

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО
И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ РСФСР

06
178

ЛЕНИНГРАДСКИЙ
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

ТРУДЫ

ВЫПУСК 46

ИССЛЕДОВАНИЯ
ДИНАМИКИ РУСЛОВЫХ ПОТОКОВ

868.9.92

Под редакцией Н. Б. БАРЫШНИКОВА и Д. Е. СКОРОДУМОВА

БИБЛИОТЕКА
Ленинградского
Гидрометеорологического
Института

ЛЕНИНГРАД
1972

*Одобрено Ученым советом
Ленинградского гидрометеорологического института*

АННОТАЦИЯ

Сборник содержит в основном работы сотрудников кафедры динамики русловых потоков.

В статьях обобщены итоги экспериментальных работ, выполненных в лаборатории института по определению гидравлических сопротивлений, возникающих при взаимодействии отсеков потоков, движущихся с различными скоростями, а также в стратифицированных разнонаправленных потоках. Приведены результаты работ, непосредственно связанных с обслуживанием народного хозяйства; в частности методика оценки воздействия русловых деформаций, ледовых образований и других факторов на основания опор линий электропередач и других гидротехнических сооружений при их трассировании по долинам рек или через них. В сборнике также помещена статья по теории гидрометрических вертушек.

Сборник рассчитан на специалистов, работающих в области гидравлики, гидрометрии и гидрологии суши, а также на аспирантов и студентов старших курсов гидрологических специальностей.

Труды Ленинградского гидрометеорологического института

Выпуск 46

Исследования динамики русловых потоков

Редактор *З. Б. Ваксенбург*

М 08222 Подписано к печати 5.06.72 Объем 7³/₄ п. л. Тираж 500 Зак. 452
Типография ВОК Цена 78 коп.

Н. Б. Барышников

ВЛИЯНИЕ ПОПЕРЕЧНЫХ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ МАСС ЖИДКОСТИ НА ПРОПУСКНУЮ СПОСОБНОСТЬ РУСЕЛ С ПОЙМАМИ

В последние годы резко возросло внимание к вопросу расчета пропускной способности потоков с поймами [7, 13, 14, 15 и др.]. В ряде работ подчеркивается практическое значение данного вопроса для борьбы с наводнениями, при проектировании мостовых переходов, применении аэрометодов в гидрометрии, подсчете максимального и годового стока и др.

Основная группа исследований [1, 2, 8, 11, 18] направлена на вскрытие физической сущности процесса взаимодействия руслового и пойменного потоков и оценку изменения пропускной способности составных сечений.

Начало второму направлению положено в работах Гончарова [6] и Железнякова [7], в которых предпринята попытка аналитического решения проблемы взаимодействия потоков, движущихся с различными скоростями. Железняковым получены «интегро-дифференциальные уравнения» неустановившегося движения воды с учетом «кинематического эффекта безнапорного потока».

Данное исследование нельзя считать законченным, ибо, как указывает его автор, «приведенные уравнения являются одним из возможных вариантов».

Независимо от формы и вида расчетных уравнений, при любой постановке проблемы остается открытым вопрос нахождения граничных условий и особенно значения параметра $B_{кэ}$, определяемого как «часть ширины потока, на которой наблюдается кинематический эффект». Определение этой величины представляет некоторые затруднения даже при наличии надежных лабораторных данных и особенно сложно в натуральных условиях. По-видимому, для расчета величины $B_{кэ}$, даже ориентировочного, необходимо полностью вскрыть физическую картину механизма взаимодействия руслового и пойменного потоков.

В данной статье освещаются работы, выполнявшиеся в Ленинградском гидрометеорологическом институте в последние годы и посвященные выяснению причин изменения пропускной способности русла с поймой при различных условиях взаимодействия.

На экспериментальной установке, длина рабочей части которой 9 м, было выполнено бетонное русло шириной 40 см с двумя поймами шириной по 100 см каждая. Шероховатость русла оставалась постоянной и соответствовала шероховатости железного бетона (в дальнейшем принято обозначение «гладкая»), а шероховатость пойм изменялась от гладкой до 2,0 см.

На этой установке изучались различные условия взаимодействия руслового и пойменного потоков как при односторонней, так и при двусторонней поймах. Были рассмотрены случаи параллельного движения потоков в русле и поймах, перетекание жидкости из русла на пойму и обратное явление, т. е. перетекание из поймы в русло.

