Министерство высшего и среднего специального образования РСФСР

ЛЕНИНГРАДСКИЙ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

Н. Б. БАРЫШНИКОВ

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ РУСЛОВОГО И ПОЙМЕННОГО ПОТОКОВ

Утверждено ученым советом института в качестве конспекта лекций

ЛЕНИНГРАДСКИЙ ОРДЕНА ЛЕНИНА
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
имени М. И. КАЛИНИНА

ЛЕНИНГРАД
1984

УДК 556.536

Барышников Н. Б. Взаимодействие руслового и пойменного потоков. Конспект лекций. — Л., Изд. ЛПИ, 1984, с. 50. (ЛГМИ).

В конспекте лекций излагается один из наиболее сложных и важных разделов по курсу «Динамика русловых потоков и русловые процессы», посвященный эффекту взаимодействия руслового и пойменного потоков и методике расчета пропускной способности русел сложной формы. Приведена методика расчета петлеобразных кривых расходов воды.

Конспект лекций предназначен для студентов-гидрологов гидрометеорологических институтов и географических факультетов университетов.

Табл. 1. Илл. 15. Библ. 15.

Рецензенты: кафедра гидрологии суши Ленинградского государственного университета имени А. А. Жданова; *А. Ф. Кудряшов*, канд. техн. наук, доцент (Ленинградский сельскохозяйственный институт).

© Ленинградский гидрометеорологический институт (ЛГМИ), 1984

Ленинградский
Гидрометеорологический ин-т
БИБЛИОТЕКА
Л-д 193196, Малоохтенский пр., 98

ВВЕДЕНИЕ

Русла с поймами — частный случай сложносоставных русел, отличительной особенностью которых является наличие двух и более потоков, движущихся с различными скоростями параллельно или под различными углами друг к другу. При взаимодействии потоков возникают дополнительные сопротивления, существенно изменяющие пропускную способность таких русел. Аналогичные явления могут возникнуть и при движении потока непосредственно по пойме, глубина и шероховатость которой обычно резко изменяются по ширине. Возможны случаи резкого изменения шероховатости русла и поймы без заметного изменения глубин. Последние случаи также подлежат рассмотрению, ибо различие скоростей потоков, являющееся основной причиной эффекта их взаимодействия, изменения сопротивлений и пропускной способности, может быть весьма значительным.

Первые сведения об особенностях пропускной способности русел с поймами приводятся Ф. Форхгеймером [14], который указывает, что расчетное значение расхода воды, определенное по выражению

$$Q = Q_р + Q_п = C_р \sqrt{h_р I_р}\, \omega_р + C_п \sqrt{h_п I_п}\, \omega_п, \qquad (1)$$

будет больше фактического. Уменьшение пропускной способности русла с поймой он объясняет, ссылаясь на работу Грантца (1926 г.), образованием вихрей с вертикальной осью вращения, возникающих на границе раздела руслового и пойменного потоков.

Несколько позднее М. Эгли провел обширные исследования взаимодействующих потоков на крупномасштабной модели Эльзасского канала в г. Меце. Длина канала в масштабе 1 : 20 составила 209,2 м, а сечение представляло собой трапецеидальное русло с шириной по дну 1,65 м с односторонней, также трапецеидальной поймой. Однако детальные эксперименты М. Эгли не выявили особенностей поведения потоков в сложносоставных руслах. М. Эгли в качестве одного из основных выводов приводит следующий: «Распределение общего расхода между различными частями сечения происходит пропорционально глубине потоков и шероховатости стенок каждой части...». Хотя Эгли и установил наличие поперечных течений, но он объяснил их неравномерностью режима потока в составном русле.

Примерно в это же время Б. В. Поляков в одной из своих работ привел ряд кривых расходов воды для русловой части р. Дона, на которых четко прослеживается их перегиб и значительное отклонение влево при уровнях, превышающих уровни выхода воды на пойму. Однако Б. В. Поляков также не дал объяснения этому факту.

И только в 1947—1950 годах Г. В. Железняков [6], выполнивший анализ экспериментальных данных по изучению руслового и пойменного потоков, полученных на прямолинейной модели русла с двусторонней поймой, обнаружил существенное уменьшение средних и поверхностных скоростей руслового потока под влиянием пойменного, впоследствии названное им кинематическим эффектом взаимодействия безнапорного руслового и пойменного потоков. Пионерные исследования Г. В. Железнякова положили начало широкому изучению различных аспектов этой сложной и очень важной для решения ряда практических задач проблемы.

1. ЛАБОРАТОРНЫЕ И НАТУРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ РУСЛОВОГО И ПОЙМЕННОГО ПОТОКОВ

1.1. Лабораторные исследования

Дальнейшие исследования первоначально выполнялись на моделях различной длины, где русло с одной или двумя поймами создавалось при параллельности их геометрических осей.

Несколько позднее Н. Б. Барышниковым [1] и А. Л. Радюком [10] были выполнены экспериментальные исследования процесса взаимодействия потоков, протекающих по поверхности с резко отличной шероховатостью и примерно равной глубиной по ширине. На модели в лаборатории Ленинградского гидрометеорологического института было сформировано русло, на котором по всей длине установки на двух полосах, шириной 0,75 м каждая, была нанесена различная шероховатость (1,8 и 4,5 см), а дно средней полосы было покрыто стеклом толщиной 7 мм. Таким образом, были образованы три отсека с различной шероховатостью по ширине. Изучение процессов взаимодействия потоков в этих отсеках осуществлялось по методике, разработанной ранее в институте, т. е. измерения их параметров выполнялись при режиме, близком к равномерному как в изолированных, так и во взаимодействующих отсеках потока.

Особенностью экспериментов, проведенных под руководством Н. Б. Барышникова, как на модели русла с поймами, так и на моделях русла с неоднородной шероховатостью по ширине, явилось изучение эффекта взаимодействия, возникающего при непараллельности динамических осей руслового и пойменного потоков. Описание моделей, методики проведения экспериментов и полученные выводы приводятся как в отечественных, так и в зарубежных работах. Поэтому остановимся более детально на анализе полученных результатов и выводах, сделанных авторами исследований.

Как вытекает из анализа опубликованных работ [1 и др.], при движении потоков с различными скоростями на границе их раздела сначала (при малых скоростях) возникает вертикально расположенная волновая поверхность. По мере роста скоростей от нее отделяются вихри с вертикальной осью вращения, которые по закону Кутта-Жуковского перемещаются в поток, движущийся с большими скоростями. Следовательно, эти вихри, захватывая массы жидкости пойменного потока, переносят их в русловой, тем самым осуществляя массообмен между потоками в русле и пойме и торможение пойменным потоком руслового.

Теоретический анализ процесса взаимодействия руслового и пойменного потоков впервые выполнен В. Н. Гончаровым [5], а наличие вихрей на границе взаимодействующих потоков впервые экспериментальным путем установлено И. П. Спицыным [13] и несколько позднее подтверждено Р. Х. Селлиным.

Интересные результаты получены А. Л. Радюком при измерениях на р. Большой Енисей на участке длиной 300 м с каменистой односторонней поймой. «При очень большой разнице скоростей руслового (5 м/с) и пойменного (0,4 м/с) потоков по всей линии соприкосновения потоков поймы и русла четко просматривалась вихревая дорожка. Зона вихрей захватывала незначительную часть поймы и большую часть ширины русла. Вихри с вертикальной осью вращения зарождаются сразу же после слияния потоков поймы и русла и вращаются против часовой стрелки, постепенно увеличиваясь в диаметре до определенного предела. Диаметры вихрей изменялись в пределах от 15 до 150 см. Затем вихревые структуры начинают смещаться в сторону руслового потока, угловая скорость их вращения уменьшается, происходит распад вихрей на более мелкие локальные массы, которые рассеиваются в окружающей среде. Продолжительность «жизни» отдельных вихрей составляла от 2 до 6 сек» [10, с. 3—4]. Аналогичные вихри, но на границе взаимодействующих отсеков потока, протекающего по поверхности, имеющей резко неоднородную шероховатость и постоянную глубину по ширине, были обнаружены Н. Б. Барышниковым совместно с В. Г. Саликовым [1].

Визуальные наблюдения, а также данные, приведенные на фотографиях, полученных через небольшой интервал времени, позволили сделать вывод о том, что указанные вихри имеют форму фигуры, ограниченной вытянутым эллипсом, большая ось которого постепенно сжимается и, к моменту отрыва вихря, его форма становится близкой к кругу.

На процесс образования, перемещения и обтекания русловым потоком вихрей, а также на замещающие течения затрачивается значительное количество энергии, что приводит к уменьшению пропускной способности руслового отсека и деформации поля скоростей потока в нем. Величина дополнительного сопротивления в этом случае может быть оценена по формуле

$$\tau = A_b \frac{\partial v}{\partial b},$$

где A_b — коэффициент турбулентного обмена между взаимодействующими потоками; $\frac{\partial v}{\partial b}$ — градиент осредненных по вертикали скоростей в зоне взаимодействия потоков.

Таким образом, величина сопротивления пропорциональна разности, точнее градиенту скоростей потоков. Поэтому аналогичная картина сопротивлений наблюдается и при взаимодействии отсеков потоков, протекающих по поверхности с различной шероховатостью по ширине, где градиент скоростей на их границе обусловлен не разностью глубин, а различием шероховатости дна.

Дальнейшие работы связаны с экспериментальным исследованием взаимодействия потоков при непараллельности их динамических осей. Первым исследованием является работа Н. А. Ржаницына, выполненная на модели малых размеров. Детальными и тщательно выполненными явились экспериментальные исследования, начатые под руководством В. Н. Гончарова в лаборатории ЛГМИ в 1959 г. и продолженные его учениками в последующий период [1, 5]. Результаты этих исследований дали первые количественные характеристики эффекта взаимодействия руслового и пойменного потоков. На рис. 1 приведены основные характеристики моделей и поля скоростей по измерениям 1959—1960 гг.

Итоги работ раннего периода, обобщенные Гончаровым, сводятся к следующим. При малых затоплениях поймы ($H_п \leqslant 0{,}2\ H_р$) ведущим является русловой поток, влияние на него пойменного невелико. Оно сказывается в уменьшении пропускной способности русла в результате перелива масс жидкости из русла на пойму и, наоборот, из поймы в русло; в уменьшении интенсивности циркуляционных течений и выравнивании эпюр распределения скоростей по глубине потока.

При глубинах $H_п \geqslant 0{,}2\ H_р$ по данным В. Н. Гончарова ведущим становится пойменный поток. При этом отмечаются следующие отличия от предыдущего случая:

а) массы потока в русле, переливающиеся на пойму, уменьшают скорости до нормальных значений для пойменного потока на значительно большей длине, чем при малом наполнении поймы [5];

б) распределение скоростей по ширине русла в створах изгиба выравнивается;

в) из-за увеличения переливов жидкости из русла и поймы еще более повышается торможение руслового потока пойменным. Поэтому, несмотря на значительную разность глубин русла и поймы, скорости по ширине руслового и пойменного потоков выравниваются.

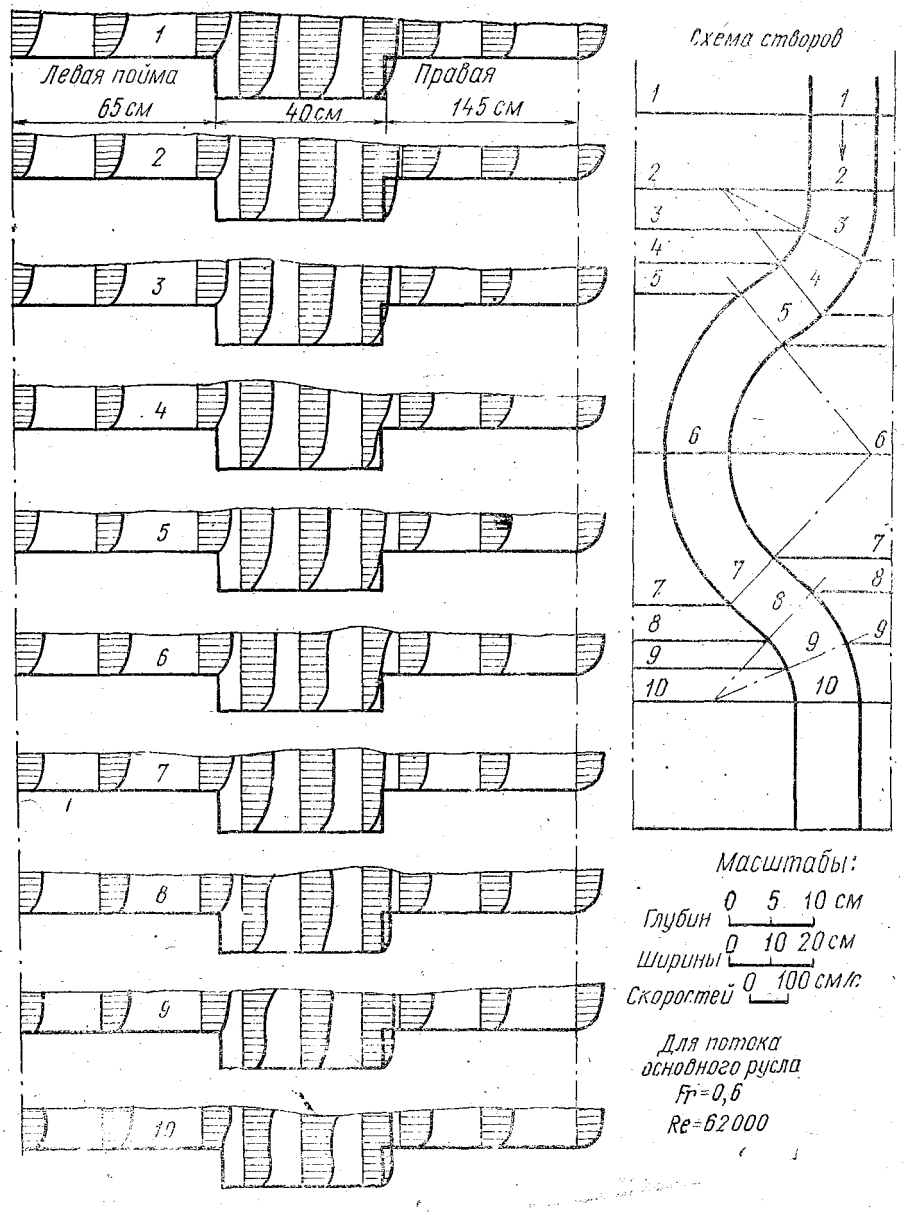

Рис. 1. Данные о модели В. Н. Гончарова и поле скоростей на ней: 1—10 — номера створов.

В дальнейшем резко увеличилось число экспериментальных исследований на схематизированных моделях изогнутого в плане русла и прямолинейной поймы. Все эти исследования можно разделить на три группы. Русло прямоугольной формы сечения имеет одну-две излучины и плоскую без поперечного уклона пойму; русло в плане представляет собой серию чередующихся излучин, как правило, с различными углами поворотов и плоскую без поперечного уклона пойму; русло — аналогичное предыдущему случаю, но на пойме имеются прирусловые валы и другие образования, присущие натурным объектам.

Большинство экспериментов было направлено на выявление основных закономерностей и физической картины процесса взаимодействия руслового и пойменного потоков. Поэтому экспериментаторы выбирали произвольные модели без какого-либо учета критериев моделирования и только в работах В. Г. Саликова, моделировавшего конкретные участки рек трассы БАМа, выполнен расчет модели на основе учета критериев подобия [11].

Представляется нецелесообразным выполнение анализа каждой экспериментальной работы из-за их большого количества и в ряде случаев повторения выводов. Поэтому ниже приведем лишь основные выводы, полученные из этих экспериментов.

