. Гришанин К. В. Основы динамики русловых потоков.— М.: Транспорт, 1990.— 320 с.
12. Гришанин К. В., Гладков Г. Л. Динамика русловых потоков (методические указания по выполнению лабораторных работ).— Л.: Изд. ЛИВТ, 1988.— 16 с.
13. Грушевский М. С. Неустановившееся движение воды в реках и каналах.— Л.: Гидрометеониздат, 1982.— 288 с.
14. Железняков Г. В., Данилевич В. В. Точность гидрологических расчетов и измерений.— Л.: Гидрометеониздат, 1966.— 240 с.
15. Железняков Г. В. Теория гидрометрии. 2-е изд.— Л.: Гидрометеониздат, 1976.— 334 с.
16. Железняков Г. В. Пропускная способность русел рек и каналов.— Л.: Гидрометеониздат, 1984.— 210 с.
17. Журавлев М. М. Местный размыв у опор мостов.— М.: Транспорт, 1984.— 113 с.
18. Карасев И. Ф. Речная гидрометрия и учет водных ресурсов.— Л.: Гидрометеониздат, 1980.— 310 с.
19. Караушев А. В. Речная гидравлика.— Л.: Гидрометеониздат, 1969.— 416 с.
20. Коваленко В. В. Гидрологическая измерительная техника.— Л.: Изд-во ЛПИ (ЛГМИ), 1984.— 73 с.
21. Кондратьев Н. Е., Попов И. В., Сنيщенко Б. Ф. Основы гидроморфологической теории руслового процесса.— Л.: Гидрометеониздат, 1982.— 272 с.
22. Лапшенков В. С. Прогнозирование русловых деформаций в бьефах гидроузлов.— Л.: Гидрометеониздат, 1979.— 239 с.
23. Лукашук Л. В. Общий размыв русел на мостовых переходах.— М.: Транспорт, 1976.— 121 с.
24. Маккавеев Н. И., Чалов Р. С. Русловые процессы.— М.: МГУ, 1988.— 264 с.

25. Мирцхулава Ц. Е. Основы физики и механики эрозии русел.— Л.: Гидрометеониздат, 1988.— 303 с.
26. Мозгунов Г. И., Лобода Н. С. Методические указания к практическим занятиям «Расчет статистических характеристик турбулентности».— Одесса: Изд-во ОГМИ, 1988.— 59 с.
27. Наблюдения на гидрометеорологической сети СССР. Определение понятий гидрометеорологических элементов и оценка точности наблюдений.— Л.: Гидрометеониздат, 1970.— 92 с.
28. Наставление гидрометеорологическим станциям и постам. Вып. 6, ч. 1, 3-е изд.— Л.: Гидрометеониздат, 1978.— 384 с.
29. Наставление по изысканиям и проектированию железнодорожных и автодорожных мостовых переходов через водотоки (НИМП-72).— М.: Транспорт, 1972.— 280 с.
30. Полтавцев В. И., Спицын И. П., Винников С. Д. Гидрологическое лабораторное моделирование.— Л.: Изд-во ЛПИ (ЛГМИ), 1982.— 142 с.
31. Попов И. В., Кочаненкова Н. П. О морфологических особенностях речных пойм.— Труды ГГИ, 1972, вып. 190, с. 19—36.
32. Рекомендации по гидравлическому расчету крупных каналов.— М.: ГКНТ, 1988.— 153 с.
33. Рекомендации по расчету местных размывов русел, сложенных из скальных грунтов, за креплениями средненапорных водосливных плотин (П 90—80).— Л.: ВНИИГ, 1981.— 39 с.
34. Рекомендации по расчету трансформации русел в нижних бьефах гидроузлов (П-95-81).— Л.: Изд-во ВНИИГ, 1981.— 98 с.
35. Рекомендации по учету руслового процесса при проектировании ЛЭП.— Л.: Гидрометеониздат, 1973.— 180 с.
36. Руководство по гидрологическим расчетам при проектировании водохранилищ.— Л.: Гидрометеониздат, 1983.— 283 с.
37. Руководство по лабораторным работам по экспериментальной физике атмосферы/Под ред. Л. Г. Качурин а.— Л.: Гидрометеониздат, 1969.— 510 с.
38. Указания по расчету заиления водохранилищ при строительном проектировании.— Л.: Гидрометеониздат, 1973.— 55 с.
39. Федотов Г. А. Расчеты мостовых переходов с применением ЭЦВМ.— М.: Транспорт, 1977.— 208 с.
40. Leopold L. B., Wolman M. G., Muller T. P. Fluvial processes in geomorphology. San Francisco — London, 1962.— 522 p.