В настоящее время наиболее полно изучен вопрос взаимодействия потоков при отсутствии перетекания [8, 13]. В этом случае на границе раздела потоков, движущихся с различными скоростями, возникают вихри с вертикальной осью вращения, направленные в сторону руслового потока, имеющего более высокую продольную скорость течения, и замещающие поперечные течения. Такое направление движения вихрей можно объяснить, исходя из формулы Кутта-Жуковского [14]. На формирование вихрей, их перемещение в поперечном направлении и поперечные замещающие течения затрачивается энергия, что приводит к уменьшению пропускной способности потока в целом за счет его русловой составляющей. Это уменьшение по данным различных авторов достигает 10—16% и зависит от наполнения поймы. Вихревые массы жидкости, оказывая значительное сопротивление движению руслового потока, резко деформируют его скоростное поле, что приводит к существенному уменьшению скоростей на припойменных вертикалях и средней скорости всего потока. Снижение средних и максимальных скоростей руслового потока с увеличением глубин достигает максимума, а затем снова уменьшается. По-видимому, с уменьшением градиента скоростей руслового и пойменного потоков, вызванного уменьшением разности глубин, роль эффекта турбулентного взаимодействия уменьшается, и при значительных наполнениях поймы процесс образования вихрей затухает. Это приводит к увеличению пропускной способности потока в русле с поймами по сравнению с изолированными отсеками потоков.

Анализ данных экспериментов, выполненных в Ленинградском гидрометеорологическом институте в 1968—1969 гг., подтвердив полученные ранее результаты [3, 13, 15 и 18], позволяет рекомендовать для условий параллельности осей расчетную схему, предложенную Тобесом и Суки [17] для условий взаимодействия руслового и пойменного потоков при непараллельности их осей. Данная схема объединяет ранее предложенные методики и заключается в делении потока вертикальными плоскостями параллельными оси потока и проходящими в местах резкого изменения глубины или шероховатости при малых наполнениях поймы [6], а при больших наполнениях — горизонтальной плоскостью, отсекающей коренное

русло [9]. При такой методике остается невыясненным вопрос, при каких условиях осуществлять переход от первой схемы ко второй. Исследования этого вопроса при непараллельности осей руслового и пойменного потоков привели к рекомендации определения ведущего потока [6]. Ведущий поток определяется в зависимости от наполнения поймы, соотношения ширины русла и поймы и других характеристик.

Менее изученным, но в то же время имеющим большое практическое значение, является вопрос взаимодействия руслового и пойменного потоков при перетекании масс жидкости из поймы в русло и, наоборот, из русла на пойму.

Именно изучению этого вопроса и были посвящены основные экспериментальные исследования 1968—1969 гг., выполнявшиеся по методике, разработанной в институте [6]. Суть методики заключалась в измерении скоростей, глубин, уклонов и других характеристик как в изолированных стеклянными перегородками русловом и пойменном потоках, так и при взаимодействии. Контроль осуществлялся сопоставлением результатов измерений расходов воды по водосливу и гидрометрическим способом. Для обеспечения перетекания жидкости из русла на пойму и обратно производилось регулирование подачи воды на различные части модели, чем обеспечивалось отклонение динамических осей пойменного или руслового потоков на величину α в пределе достигающую 10° . Наибольшая глубина воды в русле достигала 14 см, а на пойме 9 см. Максимальные расходы на установке — 90 л/сек.

Измерение расходов воды гидрометрическим способом осуществлялось на двух створах, расположенных на расстоянии 2,5 и 5,0 м от входа на установку.

По данным измерений были построены кривые расходов воды как для изолированных, так и для взаимодействующих отсеков потока (рис. 1), изотакх местных скоростей и эпюры распределения средних на вертикалях скоростей по ширине потока для односторонней и двусторонней пойм (рис. 2).

Проведенный анализ и расчеты показывают на количественные и качественные отличия сопротивлений при перетекании из пойм в русло и из русла на поймы. Поэтому необходимо остановиться на результатах анализа в каждом случае отдельно.

Наибольшие значения уменьшения пропускной способности потока получены за счет увеличения сопротивления при перетекании жидкости из пойм в русло (рис. 1, А и рис. 1, Б, кривая III — $\alpha \approx 7^\circ$; IV — $\alpha \approx 3^\circ$). Массы жидкости пойменного потока, имеющие малые продольные скорости, поступая в русло оказывают значительное тормозящее воздействие на русловой поток. Скорости последнего снижаются, гидравлический центр скоростей в русле с односторонней поймой смещается к коренному берегу. Абсолютные значения средней и максимальной скоростей взаимодействующего руслового потока уменьшаются примерно в два раза по срав-