1. Выявлены основные закономерности взаимодействия руслового и пойменного потоков и потоков с различной шероховатостью по ширине при непараллельности их осей.

2. Разработана классификация процессов взаимодействия, основанная на взаимном расположении динамических осей руслового и пойменного потоков. Выделено четыре типа взаимодействия руслового и пойменного потоков.

3. Изучена трансформация полей скоростей руслового потока под воздействием пойменного и пойменного — под воздействием руслового.

4. Разработаны различные частные рекомендации по учету взаимодействия руслового и пойменного потоков при расчете пропускной способности русел.

5. Намечены пути практического использования полученных результатов, о чем будет сказано в последующих разделах.

В то же время модельные испытания не лишены ряда недостатков, основными из которых являются следующие.

1. Недоучет влияния морфологии русла и поймы и изменения их морфометрических характеристик по длине водотока.

Действительно, все экспериментальные работы выполнены лишь на моделях, у которых берега поймы, имитирующие склоны долины, были строго параллельны друг другу, а суммарная ширина русла и поймы на моделях оставалась неизменной по длине потока.

2. Наличие прорв в прирусловых валах в совокупности с многочисленными гривами, старицами, пойменными озерами и другими морфологическими образованиями приводит к резкому отличию натурного процесса от модельного (особенно на поймах). Эти особенности рельефа пойм на моделях не воспроизводились.

3. На реках обычно наблюдается чередование разновысотных пойм, а в лабораторных условиях большинство авторов изучали поймы, имеющие одинаковые отметки. Исключение, пожалуй, составляют работы В. Г. Саликова и Н. Б. Барышникова.

4. Несоответствие уклонов свободной поверхности (продольных и поперечных) на моделях натурным данным о поймах.

Как вытекает из анализа ограниченных данных наблюдений за уклонами свободной поверхности пойм, процесс их формирования весьма сложный и в основном определяется морфологией пойм.

5. Зависимости, полученные на основе модельных испытаний, имеют локальное значение; они ограничены диапазоном изменения параметров модельных испытаний.

Все это приводит к необходимости изучения процесса взаимодействия руслового и пойменного потоков и потоков в руслах с неоднородной шероховатостью по ширине в натурных условиях.

1.2. Натурные исследования процесса взаимодействия руслового и пойменного потоков

В 1962—1963 и 1966 годах ГГИ были выполнены специальные паводочные исследования на семи реках ЕТС. Результаты этих работ обобщены Д. Е. Скородумовым [12]. В 1970 г. ГГИ совместно с Институтом водных проблем Белоруссии на излучине р. Сож проведены исследования процессов взаимодействия руслового и пойменного потоков при пересечении их осей под углом 135°. Результаты этих работ обобщены И. Ф. Карасевым [7]. Помимо указанных специальных исследований, известны работы Московского гидромелиоративного института по изучению течений на пойменном массиве р. Оки, работы Селлина на р. Бат и ряд исследований сотрудников ГГИ на реках Пологеть и Обь.

Второе направление в изучении процессов взаимодействия руслового и пойменного потоков по натурным данным основано на анализе обширных материалов паводочных измерений, проведенных на сети гидрометслужбы и в различных проектных организациях.

Такой анализ был выполнен Н. Б. Барышниковым по данным измерений более чем на 100 реках СССР и Г. В. Железняковым [6] по материалам р. Оки. В итоге были получены интересные результаты, в основном подтвердившие выводы лабораторных экспериментов.

В то же время натурные исследования позволили установить в качестве фактора, определяющего величину сопротивления и эффект взаимодействия руслового и пойменного потоков, морфологию русла и поймы на участке измерений и изменение морфометрических характеристик по длине реки и с ростом глубин в русле и на пойме. Действительно, именно характер изменения ширины долины, а следовательно, и ширины поймы, определяют положение динамической оси пойменного потока. Н. Б. Барышниковым [1] по данным рек Крыловка у с. Крыловка, Нестеровка у разъезда Таловый и Друть у с. Городище установлен факт изменения взаимного расположения динамических осей руслового и пойменного потоков при увеличении глубин в русле (рис. 2). Как видно на ри-

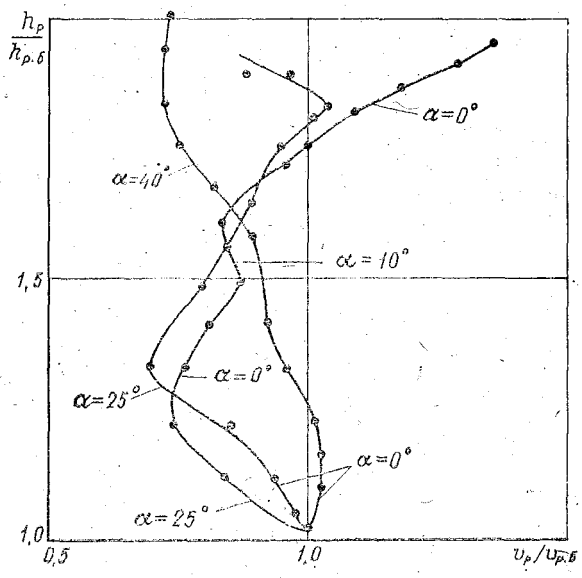

Рис. 2. Кривые

$$\frac{v_p}{v_{p.б}} = f\left(\frac{h_p}{h_{p.б}}, \alpha\right) \text{ при } \alpha = f\left(\frac{h_p}{h_{p.б}}\right).$$

Данные по рекам:

1 — Нестеровка — рзд. Таловый, *2* — Крыловка — с. Крыловка, *3* — Друть — с. Городище.

сунке, где приведена зависимость $\frac{v_p}{v_{p.б}} = f\left(\frac{h_p}{h_{p.б}}, \alpha\right)$ для указанных рек, при увеличении значений относительных глубин, за счет изменения угла α (угол пересечения динамических осей руслового

и пойменного потоков), кривая зависимости $\frac{v_р}{v_{р.б}} = f\left(\frac{h_р}{h_{р.б}}\right)$ резко изменяет свое направление, иногда даже на обратное.

Натурные данные позволяют также установить наиболее часто встречающиеся случаи взаимного расположения осей русла и поймы и другие особенности натурных водотоков и разработать рекомендации для их последующих лабораторных исследований.

Совместный анализ натурных и лабораторных данных позволил разработать предварительную классификацию процессов взаимодействия руслового и пойменного потоков, основанную на учете особенностей морфологии русла и поймы на расчетном участке.

2. ТИПИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ РУСЛОВОГО И ПОЙМЕННОГО ПОТОКОВ

Типизация процесса взаимодействия руслового и пойменного потоков, как и всякая типизация, является попыткой систематизации сложного и многообразного процесса, ряд особенностей которого недостаточно изучен.

В частности, в большинстве работ исследовался вопрос взаимодействия руслового и пойменного потоков на идеализированных моделях русла с односторонней поймой, а потоки в руслах с двусторонними, тем более разновысотными поймами, изучены недостаточно.

Слабо изучен вопрос влияния изменения морфометрических характеристик поймы и русла как по высоте, так и по длине участка на характер взаимодействия потоков в них.

Первые проработки по типизации, в основу которой положено взаимное расположение динамических осей руслового и пойменного потоков, были выполнены Н. Б. Барышниковым и В. Г. Саликовым.

По данным лабораторных исследований было выделено четыре типа взаимодействия руслового и пойменного потоков.

Первый тип характеризуется параллельностью динамических осей руслового и пойменного потоков, а следовательно, и параллельностью геометрических осей русла и поймы (рис. 3).

Дополнительные сопротивления при этом типе взаимодействия потоков создаются за счет возникновения вихрей с вертикальной осью вращения и их перемещения по закону Кутта-Жуковского в сторону потока, движущегося с большей скоростью, т. е. руслового потока. На образование таких вихрей, захватывающих массы пойменного потока, их перемещение, обтекание массами руслового и сообщение им добавочной энергии для увеличения продольных скоростей до значений соответствующих скоростей в русле, а также на компенсационные течения, затрачивается существенное количество энергии руслового потока. Это приводит к снижению его пропускной способности в пределе, достигающем 10%. В ряде работ появились указания о значительном (20% и более) уменьше-

нии пропускной способности руслового отсека потока под влиянием пойменного при параллельности их динамических осей. Эти дан-

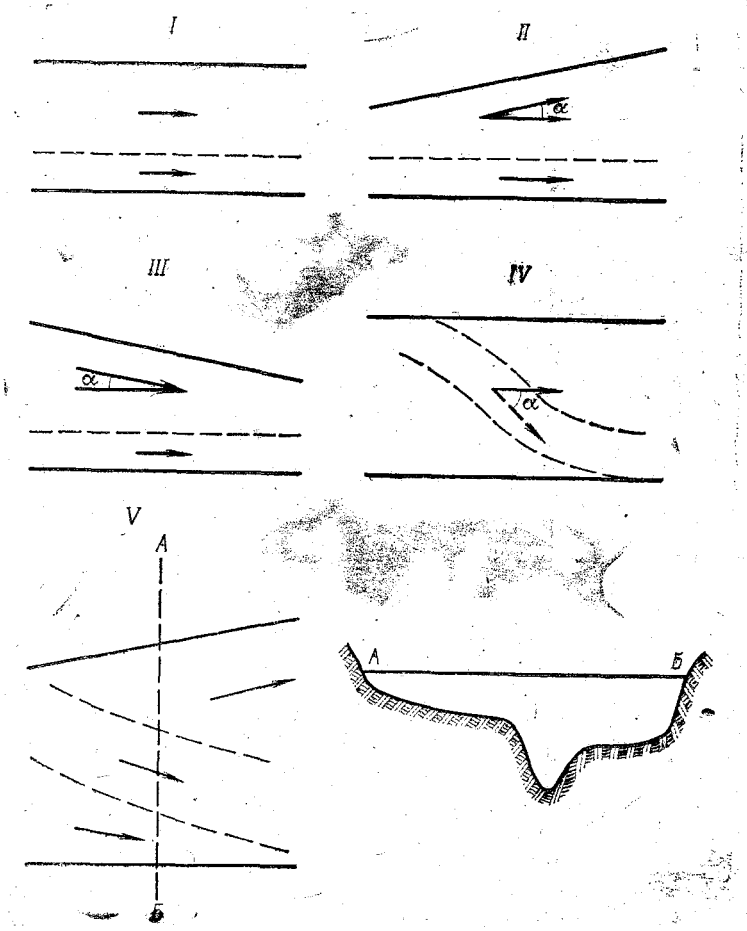

Рис. 3. Схема типизации процесса взаимодействия руслового и пойменного потоков.

I — V — типы взаимодействия потоков.

ные маловероятны и, по-видимому, получены на моделях, где не исключен процесс перетекания масс жидкости из поймы в русло.

Такой идеализированный тип взаимодействия потоков в природных условиях встречается исключительно редко, ибо в естественных водотоках всегда происходит изменение их морфометрических характеристик как по длине, так и с увеличением уровней. Однако, поскольку большинство гидростворов в системе Госкомгидромета расположено на относительно прямолинейных участках,

в натуре возможны, хотя и являются редкими, процессы взаимодействия руслового и пойменного потоков по описанной выше схеме.

Второй тип взаимодействия руслового и пойменного потоков характеризуется расхождением их динамических осей (рис. 3). Это может наблюдаться как при непараллельности геометрических осей русла и поймы, так и при их параллельности, когда подача воды на пойму меньше, а в русло больше их пропускной способности [1].

При этом типе взаимодействия может наблюдаться как увеличение, так и небольшое уменьшение пропускной способности русловой части потока и некоторое увеличение пойменной по сравнению с аналогичными отсеками потока, изолированными продольной стеклянной тонкостенной перегородкой. Это увеличение пропускной способности русла, по-видимому, обусловлено уменьшением потерь энергии на трение об указанную перегородку и некоторым увеличением площади сечения потока в целом за счет изъятия этой разделительной перегородки.

Данный тип взаимодействия потоков довольно часто встречается в натурных условиях. Однако основной причиной поступления масс руслового потока на пойму является расширение долины вниз по течению реки. Как видно из таблицы, из 100 исследованных рек 35 относятся к данному типу взаимодействия потоков.

Третий тип взаимодействия характеризуется схождением динамических осей руслового и пойменного потоков (рис. 3). Как и у второго типа, геометрические оси русла и поймы могут быть параллельными или непараллельными. При этом типе взаимодействия массы пойменного потока поступают в русловой под различными углами, вызывая торможение последнего и уменьшая тем самым его пропускную способность. Величина этого уменьшения находится в прямой зависимости от разности скоростей и угла схождения динамических осей взаимодействующих потоков. Затраты энергии руслового потока на процесс массообмена, перемешивание его масс с поступившими массами пойменного потока и на повышение их скоростей весьма значительны и могут приводить (по данным экспериментов) к уменьшению пропускной способности руслового отсека потока на 50% и более. При этом скорости пойменного потока возрастают незначительно, что приводит к существенному уменьшению пропускной способности русла в целом.

Анализ обширных натурных материалов, подтвердив полученные выше выводы, показал, что основной причиной данного типа взаимодействия является сужение долины, а следовательно, и поймы вниз по течению реки. Данный тип взаимодействия потоков также широко распространен в натурных условиях (см. таблицу).

Частота различных типов взаимодействия руслового и пойменного потоков на исследованных реках СССР

II		III		IV		V		Всего	
Случай	%	Случай	%	Случай	%	Случай	%	Случай	%
35	35	24	24	18	18	23	23	100	100

Четвертый тип взаимодействия, характеризующийся пересечением динамических осей руслового и пойменного потоков, является одним из наиболее распространенных (рис. 3). В натурных условиях он наблюдается при меандрирующих типах руслового процесса, на долю которых, по данным И. В. Попова [9], приходится преобладающее количество участков, обследованных им равнинных рек.

Этот тип взаимодействия потоков как бы обобщает три предшествующих. Действительно, при углах пересечения динамических осей потоков (α), близких к нулю, переходим к первому типу. При углах $0° \leqslant \alpha < 50°$, в зависимости от характера изменения ширины долины и поймы, отмечается аналогичный второму (расширение поймы) или третьему (сужение поймы) тип взаимодействия руслового и пойменного потоков.

В то же время при больших углах пересечения динамических осей потоков ($\alpha \geqslant 90°$), а в природных условиях даже при углах меньших 90°, отмечается принципиально новый характер взаимодействия руслового и пойменного потоков, когда затраты энергии русловым потоком настолько велики, что течение в нем прекращается, либо даже наблюдается обратное [1, 7].

При этом при углах α, равных и больших 90°, верхняя (по отношению к пойменному потоку) бровка коренного русла выполняет роль гребня водослива, а в русле образуется безрасходная водоворотная зона, размеры которой определяются соотношением величин скоростей и глубин пойменного и руслового потоков.

Таким образом, выделенные по данным экспериментальных работ на схематизированных моделях четыре типа взаимодействия руслового и пойменного потоков в основном подтверждаются натурными данными. При этом первые три типа, как правило, соответствуют потокам в руслах с односторонними поймами, а четвертый — в руслах с двусторонними поймами.

Однако данная типизация недоучитывает особенностей морфологии, в частности, изменения ширины русла и поймы по длине реки и при увеличении уровня воды. А именно изменение морфометрических характеристик русла и поймы по длине реки и с уровнем воды определяет гидравлику потоков в русле и на пойме, а следовательно, и тип их взаимодействия.

Исходя из этого, можно использовать данную типизацию и для естественных условий, увязав ее с морфологией русла и поймы и изменением их морфометрических характеристик по длине реки.

В то же время она не охватывает всего многообразия природных условий и требует соответствующей доработки. Поэтому представляется целесообразным дополнить ее пятым типом взаимодействия руслового и пойменного потоков, отнеся к нему наиболее сложные случаи взаимодействия потоков в руслах с двусторонними, разновысотными поймами и поймами, характер изменения ширины которых по длине реки различен при различных уровнях воды (рис. 3).

Основным признаком этого типа взаимодействия является изменение направления динамической оси пойменного потока относительно оси руслового при изменении уровня воды.

Этот сложный тип взаимодействия потоков довольно часто наблюдается в природных условиях (см. таблицу), в частности, на реках с двумя разновысотными поймами, когда при подключении первой, относительно узкой поймы, ее воды поступают в русло (или, наоборот, из русла в пойму), а при подключении второй, более широкой поймы, воды из русла поступают на пойму (или, наоборот, из поймы в русло). Это обычно приводит к изменению характера взаимодействия потоков, т. е. в приведенном случае, при подключении первой поймы будет третий (второй) тип взаимодействия руслового и пойменного потока, а при подключении второй поймы, характер взаимодействия потоков изменится соответственно на второй (третий). Аналогичная картина может наблюдаться и при увеличении уровня воды, когда за счет рельефа, сужение (расширение) может смениться расширением (сужением) поймы по длине реки.

При анализе натурных материалов установлено [1], что пятый тип взаимодействия потоков наиболее часто встречается на реках Приморского края (Крыловка у с. Крыловка, Нестеровка у разъезда Таловый и др.) и в Белоруссии (Друть у с. Городище и Птичь у с. Лучицы).

Данная типизация, основанная на учете особенностей морфологии участка, расположенного ниже расчетного створа, является первой типизацией, учитывающей определяющее влияние морфометрических характеристик и их изменения по длине участка и при увеличении уровней на гидравлику потоков в руслах с поймами. Как и любая типизация, она схематична и требует дальнейшей доработки. В частности, перспективным является учет влияния особенностей морфологии участка расположенного выше расчетного створа на гидравлику потока. Такого рода попытки типизации выполнялись на кафедре гидрометрии. Однако в этом случае значительно возрастает количество типов взаимодействия потоков (до 25—30), что при недостаточном объеме исходной информации затрудняет выявление закономерностей природных процессов и не

позволяет установить расчетные зависимости между гидравлическими характеристиками потоков в руслах с поймами и морфометрическими характеристиками последних.

Поэтому, несмотря на ряд недостатков, типизация была принята в качестве основы и оказала значительную помощь при разработке методики расчета пропускной способности русел с поймами.

3. ВЛИЯНИЕ ПОЙМЕННОГО ПОТОКА НА РАСХОДЫ ВОДЫ И СРЕДНИЕ СКОРОСТИ РУСЛОВОГО

Для выявления закономерностей воздействия пойменного потока на русловой использованы обширные данные лабораторных и натурных наблюдений как на сети Госкомгидромета [1], так и специальных исследований ГГИ [12 и др.]. С целью обобщения они были представлены в безразмерных величинах. В качестве реперных приняты параметры потока и русла при уровнях затопления бровок прирусловых валов ($v_{р.б}$, $h_{р.б}$). Этот прием позволил сопоставить данные наблюдений на различных реках и выявить влияние основных морфометрических характеристик пойм и русел на гидравлику потоков в них. В качестве таковых были приняты угол α — пересечения (схождения или расхождения) динамических осей потоков и относительная ширина поймы $\frac{B_п}{B_р}$.

Для определения угла α необходимы данные детальных измерений скоростей руслового и пойменного потоков при уровнях, превышающих уровни затопления поймы. Получение такой информации, крайне дорогостоящей, не всегда возможно, поэтому в дальнейших расчетах угол α определялся как угол между геометрическими осями русла и поймы. На рис. 4 показана методика его определения по Г. В. Железнякову. Для этой цели необходимы крупномасштабные карты или планы участков расположения постов, длиною не менее шести-семи ширин русла (ниже расчетного створа). В соответствии с расположением горизонталей определяется положение геометрических осей пойм и русла и угла между ними. Положение оси русла практически не меняется при изменении уровней воды, а геометрической оси поймы или динамической оси пойменного потока может значительно изменяться при увеличении уровней воды (пятый тип взаимодействия потоков).

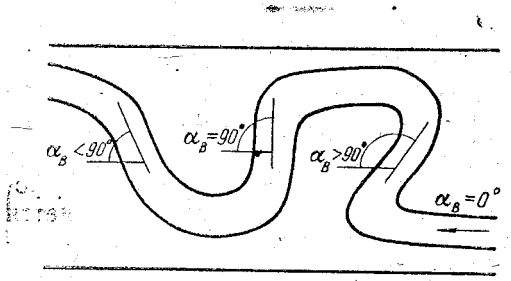

Рис. 4. Схема определения углов α по Г. В. Железнякову.

На рис. 5 и 6 приведены кривые $\frac{v_р}{v_{р.б}} = f\left(\frac{h_р}{h_{р.б}}\right)$ для различных типов взаимодействия потоков. Как видно на рис. 5, ука-

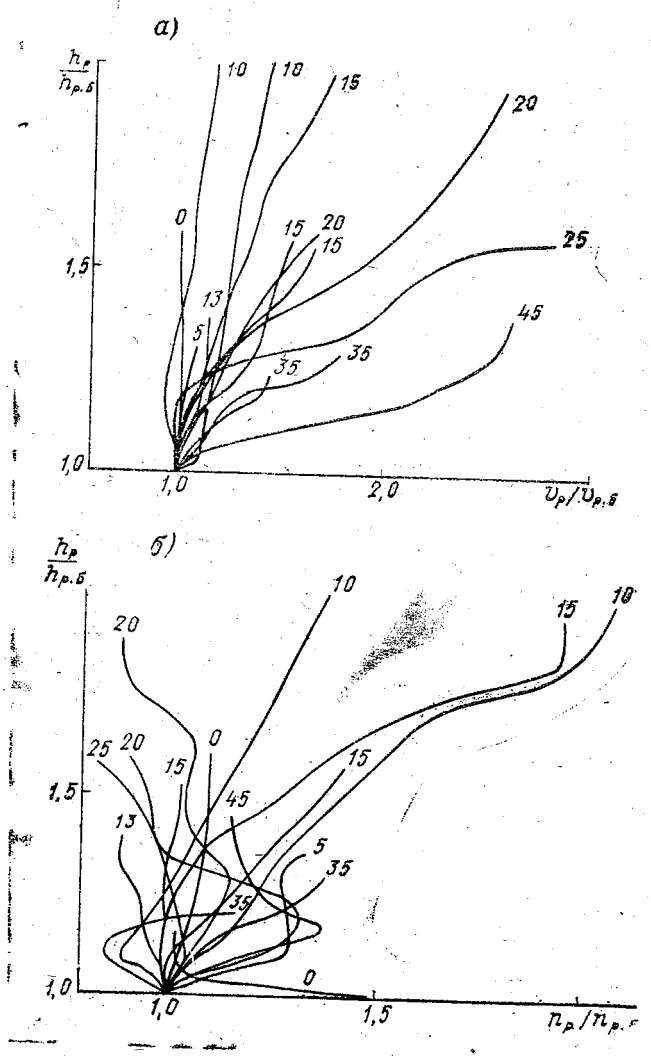

Рис. 5. Кривые

$$\frac{v_р}{v_{р.б}} = f\left(\frac{h_р}{h_{р.б}}, \alpha\right) \ (а); \qquad \frac{n_р}{n_{р.б}} = f\left(\frac{h_р}{h_{р.б}}, \alpha\right) \ (б)$$

при втором типе взаимодействия руслового и пойменного потоков. Около кривых значения углов α.

Ленинградский
гидрометеорологический институт
БИБЛИОТЕКА
Ленинград 193196, Малоохтенский пр., 98

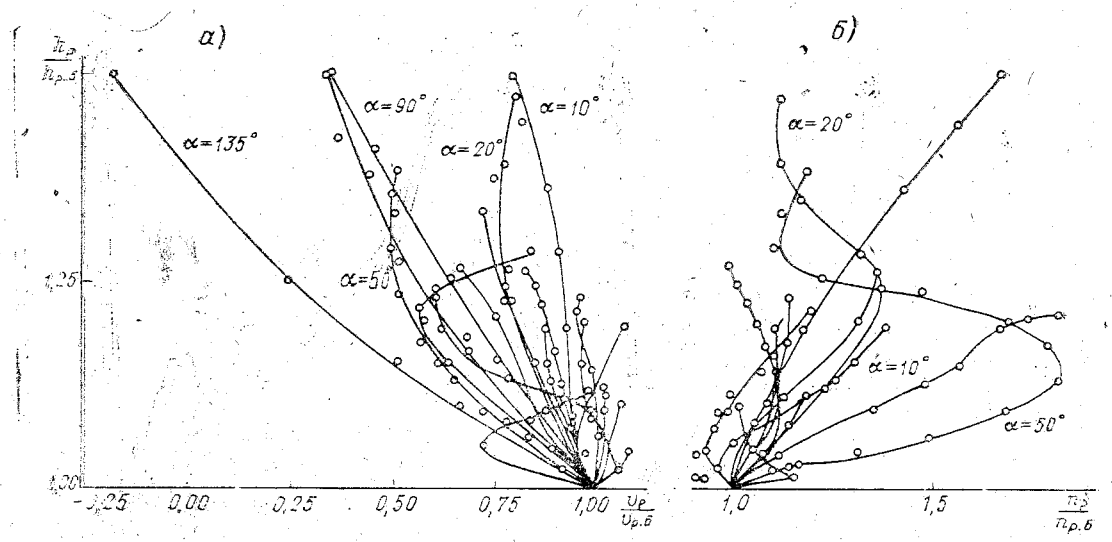

Рис. 6. Кривые

$$\frac{v_р}{v_{р.б}} = f\left(\frac{h_р}{h_{р.б}}, \alpha\right) \ (а); \qquad \frac{n_р}{n_{р.б}} = f\left(\frac{h_р}{h_{р.б}}, \alpha\right) \ (б)$$

при третьем типе взаимодействия потоков.

занные кривые отклоняются вправо, т. е. отмечается увеличение относительных скоростей руслового потока. Причем интенсивность этого увеличения находится в прямой зависимости от величины угла α. Обратная картина наблюдается при третьем типе взаимодействия потоков. Практически все кривые $\frac{v_р}{v_{р.б}}=f\left(\frac{h_р}{h_{р.б}}\right)$ отклоняются влево от значения $\frac{v_р}{v_{р.б}}=1{,}0$, т. е. наблюдается уменьшение средних скоростей русловых потоков при увеличении уровней воды (рис. 6). Величина этого уменьшения пропорциональна величине угла α. Данные измерений при четвертом типе взаимодействия потоков были отнесены ко второму типу — при условии, что ниже расчетного створа пойма расширялась и угол $\alpha \leqslant 50°$, или к третьему — при сужении поймы. При углах $\alpha \geqslant 50°$ все данные наблюдений при четвертом типе взаимодействия потоков были отнесены к третьему. Это обусловлено тем, что при больших углах α в основном русле обычно возникает водоворотная область, величина которой пропорциональна величине угла α и мощности пойменного потока. Причем при углах $\alpha \approx 90°$ она может занять все русло и течение в нем прекратится ($v_р=0$). При углах $\alpha > 90°$ и больших скоростях пойменного потока в русле возникают течения обратного направления (рис. 6).

Дополнительный анализ исходной информации показал, что значения относительных скоростей русловых потоков в общем виде зависят от ряда факторов, а именно:

$$\frac{v_р}{v_{р.б}}=f\left(\frac{h_р}{h_{р.б}},\ \alpha,\ \frac{I}{I_{р.б}},\ \frac{n_п}{n_р}\right) \quad \text{(II тип);} \qquad (3.1)$$

$$\frac{v_р}{v_{р.б}}=f\left(\frac{h_р}{h_{р.б}},\ \alpha,\ \frac{B_п}{B_р},\ \frac{I}{I_{р.б}},\ \frac{n_п}{n_р}\right) \quad \text{(III тип).} \qquad (3.2)$$

Значительно сложнее выявить закономерности изменения скоростей в русловой части потока при пятом типе его взаимодействия с пойменными. Как видно на рис. 2, наблюдаются неоднократные изменения направления кривых $\frac{v_р}{v_{р.б}}=f\left(\frac{h_р}{h_{р.б}}\right)$, обусловленные изменением характера взаимодействия потоков и угла α.

Анализ зависимостей (3.1 и 3.2) показал, что определяющими при втором типе взаимодействия потоков являются: относительные глубины и уклоны свободной поверхности, а также углы α, а при третьем — вместо уклонов целесообразно использовать относительные ширины поймы. Последние в значительной степени определяют величину торможения руслового потока пойменными при

поступлении их масс в русло. В то же время при растекании руслового потока по пойме (второй тип) задача близка к аналогичной при впадении струи в широкий водоем.

Исходя из этого, по данным наблюдений были построены расчетные зависимости вида

$$\frac{v_р}{v_{р.б}} = f(\alpha)$$ — для второго типа (рис. 7),

$$\frac{v_р}{v_{р.б}} = f\left(\alpha, \frac{B_н}{B_р}\right)$$ — для третьего типа (рис. 8) при постоянных значениях глубин $\left(\frac{h_р}{h_{р.б}}\right.$ — соответственно равно 1,10; 1,25; 1,50$\left.\right)$.

Как видно на рис. 7 и 8, приведенных в качестве примера, наблюдается увеличение скоростей при увеличении углов α при втором и уменьшение при третьем типах взаимодействия потоков. На рис. 9 показана графическая зависимость $\Delta\left(\frac{v_р}{v_{р.б}}\right) = f\left(\frac{B_н}{B_р}\right)$ при $\frac{h_р}{h_{р.б}} = 1{,}25$. Для ее построения кривая $\frac{v_р}{v_{р.б}} = f(\alpha)$ $\left(\text{при } \frac{h_р}{h_{р.б}} = 1{,}25 \text{ и } \frac{B_н}{B_р} = 5{,}0\right)$ была принята за расчетную и определены значения отклонений $\Delta\left(\frac{v_р}{v_{р.б}}\right)$ исходных данных от этой кривой. Корреляционные отношения для этих зависимостей $\eta = 0{,}72 \div 0{,}92$, а среднеквадратические $\sigma = 0{,}14 \div 0{,}35$.

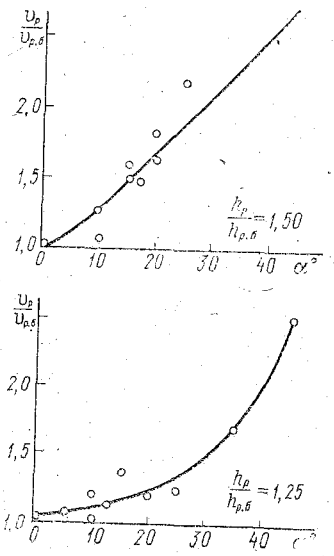

Рис. 7. Кривые $\frac{v_р}{v_{р.б}} = f(\alpha)$ при втором типе взаимодействия потоков и постоянном значении глубин $\left(\frac{h_р}{h_{р.б}}\right.$ соответственно равно 1,25 и 1,50$\left.\right)$.

Анализ этих зависимостей показывает на противоположный характер изменения относительных скоростей руслового потока при увеличении угла α. Именно это позволило объединить эти зависимости (3.1 и 3.2) в одну, условно принимая значения угла α при втором типе взаимодействия потоков отрицательными, а при третьем — положительными. Дей-

ствительно, все кривые $\frac{v_р}{v_{р.б}} = f(\alpha)$ при разных типах взаимодействия потоков и относительных глубинах проходят через точку с координатами (1; 0), т. е. пересекаются в этой точке, закономерно изменяясь при изменении угла α.