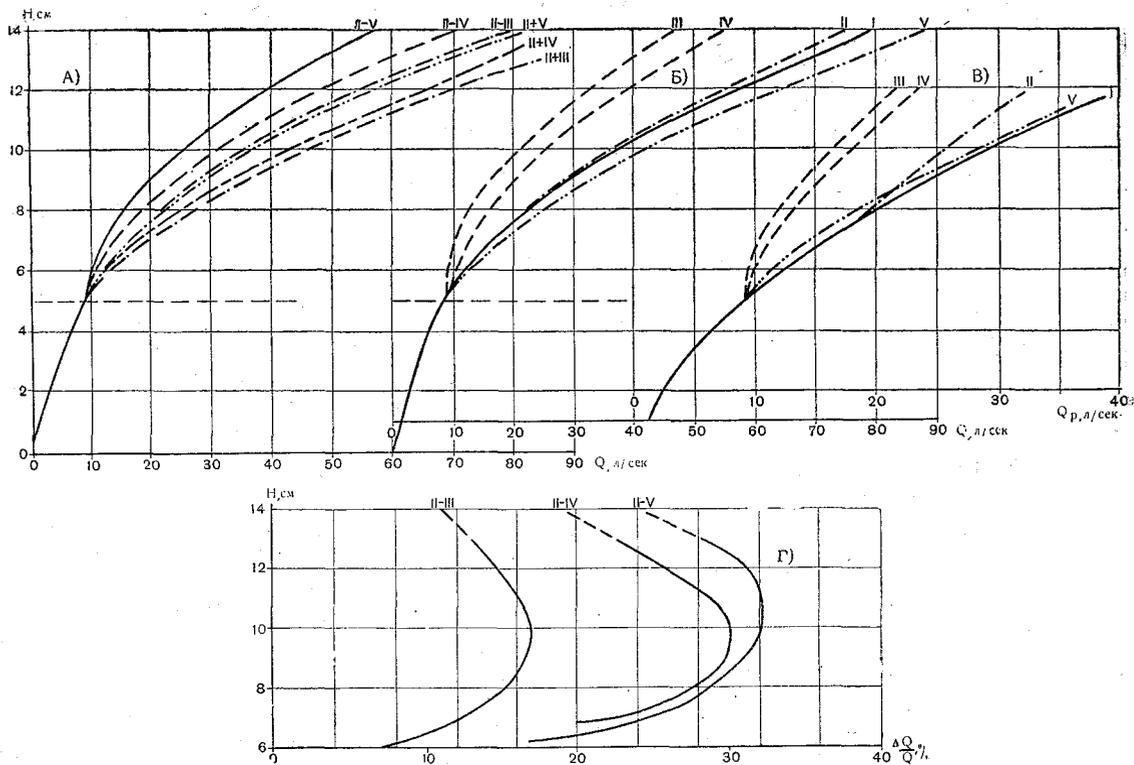


Рис. 1. Кривые зависимости $Q = f(H)$ и $\frac{\Delta Q}{Q} = f(H)$ при различных условиях взаимодействия:

A — для потока в русле и поймах различной шероховатости: $II + III$, $II + IV$, $II + V$ — суммарные для изолированных потоков; $II - III$; $II - IV$; $II - V$ — соответствующие для взаимодействующих при перетекании из пойм в русло. *B* — $Q = f(H)$ для потока в русле с поймой шероховатостью 2 см при различных условиях взаимодействия. *B* — аналогичная зависимость $Q_p = f(H)$, но только для русловой части потока. *Г* — кривые уменьшения пропускной способности потока в русле с односторонними поймами при перетекании жидкости из поймы в русло. *I* — изолированные отсеки потоков; *II* — турбулентное взаимодействие; *III*, *IV* — перетекание из поймы в русло ($\alpha \approx 7^\circ$ и 3°); *V* — перетекание из