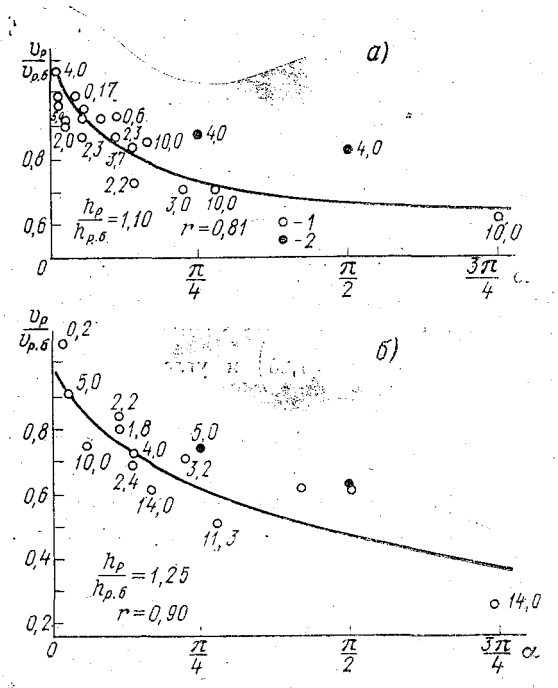

Рис. 8. Кривые $\frac{v_р}{v_{р.б}} = f\left(\alpha, \frac{B_п}{B_р}\right)$ при третьем типе взаимодействия потоков и постоянном значении глубин:

а — $\frac{h_р}{h_{р.б}} = 1,10$; *б* — $\frac{h_р}{h_{р.б}} = 1,2$; *1* — натурные данные; *2* — лабораторные данные.

Как видно на рис. 10, все три кривые $\frac{v_р}{v_{р.б}} = f(\alpha)$, построенные для различных относительных глубин, пересекаясь в точке с координатами (1; 0), располагаются вполне закономерно, т. е. при увеличении угла α скорости уменьшаются.

Значительно сложнее выявление закономерностей для условий пятого типа взаимодействия потоков, что обусловлено невысокой

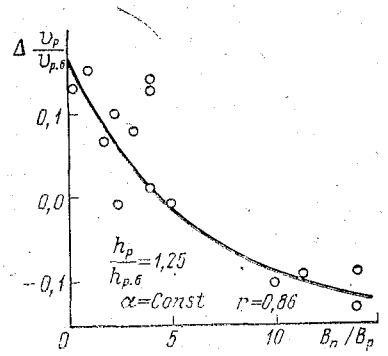

Рис. 9. Кривые $\Delta\left(\frac{v_р}{v_{р.б}}\right)=f\left(\frac{B_п}{B_р}\right)$ при третьем типе взаимодействия потоков и постоянных значениях глубин $\left(\frac{h_р}{h_{р.б}}=1{,}25\right)$ и угла α.

точностью и малым объемом исходной информации, а также сложностью самого процесса. Поэтому для ориентировочных расчетов предложено определять осредненное значение угла $\bar{\alpha}$

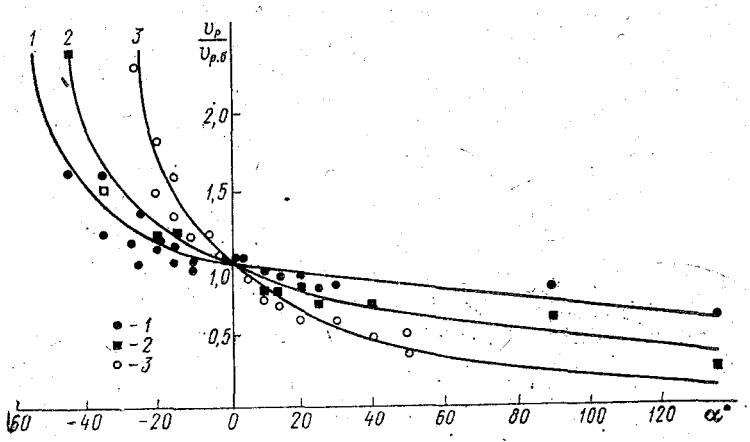

Рис. 10. Кривые $\frac{v_р}{v_{р.б}}=f\left(\frac{h_р}{h_{р.б}},\ \alpha\right)$:

$1-\frac{h_р}{h_{р.б}}=1{,}10$; $2-\frac{h_р}{h_{р.б}}=1{,}25$; $3-\frac{h_р}{h_{р.б}}=1{,}50$.

$$\bar{\alpha} = \frac{\Sigma \Delta \left(\frac{h_р}{h_{р.б}} \right)_i \alpha_i}{\frac{h_р}{h_{р.б}} - 1}, \qquad (3.3)$$

где $\Delta \left(\frac{h_р}{h_{р.б}} \right)_i$ — приращение глубин при постоянном значении угла α_i, принимаемом с отрицательным знаком при расширении поймы и положительным—при ее сужении ниже расчетного створа.

4. СОПРОТИВЛЕНИЕ ДВИЖЕНИЮ ПОТОКОВ В РУСЛАХ С ПОЙМАМИ

4.1. Сопротивление движению потоков в руслах простых форм сечения

Движение воды в реках и каналах, как правило, происходит при квадратичном законе сопротивления. Полное сопротивление, оказываемое движению воды естественным руслом, состоит из четырех частей: сопротивления зернистой шероховатости и макрошероховатости дна (т. е. донных гряд и рифелей), сопротивления формы русла и сопротивления за счет нестационарности процесса. Последнее, как показали исследования Д. Е. Скородумова [12] и Н. Б. Барышникова [1, 2], на равнинных реках даже в период пропуска паводков и половодий невелико и в расчетах его величиной обычно пренебрегают. Под сопротивлением за счет формы русла понимают сопротивление, вызванное изменением площадей живых сечений вдоль потока, т. е. в конечном счете затратами энергии, сопровождающими ее переходы из кинетической в потенциальную. Практическое значение эти затраты приобретают в местах резкого сужения или расширения русла.

Таким образом, полный гидравлический уклон (I) можно представить в виде суммы четырех частных уклонов: уклона $I_к$, выражающего затраты энергии на обтекание выступов зернистой шероховатости, уклона $I_г$, отражающего затраты энергии на обтекание гряд, уклона $I_ф$, выражающего затраты энергии при изменении формы поперечного сечения русла, и уклона $I_н$, характеризующего затраты энергии за счет нестационарности процесса

$$I = I_к + I_г + I_ф + I_н. \qquad (4.1)$$

Соотношению между гидравлическими уклонами отвечают соотношения между коэффициентами гидравлического трения $\lambda = \lambda_к + \lambda_г + \lambda_ф + \lambda_н$, коэффициентами Шези $\frac{1}{C^2} = \frac{1}{C_к^2} + \frac{1}{C_г^2} + \frac{1}{C_ф^2} + \frac{1}{C_н^2}$ и шероховатости

$$n = n_к + n_г + n_ф + n_н. \qquad (4.2)$$

Как уже указывалось, величина члена этих уравнений ($I_н$, $\lambda_н$, $C_н$, $n_н$), учитывающего нестационарность процесса, мала. Однако при резко выраженном попусковом режиме движения пренебрегать им нельзя, ибо он может достигать больших значений, свидетельством чему являются петли на кривых зависимостей $Q=f(H)$, $v=f(H)$, $I=f(H)$.

Для простых форм сечения русел значениями $I_ф$, $\lambda_ф$, $C_ф$, $n_ф$ обычно также пренебрегают, ибо участки русел с резким изменением площадей живых сечений неизбежно деформируются. Значения $I_г$, $\lambda_г$, $C_г$, $n_г$ на реках с донногрядовым режимом перемещения наносов в несколько раз превышают значения $I_к$, $\lambda_к$, $C_к$, $n_к$. Поэтому последние учитывают только при расчетах сопротивлений на реках с безгрядной формой перемещения наносов. Действительно, по данным В. А. Ванони, Б. Ф. Снищенко и других сопротивление движению потоков при возникновении в руслах донных гряд может увеличиться в два-семь раз.

Рядом исследователей рекомендуется несколько иная зависимость для расчета коэффициентов шероховатости вида [1, 15 и др]:

$$n=n_0+\Sigma n_i. \tag{4.3}$$

Так, Кован предложил определять расчетное значение коэффициента шероховатости по выражению

$$n=(n_0+n_1+n_2+n_3+n_4)m, \tag{4.4}$$

где $n_0 \approx 0{,}020—0{,}025$—основное значение n для прямолинейного однородного канала с гладкими стенками; n_1, n_2, n_3, n_4 — параметры, учитывающие дополнительные факторы: неоднородность поверхности, влияние неравномерности движения, местные сопротивления, растительность и характер движения, а также извилистость русла (m). Ориентировочные значения этих параметров приведены В. Т. Чоу [15]. Эта методика также недоучитывает ряда факторов, осложняющих расчет сопротивлений. Например, за счет перемещения взвешенных и донных наносов и другие. К тому же введение параметра m в качестве сомножителя не является оправданным.

Более перспективно, по нашему мнению, осуществлять расчет коэффициента шероховатости по выражению

$$n=n_0+\sum_{i=1}^{i=m}\Delta n_i, \tag{4.5}$$

где Δn_i — добавочные значения коэффициентов шероховатости. Например, Δn_1 — учитывает увеличение сопротивлений естественных русел с хорошими условиями по сравнению с аналогичными каналами; Δn_2, Δn_3, $\Delta n_4 \ldots \Delta n_m$ — учитывают увеличение сопротивлений за счет растительности, неравномерности и нестационарности процесса, грядового режима перемещения наносов и другие. Подсчет значений Δn_i выполнен [1] по данным таблиц М. Ф. Срибного, В. Т. Чоу и Дж. Бредли.

Таким образом, коэффициенты шероховатости являются интегральной характеристикой, обобщающей различные виды сопротивлений движению потоков в естественных руслах. Они определяются либо по натурным данным и одной из многочисленных эмпирических формул, либо по описательной характеристике и одной из таблиц (М. Ф. Срибного и др.). В последних значениях коэффициентов шероховатости для одинаковых условий протекания потоков приведены в довольно широком диапазоне. Например $n=0{,}04—0{,}07$.

Следовательно, объективный метод расчета коэффициентов шероховатости даже для русел простых форм сечений отсутствует.

В настоящее время разработаны рекомендации по определению значений коэффициентов шероховатости на основе формулы неравномерного режима. Однако их применение затруднено, ибо для расчетов коэффициентов шероховатости необходимы данные измерений по двум близлежащим створам. В то же время остается неясным вопрос о расчетной величине расстояния между этими створами.

4.2. Коэффициенты шероховатости русел сложной формы

Русла сложной формы отличаются от русел простой формы сечения наличием в них эффекта взаимодействия руслового и пойменного потоков, который оказывает существенное влияние на сопротивление их движению. Рассмотрим влияние пойменного потока на сопротивление движению руслового. При первом и особенно третьем и четвертом типах взаимодействия сопротивления движению руслового потока возрастают, а при втором типе, наоборот, уменьшаются.

Таким образом, в расчетных уравнениях (4.3 и 4.5) должны появиться дополнительные члены, учитывающие влияние этого эффекта.

Представим уравнение (4.5) для уровней затопления бровок прирусловых валов в виде

$$n_{р.б} = n_0 + \Sigma \Delta n_{р.б}, \tag{4.6}$$

допуская, что при увеличении уровней

$$\Sigma \Delta n_i = \Sigma \Delta n_{р.б} + \Delta n_{р.п}, \tag{4.7}$$

где $\Delta n_{р.п}$ — параметр, учитывающий влияние пойменного потока на сопротивление движению руслового.

Тогда с учетом (4.5, 4.6 и 4.7) получим $n_р = n_{р.б} + \Delta n_{р.п}$ или

$$\frac{n_р}{n_{р.б}} = 1 + \frac{\Delta n_{р.п}}{n_{р.б}}. \tag{4.8}$$

Данное выражение в дальнейшем и было использовано для получения расчетных графических зависимостей коэффициента шероховатости от определяющих факторов.

Анализ исходной информации позволил установить для второго типа взаимодействия потоков графические зависимости вида:

$$\frac{n_р}{n_{р.б}} = f\left(\frac{h_р}{h_{р.б}},\ \alpha,\ \frac{I}{I_{р.б}}\right) \tag{4.9}$$

и для третьего типа

$$\frac{n_р}{n_{р.б}} = f\left(\frac{h_р}{h_{р.б}},\ \alpha,\ \frac{B_п}{B_р}\right). \tag{4.10}$$

Для второго типа взаимодействия потоков зависимости нелинейные (рис. 11), а для третьего типа — линейные (рис. 12) вида

$$\left(\frac{n_р}{n_{р.б}} - 1\right) = 0{,}01\,\alpha^\circ + 0{,}02\,\frac{B_п}{B_р} \quad \left(\text{при } \frac{h_р}{h_{р.б}} = 1{,}10\right).$$

Однако теснота этих связей значительно меньше, чем аналогичных, но для средних скоростей потоков. В то же время характер изменения относительных величин коэффициентов шероховато-

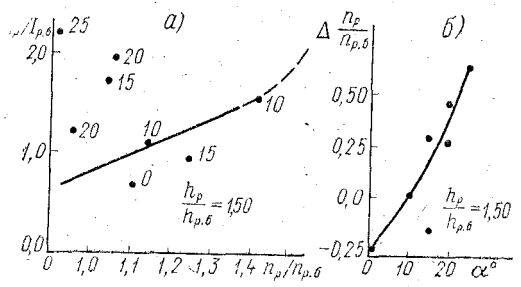

Рис. 11. Кривые

$$\frac{n_р}{n_{р.б}} = f\left(\frac{I}{I_{р.б}},\ \alpha\right)\ (а); \qquad \Delta\left(\frac{n_р}{n_{р.б}}\right) = f(\alpha)\ (б)$$

при втором типе взаимодействия потоков.

Около точек значения угла α.

сти при увеличении углов α более сложный, чем относительных скоростей потоков. К тому же объем исходной информации существенно меньше, чем при расчетах скоростей, из-за отсутствия измерений уклонов водной поверхности на ряде постов.

Разброс точек, соответствующих данным натурных наблюдений, в поле координат $\left(\frac{n_р}{n_{р.б}}, \alpha\right)$ при условий, что для второго типа взаимодействия углы α приняты с отрицательным знаком, а для третьего — с положительным, весьма значителен, что препятствует проведению кривых $\frac{n_р}{n_{р.б}} = f\left(\frac{h_р}{h_{р.б}}, \alpha\right)$. Поэтому для определения координат этих кривых были использованы графические зависимости

$$\frac{v_р}{v_{р.б}} = f\left(\frac{h_р}{h_{р.б}}, \alpha\right) \quad \text{и} \quad \frac{I}{I_{р.б}} = f\left(\frac{h_р}{h_{р.б}}, \alpha\right)$$

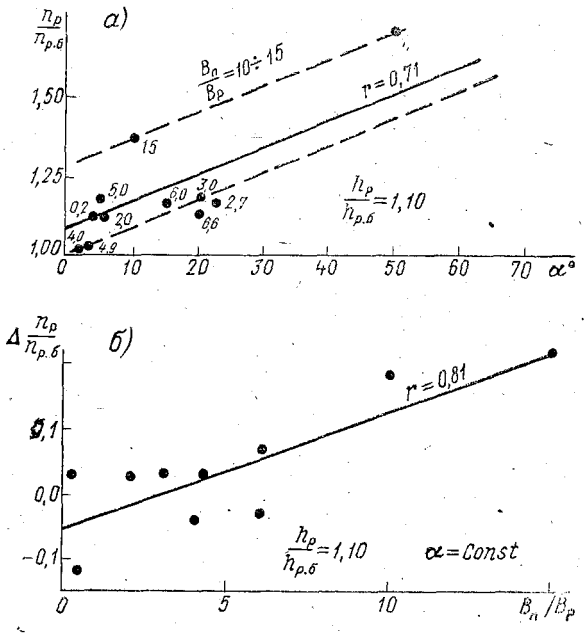

Рис. 12. Кривые

$$\frac{n_р}{n_{р.б}} = f\left(\frac{B_п}{B_р}, \alpha\right) (а); \ \Delta\left(\frac{n_р}{n_{р.б}}\right) = f\left(\frac{B_п}{B_р}\right) (б)$$

при третьем типе взаимодействия потоков и постоянных значениях глубин $\left(\frac{h_р}{h_{р.б}} = 1,10\right)$.

Около точек значения $\frac{B_п}{B_р}$..

(рис. 13). Последние близки к аналогичным для средних скоростей руслового потока.

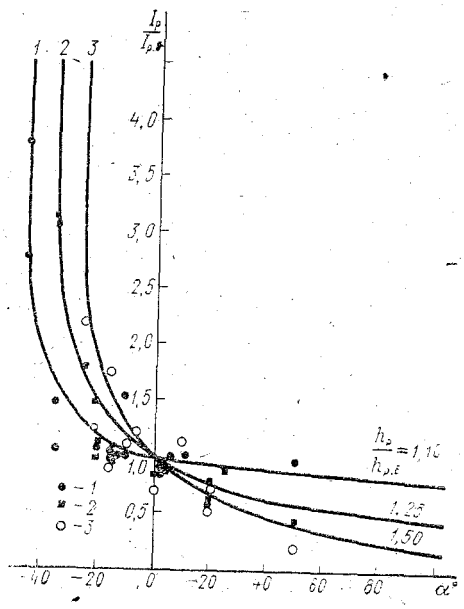

Рис. 13. Кривые $\frac{I}{I_{р.б}} = f\left(\frac{h_р}{h_{р.б}}, \alpha\right)$:

$1 - \frac{h_р}{h_{р.б}} = 1{,}10$; $2 - \frac{h_р}{h_{р.б}} = 1{,}25$; $3 - \frac{h_р}{h_{р.б}} = 1{,}50$.

Координаты кривых $\frac{n_р}{n_{р.б}} = f\left(\frac{h_р}{h_{р.б}}, \alpha\right)$ определялись расчетом по выражению

$$\frac{n_р}{n_{р.б}} = \frac{\left(\frac{h_р}{h_{р.б}}\right)^{2/3}\left(\frac{I}{I_{р.б}}\right)^{0,5}}{\frac{v_р}{v_{р.б}}}, \qquad (4.11)$$

полученному на основе формулы Шези-Маннинга. При постоянных значениях относительных глубин $\left(\frac{h_р}{h_{р.б}}\right.$ соответственно равно 1,10; 1,25; 1,50$\left.\right)$ для значений углов α кратных 5° по графическим зависимостям $\frac{v_р}{v_{р.б}} = f(\alpha)$ и $\frac{I}{I_{р.б}} = f(\alpha)$ (рис. 10 и 13) были определены

значения относительных скоростей и уклонов водной поверхности. Подставляя их в выражение (4.11) получим координаты кривых

$$\frac{n_р}{n_{р.б}} = f\left(\frac{h_р}{h_{р\ б}},\ \alpha\right).$$

Как видно на рис. 14, относительные значения коэффициентов шероховатости при увеличении углов α от $-50°$ до $-18°$ уменьшаются и достигают минимального значения $\left(\text{при } \frac{h_р}{h_{р\ б}}\right.$ соответственно равном 1,10 и $\left.1{,}25\right)$, затем постепенно возрастают вплоть до значений $\alpha = 50°$. По-видимому, следует ожидать дальнейшего увеличения относительных величин коэффициентов шероховатости при увеличении углов α, так как это соответствует образованию в русле водоворотных зон. Однако отсутствие данных натурных измерений не позволяет подтвердить этот вывод.

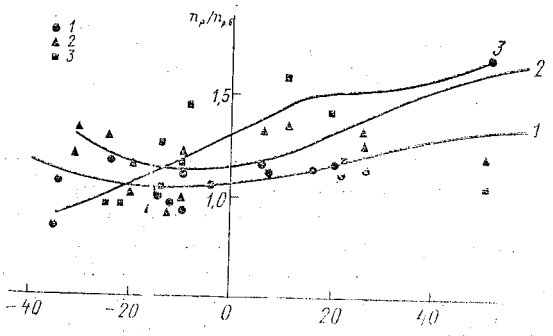

Рис. 14. Кривые $\frac{n_р}{n_{р\ б}} = f\left(\frac{h_р}{h_{р.б}},\ \alpha\right)$:

$1 - \frac{h_р}{h_{р.б}} = 1{,}10$; $2 - \frac{h_р}{h_{р.б}} = 1{,}2$; $3 - \frac{h_р}{h_{р.б}} = 1{,}0$.

Резко отличен характер изменения относительных коэффициентов шероховатости при $\frac{h_р}{h_{р.б}} = 1{,}50$. Как видно на рис. 14. (кривая 3), отмечается интенсивное увеличение коэффициентов шероховатости при увеличении углов α. По-видимому, необходимы дальнейшие проработки, обоснованные большим натурным материалом, которые позволят уточнить положение расчетных кривых $\frac{n_р}{n_{р.б}} = f(\alpha)$ особенно при больших значениях относительных глубин и углов α (последние по абсолютной величине).

4.3. Влияние руслового потока на пропускную способность, сопротивление и скоростное поле пойменного

Процесс затопления пойм зависит от их типа и, как правило, начинается с низовых прорв, что вызывает обратные течения на них. При повышении уровней вода начинает поступать через верховые прорвы и на пойме образуются транзитные течения. При за-

топлении бровок прирусловых валов потоки русла и поймы, сливаясь, образуют единый руслопойменный поток. Однако бровки прирусловых валов, как правило, зарастают кустарником или деревьями, поэтому эффективное взаимодействие потоков обычно начинается при уровнях, превышающих их отметки, которые к тому же могут существенно изменяться по длине реки.

Сама пойма, особенно на свободно меандрирующих реках, сложное структурное образование. Поэтому на ранних стадиях ее затопления направление течений на ней определяется направлением пойменных грив.

Существенное влияние на расходы и скорости потока поймы оказывают старицы, пойменные озера и другие образования. Все эти особенности строения реальных пойм приводят к существенным отличиям натурных данных от модельных. Поэтому обратимся к натурным данным, которые, хотя и имеют невысокую точность из-за сокращения числа скоростных вертикалей и количества точек измерений на них, но отражают влияние всего многообразия факторов на расходы и скорости течения на поймах в натурных условиях.

В то же время на большинстве пойм, имеющих сложное ступенчатое строение, при повышении уровней происходит затопление разновысотных грив и присоединение различных по ширине и мощности отсеков пойм, в ряде случаев включающих в себя протоки с хорошо развитым течением. Характер изменения средних для пойм скоростей с уровнем воды довольно сложный. При присоединении значительных отсеков пойм средние скорости пойменного потока могут резко уменьшаться или, наоборот, увеличиваться.

Поэтому для пойм сложносоставного профиля сечения нецелесообразны попытки установления закономерностей изменения средних (для потока поймы в целом) скоростей от уровней воды, необходима разбивка его на отсеки в зависимости от характера изменения глубин и шероховатостей по ширине поймы.

Наиболее перспективным является построение расчетных зависимостей в относительных величинах. Для потока поймы такие характеристики еще не получены и этот вопрос остается открытым. Поэтому в качестве основной характеристики, к которой были отнесены параметры пойменного потока, были приняты соответствующие значения руслового потока при уровнях затопления бровок прирусловых валов, т. е. все параметры пойменного потока рассматривались в относительных величинах в виде $\frac{v_п}{v_{р.б}}$, $\frac{C_п}{C_{р.б}}$, $\frac{n_п}{n_{р.б}}$ и пр. Характер изменения кривых расходов и средних скоростей пойменных потоков с уровнем воды в значительной степени определяется характером изменения площадей, ширины и средних глубин.

Поэтому для выявления влияния руслового потока на пойменный были построены кривые зависимостей $\frac{n_п}{n_{р.б}} = f(H')$ и $\frac{v_п}{v_{р.б}} = f(H')$

и установлено, что на большинстве исследованных рек отмечается резкое уменьшение величин $\frac{n_п}{n_{р.б}}$ с ростом уровней и только на отдельных реках эта закономерность нарушается и наблюдается либо стабилизация, либо даже увеличение их значений.

Следует отметить, что при расчетах величин $C_п$ и $n_п$ возникают дополнительные трудности, обусловленные отсутствием измерений уклонов свободной поверхности на пойме. Даже методика таких измерений не разработана. Поэтому было сделано допущение о равенстве уклонов свободной поверхности поймы уклонам в русле. Дальнейший расчет выполнялся по формуле Шези, т. е. в предположении, что режим потока равномерный.

При третьем типе взаимодействия потоков происходит резкое уменьшение значений $\frac{n_п}{n_{р.б}}$ с ростом глубин на пойме. Причем на ряде рек (Ока у с. Половское, Ветлуга у д. Дубники и Сож у г. Славгород) значения $\frac{n_п}{n_{р.б}}$ при малых наполнениях поймы достигают 6—8. Примерно при уровнях 100—120 см над отметкой бровки прирусловых валов кривые $\frac{n_п}{n_{р.б}}=f(H')$ стабилизируются и собираются в относительно узкий пучок, ограниченный значениями $\frac{n_п}{n_{р.б}}=1{,}3—1{,}8$.

При втором типе взаимодействия потоков также для большинства рек отмечается уменьшение, а затем стабилизация значений $\frac{n_п}{n_{р.б}}$ с ростом уровней. Значения $\frac{n_п}{n_{р.б}}$ изменяются в значительно меньших пределах (0,5—4,2). При этом примерно на 40% всех исследованных рек значения $\frac{n_п}{n_{р.б}}$ при всех уровнях меньше единицы. Стабилизация остальных кривых $\frac{n_п}{n_{р.б}}=f(H')$ происходит при уровнях $H=80—100$ см. Причем значения $\frac{n_п}{n_{р.б}}$ становятся меньше единицы.

Таким образом, установлены качественные особенности изменения значений $\frac{n_п}{n_{р.б}}$ при изменении уровней воды при втором и третьем типах взаимодействия потоков.

Анализ характера изменения значений $\frac{v_п}{v_{р.б}}$ с уровнем воды, выполненный для второго и третьего типов взаимодействия потоков, позволил установить следующее.

1. Скорости потока поймы $\left(\frac{v_п}{v_{р.б}}\right)$ с ростом уровней воды увеличиваются при втором и третьем типах взаимодействия потоков.

2. Интенсивность увеличения скоростей $\left(\frac{\Delta\left(\frac{v_п}{v_{р.б}}\right)}{\Delta H}\right)$ при втором типе взаимодействия потоков в 3—4 раза больше, чем при третьем.

3. Установлена графическая зависимость градиентов средних скоростей пойменного потока от уровней воды (H') и углов α для каждого типа взаимодействия потоков.

5. МЕТОДЫ РАСЧЕТА ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ РУСЕЛ С ПОЙМАМИ

5.1. Методы расчета, основанные на экспериментальных данных

Различные ведомственные инструкции и наставления рекомендуют расчет максимальных расходов воды выполнять по уравнению (1). Причем при определении пойменной составляющей потока довольно часто пойму приходится разделять на отдельные отсеки с однородной шероховатостью и глубиной. Тогда уравнение (1) может быть представлено в виде:

$$Q = Q_р + \Sigma Q_{п_i}. \qquad (5.1)$$

Однако это уравнение применимо только для условий равномерного режима потока или близкого к нему, а потоки в руслах с поймами характеризуются резко выраженной неравномерностью режима и интенсивным массообменом между ними, на что затрачивается значительное количество энергии.

Поэтому по данным экспериментов по изучению взаимодействия руслового и пойменного потоков рядом авторов для расчета пропускной способности русел с поймами были предложены формулы вида:

$$Q = k_р Q_р + k_п Q_п. \qquad (5.2)$$

Коэффициенты $k_р$ и $k_п$ учитывают взаимное влияние руслового и пойменного потоков. Так как эти формулы разрабатывались на основе данных экспериментов при первом типе взаимодействия потоков, то значения коэффициентов $k_р < 1$, а $k_п > 1$. В качестве примера можно привести предложения И. Ф. Карасева [7]:

$$k_р = \left(\frac{gB_р}{gB_р + 2\varphi C_р^2 k_v h_{р.б}}\right)^{0,5}; \quad k_п = \left(\frac{gB_п}{gB_п + 2\varphi\alpha_v C_п^2 k_v h_{р.б}}\right)^{0,5}, \qquad (5.3)$$

где φ — коэффициент, учитывающий эффект взаимодействия потоков;

$$k_v = \frac{v_р - v_п}{v_п}; \quad \alpha_v = \frac{v_р}{v_п},$$

Г. В. Железнякова [6]

$$Q = \left(1 - \frac{\beta_{*р} C_{*р}}{\sqrt{g}} \sqrt{\frac{I}{\mathrm{Fr}_р}} + k_{к.э\ р}\right) Q_{р.ф} +$$

$$+ \left(1 - \frac{\beta_{*п} C_{*п}}{\sqrt{g}} \sqrt{\frac{I}{\mathrm{Fr}}} + k_{к.э.п}\right) Q_{п\ ф}, \qquad (5.4)$$

где β_* — параметр, характеризующий неравномерность распределения глубин; $k_{к\ э} \approx 0{,}04—0{,}08$ — коэффициент, учитывающий выравнивание эпюры скоростей по глубине потока; все параметры правой части уравнения (5.4) отнесены автором к поверхностным скоростям.

Можно привести предложения еще ряда отечественных и зарубежных исследователей. Однако они, отличаясь по форме записи значений $k_р$ и $k_п$, по существу близки между собой и не учитывают типа взаимодействия потоков.

5.2. Методы расчета, основанные на решении системы уравнений неразрывности и движения потоков с переменной массой

Задача движения потоков в руслах с поймами трехмерная и наиболее перспективным путем ее решения является применение системы уравнений неразрывности и движения потока с переменной массой. Первую попытку ее применения для расчета скоростей и других характеристик потоков в руслах с поймами сделал Д. Е. Скородумов [12], ограничившийся одномерной идеализацией. Уравнение движения в конечных разностях представлено им в виде

$$I = \frac{v^2}{C^2 h} + \frac{\alpha_н v_н^2 - \alpha_в v_в^2}{2gl} + \frac{v - v_д}{g\omega} \frac{Q_н - Q_в}{l} + \frac{\alpha'}{g} \frac{\Delta v}{\Delta t}, \qquad (5.5)$$

где α' и α — соответственно коэффициенты Буссинеска и Кориолиса; $v_д$ — проекция скоростей притекающих или оттекающих вод на направление движения руслового потока; индексы «н» и «в» обозначают, что параметры соответственно относятся к нижнему или верхнему створам; l — расстояние между этими створами.

Д. Е. Скородумовым и Н. Б. Барышниковым [1, 12] выполнена оценка членов уравнения (5.5). С этой целью обозначим члены правой части уравнения (5.5) через

$$\varepsilon_1 = \frac{\alpha_н v_н^2 - \alpha_в v_в^2}{2gl}; \quad \varepsilon_2 = \frac{v - v_д}{g\omega} \frac{Q_н - Q_в}{l} \quad и \quad \varepsilon_3 = \frac{\alpha'}{g} \frac{\Delta v}{\Delta t}.$$

ε_1 — характеризует затраты энергии потока за счет неравномерности режима его движения. Введя допущения о постоянстве расхода и равенстве коэффициента Кориолиса на верхнем и нижнем створах, получим приближенное выражение для расчета $\varepsilon_1 \approx \frac{\alpha \overline{Q}}{2gl}\left(\frac{1}{\omega_н^2} - \frac{1}{\omega_в^2}\right)$. Практически величина этого члена уравнения определяется характером изменения площадей сечения по длине реки. По данным расчетов на примере рек Луги и Пьяны значения $\frac{\varepsilon_1}{I}$ могут достигать 50%. Величина $\frac{\varepsilon_2}{I}$, характеризующая затраты энергии на массообмен между русловым и пойменными потоками, на этих же реках достигает 20%. Однако анализ данных специальных исследований [7, 12] показывает, что при больших углах пересечения динамических осей потоков в русле возникает водоворотная область, размеры которой определяются мощностью пересекающихся потоков. Она может занимать все русло и течение в нем останавливается или даже изменяется на обратное. Следовательно, значение $\frac{\varepsilon_2}{I}$ может достигать 100%.

Несколько сложнее оценка значения $\frac{\varepsilon_3}{I}$, характеризующего нестационарность режима. По данным Н. Б. Барышникова [1], его величина мала и на равнинных реках не превышает 5%. Однако, как показывают исследования последних лет [3], влияние нестационарности процесса значительно больше. Действительно, при затоплении поймы свободного меандрирования наблюдается неоднократная смена направлений течений на ней. Таким образом, нестационарность процесса косвенно учитывается и другими членами уравнения (5.5).

Решая уравнение (5.5) относительно v, Д. Е. Скородумов получает

$$v = C\sqrt{hI\left(1 - \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3}{I}\right)}. \qquad (5.6)$$

Эту формулу он рекомендует для расчетов скоростей течения руслового потока при его взаимодействии с пойменным.

Данная методика является перспективной, но в ней имеются существенные недостатки. Основным из них является замена сложного пространственного потока одномерным, с целью применения уравнения одномерной идеализации к решению поставленной задачи.

Далее, автор методики применяет расчетные уравнения только к русловой части потока, хотя известно, что скоростное поле пойменного потока в значительной степени трансформируется под влиянием руслового.

Такая методика приводит к тому, что для решения поставленной задачи не используется уравнение неразрывности.

В. Г. Саликов, основываясь на работах В. М. Маккавеева и Г. А. Петрова, предложил для расчетов параметров руслового потока применять уравнение движения жидкости с переменным расходом в следующем виде:

$$I=\frac{\alpha}{g}\frac{dv^2}{dl}\frac{v}{C^2h}+\lambda\frac{v^2}{2gh}+\frac{\alpha v(v-u_1)}{gQ}\frac{dQ_1}{dl}+\frac{\alpha v(v-u_2)}{gQ}\frac{dQ_2}{dl}, \quad (5.7)$$

где λ — коэффициент гидравлического трения; dQ_1 и dQ_2 присоединяющийся и отделяющийся элементарные расходы воды; u_1 и u_2 — проекции средних скоростей, присоединяющихся и отделяющихся масс жидкости на направление движения потока в основном русле; α — корректив количества движения.

Уравнение (5.7) по своей структуре близко к уравнению (5.5). Однако член уравнения, характеризующий массообмен между русловым и пойменным потоками, обозначенный Д. Е. Скородумовым ε_2, подразделен на два, один из которых учитывает отток жидкости из русла на пойму, другой, наоборот, приток в русло.

В. Г. Саликов [11] по данным своих экспериментов, выполненных на модельном участке реки с типом руслового процесса — ограниченное меандрирование, произвел расчеты по уравнению (5.7) и получил, по его оценке, близкое соответствие расчетных данных модельным. Поскольку данная методика отличается от методики Д. Е. Скородумова только в деталях, недостатки последней присущи и методике В. Г. Саликова.

В 1969 г. Г. В. Железняков [6] предпринял попытку преобразования системы дифференциальных уравнений движения и неразрывности для расчета параметров потока в русле с поймой. Им получена система уравнений в виде:

$$\int_0^{B-B_{\text{к. э}}} \alpha_B v\frac{\partial v}{\partial l}db+\int_0^{B_{\text{к. э}}} \alpha_{B_{\text{к. э}}}\frac{\partial v_{\text{к. э}}}{\partial l}db+\int_0^{B}\alpha'\frac{\partial v}{\partial t}db+g\int_0^{B}\frac{\partial h}{\partial l}db=$$

$$=gIB-\int_0^{B-B_{\text{к. э}}}\frac{v^2}{C^2h}db-\int_0^{B}\frac{v_{\text{к. э}}^2}{C_{\text{к. э}}^2h}db, \quad (5.8)$$

$$\int_0^{B}\frac{\partial h}{\partial l}db+\int_0^{B-B_{\text{к. э}}}\frac{\partial h}{\partial l}db+\int_0^{B_{\text{к. э}}}v_{\text{к. э}}\frac{\partial h}{\partial l}db+\int_0^{B}h\frac{\partial v}{\partial l}db=0,$$

где $B_{\text{к. э}}$ — часть ширины потока, на которой наблюдается кинематический эффект; α_B и α' — коэффициенты Кориолиса и Буссинеска для вертикали; l и b — элементы длины и ширины потока; v — средняя на вертикали скорость потока; к. э — индекс, обозначающий, что расчет данного параметра выполняется с учетом кинематического эффекта.

Решение Г. В. Железнякова весьма интересно и оригинально, но для доведения его уравнений до расчетных необходимы глубокие проработки, в частности по определению значений $B_{к.э}$, $C_{к.э}$ и других характеристик потока в зоне действия кинематического эффекта.

Таким образом, приходится констатировать, что методика аналитического расчета параметров потока составного сечения разработана недостаточно, а эмпирические, приближенные методы, как правило, основаны на лабораторных данных и расчеты по ним дают результаты, существенно отличные от натурных. Это отличие обусловлено двумя основными причинами. Первая — резкое различие морфометрии русел и пойм как в поперечном сечении, так и особенно по длине естественных водотоков от моделей. Практически во всех экспериментальных работах исследовались потоки на моделях с постоянными по ширине и длине характеристиками русла и поймы, причем суммарная ширина русла и поймы, как правило, была неизменной по длине. Уклоны свободной поверхности поддерживались одинаковыми как в русле, так и на пойме, и неизменными по длине и практически не менялись при изменении уровней.

Вторая — в сложности процесса изменения уклонов свободной поверхности по ширине и длине потоков в руслах с поймами и при увеличении уровней воды. Изменение уклонов, в свою очередь, определяет характер изменения коэффициентов шероховатости. В то же время на моделях, как правило, исследовались потоки с постоянной шероховатостью по длине и ширине русла и поймы. Уклоны свободной поверхности на таких установках обычно поддерживались постоянными и не менялись при изменении уровней воды.

Данные натурных наблюдений, обработанные Н. Б. Барышниковым и Д. Е. Скородумовым [12], показывают, что характер изменения уклонов свободной поверхности при уровнях, превышающих отметки бровок прирусловых валов, как правило, определяется характером изменения ширины поймы по длине реки.

Рассмотрим возможные пути решения проблемы расчета пропускной способности русел с поймами с учетом эффекта взаимодействия потоков в них. Учитывая, что уравнения (5.5 и 5.6) применялись Д. Е. Скородумовым только к русловой части потока, а уравнение неразрывности не использовалось, целесообразно разработать аналогичные (5.5) уравнения для пойменных составляющих потока.

Такая система уравнений для потоков в руслах с двусторонними поймами имеет вид:

$$I_р = \frac{\bar{v}_р^2}{C_р^2 h_р} + \frac{\partial}{\partial l}\left(\frac{\alpha_р v_р^2}{2g}\right) + \frac{q_* v_р}{g\omega_р} + \frac{\alpha_р'}{g}\frac{\partial v_р}{\partial t}; \qquad (5.9)$$

$$I_{пл} = \frac{\bar{v}_{пл}^2}{C_{пл}^2 h_{пл}} + \frac{\partial}{\partial l}\left(\frac{\alpha_{пл} v_{пл}^2}{2g}\right) + \frac{(q_{пл} + q_1)\, v_{пл}}{g\omega_{пл}} + \frac{\alpha_{пл}'}{g}\frac{\partial v_{пл}}{\partial t}; \qquad (5.10)$$

$$I_{\text{ппр}} = \frac{\bar{v}^2_{\text{ппр}}}{C^2_{\text{ппр}} h_{\text{ппр}}} + \frac{\partial}{\partial l}\left(\frac{\alpha_{\text{ппр}} v^2_{\text{ппр}}}{2g}\right) + \frac{(q_{\text{ппр}} + q_2)\, v_{\text{ппр}}}{g\,\omega_{\text{ппр}}} + \frac{\alpha'_{\text{ппр}}}{g}\frac{\partial v_{\text{ппр}}}{\partial t}; \quad (5.11)$$

$$\frac{\partial (Q_{\text{р}} + Q_{\text{пл}} + Q_{\text{ппр}})}{\partial l} + \frac{\partial (\omega_{\text{р}} + \omega_{\text{пл}} + \omega_{\text{ппр}})}{\partial t} = q_1 + q_2, \quad (5.12)$$

где $q_* = q_1 + q_2$ — расход воды на единицу длины потока за счет массообмена между руслом и левой (пл) и правой (ппр) поймами; q_1 и q_2 — соответственно расходы, учитывающие приток воды со склонов на левую и правую поймы, а также потери на испарение и фильтрацию.

В дальнейшем, с целью упрощения задачи, ограничимся односторонней поймой. Система уравнений (5.9—5.12) будет при этом иметь вид:

$$I_{\text{р}} = \frac{\bar{v}^2_{\text{р}}}{C^2_{\text{р}} h_{\text{р}}} + \frac{\partial}{\partial l}\left(\frac{\alpha_{\text{р}} v^2_{\text{р}}}{2g}\right) + \frac{q_{\text{р}} v_{\text{р}}}{g\,\omega_{\text{р}}} + \frac{\alpha'_{\text{р}}}{g}\frac{\partial v_{\text{р}}}{\partial t}; \quad (5.13)$$

$$I_{\text{п}} = \frac{\bar{v}^2_{\text{п}}}{C^2_{\text{п}} h_{\text{п}}} + \frac{\partial}{\partial l}\left(\frac{\alpha_{\text{п}} v^2_{\text{п}}}{2g}\right) + \frac{q_{\text{п}} v_{\text{п}}}{g\,\omega_{\text{п}}} + \frac{\alpha'_{\text{п}}}{g}\frac{\partial v_{\text{п}}}{\partial t}; \quad (5.14)$$

$$\frac{\partial (Q_{\text{р}} + Q_{\text{п}})}{\partial l} + \frac{\partial (\omega_{\text{р}} + \omega_{\text{п}})}{\partial t} = q_1 + q_2, \quad (5.15)$$

где все обозначения общепринятые, а члены уравнений $\frac{q_{\text{р}} v_{\text{р}}}{g\,\omega_{\text{р}}}$ и $\frac{q_{\text{п}} v_{\text{п}}}{g\,\omega_{\text{п}}}$ учитывают влияние как боковой приточности, так и массообмена между руслом и поймой. Поэтому

$$q_{\text{р}} = q + q_1; \quad (5.16)$$

$$q_{\text{п}} = q + q_2, \quad (5.17)$$

где q — расход воды на единицу длины потока, учитывающий массообмен между руслом и поймой; q_1 и q_2 — соответственно боковой приток в русло и пойму со склонов долины (на единицу длины потока).

При отсутствии сосредоточенного притока значения q_1 и q_2, как правило, малы по сравнению с q. Последняя величина, хотя и изучена недостаточно, но анализ лабораторных и натурных данных показал, что ее значение в пределе соизмеримо с расходами воды в русле и на пойме (на единицу ширины потока).

Несколько сложнее обстоит дело с оценкой членов уравнения (5.14). Это, в основном, обусловлено отсутствием методики измерения уклонов свободной поверхности и значительно более низкой точностью измерений составляющих пойменного потока, нежели руслового.

Особую сложность представляет расчет величин $\frac{q_р v_р}{g\omega_р}$ и $\frac{q_п v_п}{g\omega_п}$, учитывающих как массообмен между руслом и поймой, так и боковую приточность. С учетом (5.16 и 5.17) запишем:

$$\frac{q_р v_р}{g\omega_р} = \frac{q v_р}{g\omega_р} + \frac{q_1 v_р}{g\omega_р}; \quad \frac{q_п v_п}{g\omega_п} = \frac{q v_п}{g\omega_п} + \frac{q_2 v_п}{g\omega_п}. \tag{5.18}$$

Выразим q по формуле водослива

$$q = m\sqrt{2g|\Delta H|}\, h_п \operatorname{Sign}(H_р - H_п), \tag{5.19}$$

где $m = m(\alpha)$ — коэффициент водослива, зависящий от угла α;

$$\operatorname{Sign}(H_р - H_п) \begin{cases} +1 & H_р > H_п \text{ — второй тип взаимодействия потоков,} \\ 0 & H_р = H_п, \\ -1 & H_р < H_п \text{ — третий тип взаимодействия потоков.} \end{cases}$$

С учетом (5.19) и пренебрегая величиной $\varepsilon_з = \frac{\alpha'}{g}\frac{\partial v}{\partial t}$ (для руслового и пойменного потоков), а также $\frac{\partial(\omega_р + \omega_п)}{\partial t}$, переходим к неравномерному, квазиустановившемуся движению. Поэтому систему уравнений (5.13—5.15) можно записать

$$I_р = \frac{v_р^2}{C_р^2 h_р} + \frac{\partial}{\partial l}\left(\frac{\alpha_р v_р^2}{2g}\right) + \frac{q_1 v_р}{g\omega_р} + \frac{v_р m\sqrt{2g|\Delta H|}\, h_п \operatorname{Sign}(H_р - H_п)}{g\omega_р}; \tag{5.20}$$

$$I_п = \frac{v_п^2}{C_п^2 h_п} + \frac{\partial}{\partial l}\left(\frac{\alpha_п v_п^2}{2g}\right) + \frac{q_2 v_п}{g\omega_п} + \frac{v_п m\sqrt{2g|\Delta H|}\, h_п \operatorname{Sign}(H_р - H_п)}{g\omega_п}; \tag{5.21}$$

$$(\omega_р + \omega_п)\frac{d(v_р + v_п)}{dl} + (v_р + v_п)\frac{d(\omega_р + \omega_п)}{dl} = q_1 + q_2. \tag{5.22}$$

Рассмотрим, каким образом осуществляется учет кинематического эффекта взаимодействия руслового и пойменного потоков в системе уравнений (5.20—5.22).

Из их анализа вытекает, что уравнением (5.22), выражающим закон сохранения массы, этот эффект не учитывается. Указанный эффект может быть учтен только в трех членах правой части уравнений (5.20 и 5.21).

1. $\frac{v^2}{C^2h}$ — основной член уравнения, параметром которого, учитывающим дополнительные сопротивления за счет кинематического эффекта, является коэффициент Шези.

2. $\frac{\partial}{\partial l}\left(\frac{\alpha v^2}{2g}\right)$ — конвективный член уравнения, учитывающий неравномерность движения потока. Не останавливаясь на его детальном анализе, который будет выполнен в последующем, отметим лишь разработки Г. В. Железнякова, Л. С. Никитиной и Н. Б. Барышникова [6 и др.], установивших, что значения коэффициентов $\alpha_р$ и $\alpha_п$ не могут быть приняты постоянными величинами, ибо они резко изменяются при слиянии отсеков потока при увеличении уровней воды и для поймы могут достигать 4,0—5,0. Таким образом, кинематический эффект в данном члене уравнения может быть учтен через значения коэффициентов $\alpha_р$ и $\alpha_п$.

3. $\frac{vm\sqrt{2g|\Delta H|}\,h_п \operatorname{Sign}(H_р - H_п)}{g\omega}$ — данный член уравнения учитывает массообмен между руслом и поймой. Влияние кинематического эффекта определяется коэффициентом m, зависящим от угла пересечения динамических осей руслового и пойменного потоков.

Как показал анализ, наибольший вес имеют первый, второй и четвертый члены уравнений (5.20 и 5.21). Представим коэффициент Шези C в виде $C=C_1f(L)$, где $C=f(n, H)$, т. е. коэффициент Шези для равномерного режима, а $f(L)$ — величина, учитывающая влияние эффекта взаимодействия руслового и пойменного потоков.

Дополнительный анализ, проведенный Н. Б. Барышниковым совместно с В. В. Коваленко, показывает, что параметр L может быть записан в виде

$$L=\frac{h}{v}\frac{\partial v}{\partial l}. \tag{5.23}$$

Тогда

$$C=f\left(H,\ n,\ \frac{h}{v}\frac{\partial v}{\partial l}\right). \tag{5.24}$$

Из уравнения неразрывности (5.22) при пренебрежении членами q_1 и q_2 получим

$$\frac{\partial(Q_р+Q_п)}{\partial l}=\frac{\partial Q_р}{\partial l}+\frac{\partial Q_п}{\partial l}=\omega_р\frac{\partial v_р}{\partial l}+v_р\frac{\partial \omega_р}{\partial l}+\omega_п\frac{\partial v_п}{\partial l}+v_п\frac{\partial \omega_п}{\partial l}=0. \tag{5.25}$$

Для потока в целом

$$\frac{\partial Q}{\partial l}=\omega\frac{\partial v}{\partial l}+v\frac{\partial \omega}{\partial l}. \tag{5.26}$$

Принимая $\frac{\partial Q}{\partial l}=0$, получим

$$\frac{\partial v}{\partial l}=-\frac{v}{\omega}\frac{\partial \omega}{\partial l};\quad \frac{h}{v}\frac{\partial v}{\partial l}=-\frac{h}{\omega}\frac{\partial \omega}{\partial l}.$$

Далее

$$\frac{\partial \omega}{\partial l}=\frac{\partial \omega}{\partial h}\frac{\partial h}{\partial l}+\left(\frac{\partial \omega}{\partial l}\right)_*=B\frac{\partial h}{\partial l}+\left(\frac{\partial \omega}{\partial l}\right)_*, \tag{5.27}$$

где $\left(\frac{\partial \omega}{\partial l}\right)_*$ — изменение площади сечения по длине реки, связанное с непризматичностью русла. С некоторыми допущениями это выражение может быть принято отдельно для русла и поймы.

Решая совместно (5.25, 5.26 и 5.27) получим

$$L=-\frac{h}{\omega}\left[B\frac{\partial h}{\partial l}+\left(\frac{\partial \omega}{\partial l}\right)_*\right]=-\left[\frac{\partial h}{\partial l}+\frac{h}{\omega}\left(\frac{\partial \omega}{\partial l}\right)_*\right]=$$

$$=-\frac{\partial h}{\partial l}-B\left(\frac{\partial \omega}{\partial l}\right)_*. \tag{5.28}$$

Учитывая, что $\frac{\partial h}{\partial l}=i-I$ для недеформируемого русла и установившегося движения $\left(\frac{\partial i}{\partial t}=0\right)$, получим $\frac{\partial h}{\partial l}=f(I)$. Хотя значение $\frac{\partial h}{\partial l}$ зависит как от гидравлики потока, так и от морфологии русла и поймы.

Таким образом, учет эффекта взаимодействия руслового и пойменного потоков в системе уравнений (5.20—5.22) осуществляется через коэффициенты Шези ($C_р$ и $C_п$), коррективы скорости ($\alpha_р$ и $\alpha_п$) и в инерционных членах ε_2 (для русла и поймы).

Система этих уравнений является дальнейшим развитием предложений Д. Е. Скородумова, учитывая не только влияние пойменного потока на русловой, но и руслового на пойменный.

6. ВЛИЯНИЕ МОРФОЛОГИИ ПОЙМ И РУСЕЛ НА ОБРАЗОВАНИЕ ПЕТЕЛЬ НА КРИВЫХ ЗАВИСИМОСТЕЙ $Q=f(H)$, $v=f(H)$ и $I=f(H)$

6.1. Причины образования петель на кривых зависимостей $Q=f(H)$, $v=f(H)$ и $I=f(H)$

Петлеобразные кривые довольно часто встречаются на равнинных реках. Так по данным В. В. Коваленко примерно на каждом седьмом посту связи между расходами, скоростями, уклонами свободной поверхности и уровнями воды не являются однозначными. Более того, отсутствие петель на указанных кривых для поймен-

ных створов является частным случаем. Как правило, после выхода воды на пойму эти кривые должны быть петлеобразными.

Большинство исследований, посвященных анализу причин образования петель на кривых зависимостей $Q=f(H)$, $v=f(H)$ и $I=f(H)$, основано на данных специальных исследований в нижних бьефах ГЭС при резковыраженном попусковом режиме их работы. В естественных же условиях разница уклонов свободной поверхности на подъеме и спаде уровней значительно меньше и часто находится в пределах точности измерений. Как правило, на большинстве беспойменных створов средние скорости и расходы воды, измеренные на подъеме и спаде паводков при одинаковых уровнях воды, также незначительно отличаются друг от друга, обычно в пределах точности измерений.

На таких створах для расчетов обычно принимают однозначные кривые зависимости $Q=f(H)$, $v=f(H)$ и $I=f(H)$, чему также способствует принятая в гидрометслужбе система оценки качества работы станции, приводящая к тому, что ряд закономерно отклоняющихся от расчетных зависимостей точек, соответствующих данным натурных измерений, бракуется. Именно это часто затрудняет анализ явления и препятствует вскрытию физической сущности процесса.

В настоящее время практически отсутствуют гипотезы научно-обоснованно объясняющие причины образования петель на указанных кривых. Так, М. А. Великанов [4] указывал, что при пропуске паводков на равнинных реках наблюдается закономерная последовательность чередования максимумов — уклонов свободной поверхности, расходов и уровней воды, не вскрывая причин этого явления. В специальной литературе по гидравлике наличие петель на кривых расходов воды, как правило, объясняется влиянием нестационарности движения. Однако анализ системы уравнений неразрывности и движения в форме Сен-Венана, выполненный в предыдущих главах, показал, что величина члена уравнения движения, учитывающего нестационарность процесса $\left(\frac{\alpha'}{g}\frac{\partial v}{\partial t}\right)$ на равнинных реках, невелика $\left(\frac{\varepsilon_3}{I}\leqslant 5\%\right)$ и, следовательно, его влияние незначительно.

Еще более сложным является анализ причин формирования петель на указанных кривых на реках с поймами, где в дополнение к нестационарности процесса добавляются такие факторы как интенсивный массообмен между руслом и поймами, аккумуляция и регулирование паводочного стока поймами, кинематический эффект безнапорного потока и ряд других. В частности, М. А. Великанов [4] еще в 1948 г. отмечал, что уклоны свободной поверхности потока в паводочный период зависят от особенностей морфологии русла и особенно поймы.

В последние годы ряд исследователей отмечает большую роль пойменного регулирования в этом процессе.

6.2. Влияние регулирования паводочного стока поймами на характер зависимостей $Q=f(H)$, $v=f(H)$ и $I=f(H)$

Рядом исследователей была выдвинута гипотеза о влиянии пойменного и руслового регулирования на средние скорости и особенно расходы воды руслового потока на подъеме и спаде половодья. Однако, если исходить только из этой концепции, то будут получены парадоксальные результаты. Действительно, пойма и русло могут аккумулировать до 55—70% паводочного стока в период подъема уровней, отдавая его (за исключением потерь на заполнение различных бессточных пойменных емкостей, испарение и фильтрацию) в период спада уровней. Таким образом изъятие части паводочного стока в период подъема уровней и частичный его возврат в период их спада должно привести к тому, что ветви подъема на кривых зависимостей $Q=f(H)$, $v=f(H)$ и $I=f(H)$ всегда будут располагаться левее ветвей спада. То есть расходы и средние скорости в период подъема уровней всегда должны быть меньше аналогичных, но на спаде. Такие случаи встречаются в природных условиях, но крайне редко и исследователи [12 и др.] пытаются объяснить их местными причинами(подпор от притока, заторы, зажоры и прочее). Наиболее же часто наблюдается обратное расположение ветвей кривых, то есть ветви подъема на кривых зависимостей $Q=f(H)$, $v=f(H)$ и $I=f(H)$ располагаются правее ветвей спада.

Следует отметить, что значительные трудности вызывает определение объема регулирования и аккумуляции на расчетном участке. Помимо чисто технических трудностей определения объема наполнения поймы и русла, обусловленных отсутствием или низкой точностью исходной информации об уклонах свободной поверхности (падениях уровней), их распределении по длине реки, несинхронностью колебания уровней в русле и на пойме, вызывающих наличие значительных поперечных уклонов свободной поверхности на поймах, существенно изменяющихся в различные фазы прохождения паводков, возникает весьма острая проблема научного обоснования выбора длины расчетного участка, объем регулирования которого оказывает существенное влияние на скорости, расходы, а следовательно, и на продольные уклоны свободной поверхности руслового потока.

Анализ изменения морфометрических характеристик по длине реки, подтвердивший концепцию Н. И. Маккавеева о «четковидном» характере изменения ширины пойм по длине реки [8], позволяет рекомендовать для расчетов объемов аккумуляции и регулирования стока участок, длина которого определяется расстоянием между двумя соседними резкими уменьшениями ширины поймы, которые можно назвать узлами. Естественно при условии, что расчетный створ расположен в пределах этого участка. При этом точность расчетов находится в прямой зависимости от масштаба используемых планово-высотных картографических материалов и особенно от величины сечения рельефа, отображаемого горизонта-

лями. Эти расчеты обычно корректируются по данным съемок в расчетном створе. Величина ошибки при таких расчетах обычно не превышает 5%.

Таким образом, проведенный анализ показывает, что должен быть по крайней мере еще один или несколько факторов, влияние которых противоположно пойменному регулированию и в большинстве случаев по величине превышает его.

6.3. Влияние эффекта взаимодействия руслового и пойменного потоков на образование петель на кривых зависимостей $Q=f(H)$, $v=f(H)$ и $I=f(H)$

Н. Б. Барышниковым выдвинута гипотеза о существенном влиянии эффекта взаимодействия руслового и пойменного потоков на пропускную способность пойменных русел в различные фазы прохождения паводков [1, 2].

Однако использование этой гипотезы затруднено, ибо она основана как на учете нестационарности движения паводочной волны, так и особенностей морфологического строения расчетного участка, размеры которого неопределенны.

По-видимому, необходимо длину расчетного участка принять аналогичной длине участка, на котором подсчитываются объемы регулирования и аккумуляции паводочного стока, т. е. расстоянию между двумя соседними сужениями (узлами) поймы. Однако, как показал анализ картографических материалов, на участке такой длины, как правило, располагается несколько излучин и соответственно несколько пойменных массивов, для которых углы α могут существенно отличаться друг от друга. Таким образом, к сложностям метода определения расчетного значения угла α для одной излучины или пойменного массива добавляются дополнительные трудности, обусловленные необходимостью выбора некоторого осредненного значения угла $\bar{\alpha}$, который отражал бы влияние эффекта взаимодействия руслового и пойменного потоков на средние скорости и пропускную способность руслового потока на расчетном участке в целом.

Дополнительным фактором, затрудняющим определение расчетного значения $\bar{\alpha}$, является то, что по мере увеличения уровней воды и изменения фазы прохождения паводка изменяется не только величина угла α, но и его знак, т. е. может изменяться тип взаимодействия потоков. Именно этим и определяется влияние нестационарности.

В качестве примера можно рассмотреть процесс заполнения и опорожнения одиночного пойменного массива при свободно меандрирующем типе руслового процесса. Процесс затопления и опорожнения такого массива обычно начинается с поступления воды через низовые прорвы. При этом на массиве наблюдаются течения обратные по направлению в главном русле, происходит затопление различных бессточных пойменных емкостей, понижений рельe-

фа, интенсивная инфильтрация и испарение. Единый транзитный поток на пойме отсутствует, а течение происходит вдоль вееров прирусловых валов. Процесс затопления пойменного массива в этом случае аналогичен растеканию масс жидкости руслового потока по пойме, т. е. второму типу взаимодействия руслового и пойменного потоков.

Такой характер взаимодействия потоков продолжается до тех пор пока уровни воды руслового потока не превысят отметки дна верховых прорв. После этого массы воды через верховые прорвы начинают поступать на массив. По-видимому, период времени между моментами поступления воды на массив через низовые и верховые прорвы можно выделить в качестве первой фазы его затопления.

Таким образом, началом второй фазы затопления поймы является образование на ней транзитного потока в результате поступления воды через верховые и сбросы ее в русло через низовые прорвы. При повышении уровней воды выше отметки гребней валов они затапливаются, отдельные струи сливаются и постепенно образуется единый пойменный поток, отделенный от руслового прирусловым валом. Дальнейшее повышение уровней приводит к затоплению прирусловых вала и к образованию единого руслопойменного потока. Именно этот момент и следует считать концом второй и началом третьей фазы.

Для третьей фазы влияние эффекта взаимодействия руслового и пойменного потоков на средние скорости и пропускную способность русла определяется морфологическими особенностями расчетного участка. Так, средняя скорость руслового потока в этом случае может быть определена по графическим зависимостям $\frac{v_р}{v_{р.б}} = f\left(\frac{h_р}{h_{р.б}}, \alpha\right)$. При реализации рабочей гипотезы об определяющем влиянии эффекта взаимодействия руслового и пойменного потоков и регулирующего влияния поймы необходимо, как уже указывалось, определить не только значение угла α для отдельного пойменного массива, но и его осредненное для нескольких массивов расчетное значение $\bar{\alpha}$.

Однако анализ картографических и гидрологических данных показывает, что на расчетном участке значения углов α для отдельных массивов изменяется незначительно в пределах $\pm 5°$. Это значительно упрощает задачу определения значения $\bar{\alpha}$. Его можно рассчитать как средневзвешенное значение углов α отдельных массивов. При этом учитываются не только величины углов, но и размеры массивов, ибо мощность пойменного потока оказывает решающее влияние на торможение им руслового.

Таким образом, выявлены два фактора: регулирующее влияние поймы и эффект взаимодействия руслового и пойменного потоков. Эти факторы могут оказывать взаимно-противоположное влияние или, наоборот, усиливать воздействие друг на друга. В конечном

счете расположение ветвей кривых зависимостей $Q=f(H)$, $v=f(H)$ и $I=f(H)$ определяется влиянием эффекта взаимодействия руслового и пойменного потоков. Ибо этот фактор оказывает разнонаправленное действие, а пойменное регулирование — однонаправленное.

6.4. Методика расчетов

Н. Б. Барышниковым и Е. С. Субботиной [3] разработана методика расчета разности объемов паводочного стока в периоды подъема и спада уровней для типа руслового процесса — свободное меандрирование. С этой целью непрерывный процесс прохождения паводка был разбит на три указанные выше фазы.

В качестве основных факторов, определяющих величину отклонения ветвей кривых зависимостей $Q=f(H)$ и $v=f(H)$ от соответствующих осредненных однозначных кривых, были приняты пойменное и русловое регулирование паводочного стока и эффект взаимодействия руслового и пойменного потоков.

Первоначально для расчетов было предложено уравнение баланса объемов паводочного стока, которое в общем виде записывается

$$W_{c_i} - W_{п_i} \pm W^*_{i_п} \pm W^*_{i_c} = \Delta W_i. \qquad (6.1)$$

Однако дальнейший анализ показал, что более обоснованно и удобно для расчетов представить это уравнение не в объемах стока, а в расходах воды (рис. 15) в виде

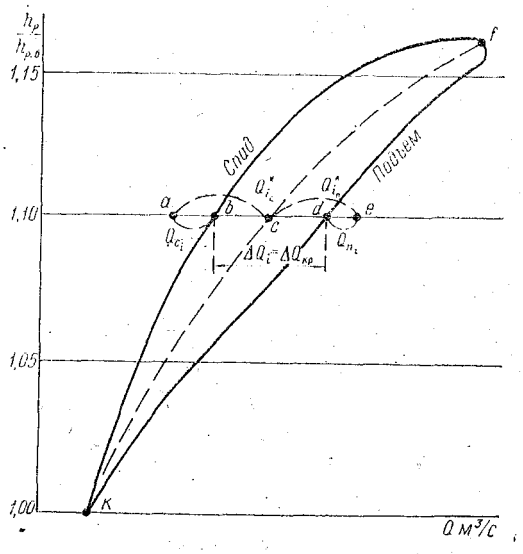

Рис. 15. Кривая $Q=f\left(\frac{h_р}{h_{р.б}}\right)$, иллюстрирующая методику определения параметров уравнения (6.2).

$$Q_{c_i} - Q_{п_i} \pm Q_{i_c} \pm Q_{i_п} = \Delta Q_i, \qquad (6.2)$$

где $W_{п_i}(Q_{п_i})$ — объем (расход) оттока воды из русла на пойму в период подъема уровней; $W_{c_i}(Q_{c_i})$ — объем (расход) притока воды в русло из поймы на спаде (равен объему $W_{п_i}$ за исключением потерь на заполнение бессточных понижений рельефа, инфильтрацию и испарение); $W^*_{i_{пс}}(Q_{i_{пс}})$ — изменение объема стока (расхода) в русле при подъеме $(W^*_{i_{пс}};\ Q_{i_п})$ или спаде $(W^*_{ic},\ Q_{i_c})$ уровней за счет взаимодействия руслового и пойменного потоков; i — индекс, означающий фазу затопления и опорожнения поймы, принимающий значения 1, 2, 3; ΔW_i (ΔQ_i) — алгебраическая сумма этих объемов (расходов воды), характеризующая расхождение ветвей кривых зависимостей $Q=f(H)$ при подъеме и спаде уровней.

По-видимому, уравнение (6.2) более полно отражает реальный процесс пропуска паводков. Это обусловлено существенным различием продолжительности подъема и спада уровней, что более четко учитывается при использовании в расчетах в качестве основного параметра — расхода воды.

Выполним анализ возможности упрощения и последующего решения уравнений (6.1 и 6.2) для всех трех выделенных фаз.

Для первой фазы затопления пойм уравнения 6.1 и 6.2 будут представлены в виде:

$$W_{c_1} - W_{п_1} - W^*_{1_c} + W_{1_п} = \Delta W_1; \qquad (6.3)$$

$$Q_{c_1} - Q_{п_1} - Q_{1_c} + Q_{1_п} = \Delta Q_1. \qquad (6.4)$$

Знаки перед третьим и четвертым членами этих уравнений определяются из следующих соображений. Процесс затопления пойменных массивов осуществляется через низовые прорвы, что аналогично растеканию масс жидкости по пойме, т. е. близко ко второму типу взаимодействия руслового и пойменного потоков. Поэтому величину увеличения скоростей руслового потока можно в первом приближении определить по графическим зависимостям:

$$\frac{v_р}{v_{р.б}} = f\left(\frac{h_р}{h_{р.б}},\ \alpha\right) \quad \text{или} \quad \frac{v_р}{v_{р.б}} = f\left(\frac{h_р}{h_{р.б}},\ \alpha,\ \frac{I}{I_{р.б}}\right)$$

(см. рис. 7, 8, 10).

При опорожнении поймы (в аналогичную фазу) ее воды, поступая в русло, тормозят русловой поток, что приводит к уменьшению его средних скоростей, а следовательно, и расходов воды, что близко к условиям третьего типа взаимодействия потоков. Величину этого уменьшения скоростей также приближенно можно определить по графическим зависимостям $\frac{v_р}{v_{р.б}} = f\left(\frac{h_р}{h_{р.б}},\ \alpha,\ \frac{B_п}{B_р}\right)$

или $\frac{v_р}{v_{р.б}} = f\left(\frac{h_р}{h_{р.б}}, \alpha\right)$. Последующий расчет значений $Q_{1_п}$ и $Q_{1_с}$ осуществляется по методу скорость — площадь, т. е. $Q_{1_{пс}} = \Delta v_{р_{1_{пс}}} \omega$, где $\Delta v_{р_1}$ — величина изменения средней скорости руслового потока за счет влияния пойменного потока. Она будет положительной при втором и отрицательная при третьем типах взаимодействия потоков; ω — площадь поперечного сечения русла при расчетном уровне воды.

Возникает вопрос о правомерности использования графических зависимостей $\frac{v_р}{v_{р.б}} = f\left(\frac{h_р}{h_{р.б}}, \alpha\right)$ для расчетов. Действительно, они были получены по данным наблюдений при третьей фазе затопления поймы, когда русловой и пойменный потоки сливаясь образуют единый поток. В эту фазу эффект взаимодействия потоков будет наибольшим. В то же время при первой фазе растекание руслового потока происходит дискретно по прорвам, размеры которых малы по сравнению с длиной фронта перелива воды при полном затоплении прирусловых валов. В то же время уклоны дна и особенно свободной поверхности в прорвах в несколько раз превышают уклоны свободной поверхности руслового потока. Так, по данным И. В. Попова, скорости воды в прорвах реки Оби достигали 2—3 м/с при скорости руслового потока около 1 м/с, т. е. были в несколько раз больше чем в русловом потоке.

Исходя из этого, расчет увеличения (на подъеме) или уменьшения скоростей (на спаде) по графическим зависимостям $\frac{v_р}{v_{р.б}} = f\left(\frac{h_р}{h_{р.б}}, \alpha\right)$ является приближенным. Этот вопрос требует основательной проверки как на лабораторных моделях, так и в натурных условиях.

Рассмотрим особенности расчетов по уравнениям (6.1 и 6.2) для второй фазы затопления поймы. В эту фазу на пойме наблюдается транзитный поток следующий по направлению вееров остаточных прирусловых валов, а в случае затопления их бровок образуется единый транзитный поток на пойме. В то же время для расчетов третьего и четвертого членов уравнений (6.1 и 6.2) необходимо точно определять места расположения верховых и низовых прорв. По-видимому, это наиболее сложный и наименее изученный случай взаимодействия руслового и пойменного потоков. Действительно, вдоль реки происходит чередование верховых и низовых прорв при наличии незатопленной бровки прируслового вала, отделяющей русловой поток от пойменного. По принятой концепции отток воды из русла через прорвы в прирусловых валах аналогичен растеканию масс руслового потока по пойме, т. е. имеем условия близкие к взаимодействию потоков по второму типу. По-

ступление воды через низовые прорвы в русло вызывает торможение руслового потока, т. е. имеем случай близкий к взаимодействию потоков по третьему типу. Таким образом, в зависимости от расположения расчетного створа члены уравнений (6.1 и 6.2) $W^*_{2_{пс}}$ или $Q_{2_{пс}}$ могут иметь как положительные, так и отрицательные знаки. С учетом этого уравнения (6.1 и 6.2) для второй фазы могут быть записаны в виде:

$$W_{c_2} - W_{п_2} \pm W^*_{2_п} \pm W^*_{2_c} = \Delta W_2; \qquad (6.5)$$

$$Q_{c_2} - Q_{п_2} \pm Q_{2_п} \pm Q_{2_c} = \Delta Q_2. \qquad (6.6)$$

Что касается объемов регулирования руслом и поймой, то во второй фазе они различаются значительно меньше, чем в первой. Действительно, основные понижения рельефа уже заполнены. Учитывая, что величина повышения уровня в эту фазу определяется глубиной верховой прорвы и зависит от особенностей морфологического строения поймы, дополнительные (по сравнению с первой фазой) площади затопления невелики. Поэтому основные потери стока — это испарение и инфильтрация. Однако дополнительным фактором, который учтен в уравнении (6.6) и не учтен в уравнении (6.5), является различная продолжительность периодов затопления и опорожнения пойм. Как правило, продолжительность опорожнения в эту фазу в 1,5—2,0 раза больше, чем затопления. Этот фактор, по-видимому, оказывает существенное влияние на значение $Q_{пс_2}$ и практически не оказывает на $W_{пс_2}$.

При третьей фазе происходит затопление бровок прирусловых валов и образование единого руслопойменного потока. Уравнения (6.1 и 6.2) принимают для нее следующий вид:

$$W_{c_3} - W_{п_3} \pm W^*_{3_п} \pm W^*_{3_c} = \Delta W_3; \qquad (6.7)$$

$$Q_{c_3} - Q_{п_3} \pm Q_{3_п} \pm Q_{3_c} = \Delta Q_3. \qquad (6.8)$$

Амплитуда колебаний уровней в эту фазу может достигать нескольких метров и существенно превышать ее в другие фазы. Это приводит к значительному увеличению площадей затопления пойм и пойменных массивов, а следовательно, и увеличению потерь на заполнение нетранзитных пойменных емкостей, понижений рельефа и прочее. Помимо этого, как и в предыдущие фазы, происходит испарение и инфильтрация. Таким образом, объемы аккумуляции и опорожнения поймы в этой фазе также не равны между собой. Дополнительным фактором, действующим аналогично со второй фазой, является различная продолжительность затопления и опорожнения пойм и пойменных массивов.

Несколько сложнее обстоит дело с третьим и четвертым членами левой части уравнений (6.7 и 6.8), учитывающими эффект взаимодействия руслового и пойменного потоков. По-видимому, этот эффект различен в периоды подъема и спада уровней. Действи-

тельно, как показал анализ натурных исследований уклонов свободной поверхности пойм, в том числе и поперечных, они различны в периоды подъема и спада уровней, что является свидетельством различия влияния эффекта взаимодействия потоков на средние скорости и пропускную способность главного русла. Однако методика расчета, учитывающая эти особенности в периоды подъема и спада уровней, отсутствует.

ЛИТЕРАТУРА

1. Барышников Н. Б. Речные поймы. — Л.: Гидрометеоиздат, 1978.— 152 с.
2. Барышников Н. Б. Поймы равнинных рек (морфология, гидрология и гидравлика). — В сб.: «Вопросы гидрологии». Л., изд. ЛПИ, 1981, вып. 74, с. 95—104. (ЛГМИ).
3. Барышников Н. Б., Субботина Е. С. Зависимость уклонов свободной поверхности от морфометрических характеристик русла и поймы. — Метеорология и гидрология, 1981, № 1, с. 82—88.
4. Великанов М. А. Гидрология суши. — Л.: Гидрометеоиздат, 1948.— 530 с.
5. Гончаров В. Н. Динамика русловых потоков. — Л.: Гидрометеоиздат, 1962.—375 с.
6. Железняков Г. В. Теория гидрометрии. — Л.: Гидрометеоиздат, 1976.—434 с.
7. Карасев И. Ф. Русловые процессы при переброске стока. — Л.: Гидрометеоиздат, 1975.—288 с.
8. Маккавеев Н. И. Русло реки и эрозия в ее бассейне. — М.: Изд-во АН СССР, 1955.—347 с.
9. Попов И. В., Кочаненкова Н. П. О морфологических особенностях речных пойм. — Тр. ГГИ, 1972, вып. 190, с. 19—36.
10. Радюк А. Л. Трассирование прорезей на порогах с учетом кинематического эффекта. — ВИНИТИ, № 6750-73, депонировано, Красноярск, 1973.—28 с.
11. Саликов В. Г. Некоторые исследования взаимодействия руслового и пойменного потоков. — Тр. IV Всесоюзного гидрологического съезда. Л., Гидрометеоиздат, 1976, т. 11, с. 75—81.
12. Скородумов Д. Е. Вопросы гидравлики пойменных русел в связи с задачами построения и экстраполяции кривых расходов воды. Тр. ГГИ, 1965, вып. 128, с. 3—96.
13. Спицын И. П. О взаимодействии потоков основного русла и поймы. — Метеорология и гидрология, 1962, № 10, с. 22—27.
14. Форхгеймер Ф. Гидравлика. — М.: ОНТИ, 1935.—615 с.
15. Чоу В. Т. Гидравлика открытых каналов. — М.: Стройиздат, 1969.—464 с.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение 3
1. Лабораторные и натурные исследования процесса взаимодействия руслового и пойменного потоков 4
1.1. Лабораторные исследования 4
1.2. Натурные исследования процесса взаимодействия руслового и пойменного потоков 9
2. Типизация процесса взаимодействия руслового и пойменного потоков . . . 11
3. Влияние пойменного потока на расходы воды и средние скорости руслового 16
4. Сопротивление движению потоков в руслах с поймами 23
4.1. Сопротивление движению потоков в руслах простых форм сечения . . . 23
4.2. Коэффициенты шероховатости русел сложной формы 25
4.3. Влияние руслового потока на пропускную способность, сопротивление и скоростное поле пойменного 29
5. Методы расчета пропускной способности русел с поймами 32
5.1. Методы расчета, основанные на экспериментальных данных 32
5.2. Методы расчета, основанные на решении системы уравнений неразрывности и движения потоков с переменной массой 33
6. Влияние морфологии пойм и русел на образование петель на кривых зависимостей $Q=f(H)$, $v=f(H)$ и $I=f(H)$ 40
6.1. Причины образования петель на кривых зависимостей $Q=f(H)$, $v=f(H)$, $I=f(H)$ 40
6.2. Влияние регулирования паводочного стока поймами на характер зависимостей $Q=f(H)$, $v=f(H)$, $I=f(H)$ 42
6.3. Влияние эффекта взаимодействия руслового и пойменного потоков на образование петель на кривых зависимостей $Q=f(H)$, $v=f(H)$, $I=f(H)$ . . 43
6.4. Методика расчетов 45
Литература 49

НИКОЛАЙ БОРИСОВИЧ БАРЫШНИКОВ

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ РУСЛОВОГО И ПОЙМЕННОГО ПОТОКОВ

Конспект лекций

Редактор *З. Б. Ваксенбург*

Корректор *Р. В. Федорова*

Сдано в набор 31.08.83. Подписано в печать 13.06.84. М-16501. Формат 60×90 1/16. Бумага тип. № 2. Лит. гарн. Печать высокая. Печ. л. 3,1. Уч.-изд. л. 3,3. Тираж 700 экз. Темплан 1984 г., поз. 151. Заказ 507. Цена 15 коп.
ЛПИ им. М. И. Калинина. 195251, Ленинград, Политехническая ул. 29.

Типография ВВМУПП им. Ленинского комсомола