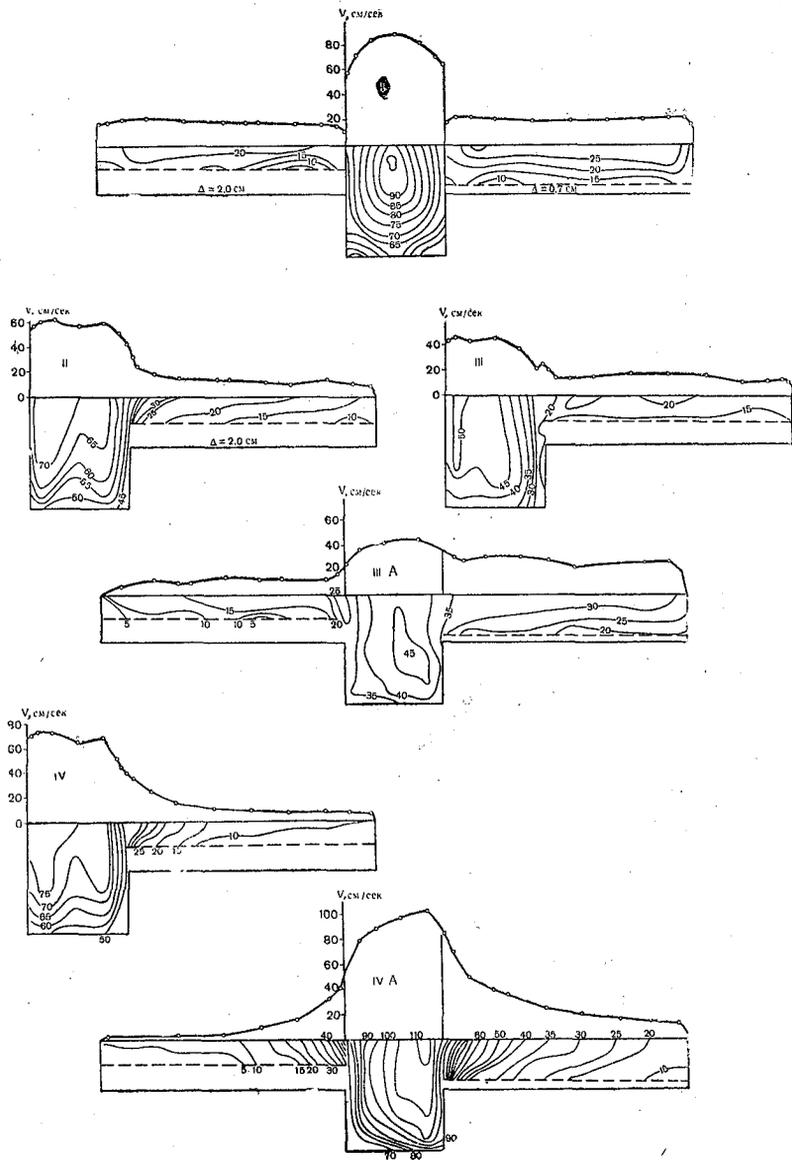


Рис. 2. Деформация поля скоростей при различных условиях взаимодействия потоков в русле с поймами ($H_p = 9$ см):

I — изолированное русло и поймы; *II* — турбулентное взаимодействие потоков русла и поймы; *III* и *III A* — перетекание из поймы в русло; *IV* и *IV A* — перетекание из русла на поймы.

нению с изолированным (рис. 2). Особенно четко процесс уменьшения скоростей прослеживается при анализе кривых зависимости средних на вертикалях скоростей от уровней воды (рис. 3).

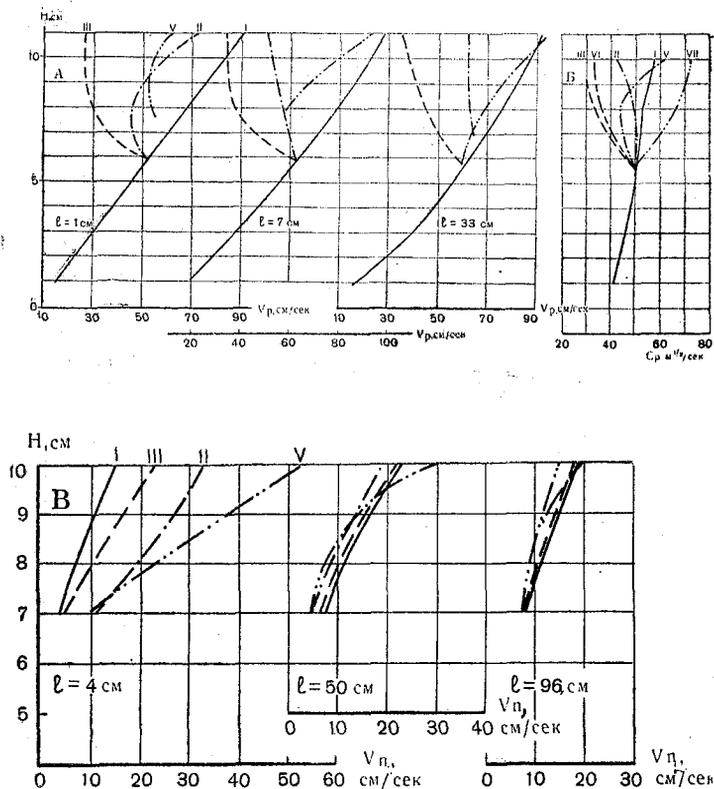


Рис. 3. Кривые зависимости средних на вертикали скоростей и коэффициента C_p от глубины (расстояния l в русле и пойме отсчитывались от границы русла и поймы):

А — для русловой части потока; Б — $C_p = f(H)$; В — для пойменной части потока (измерения скоростей начаты с $H_p = 7$ см, ибо верхняя отметка шероховатости поймы находится на этой глубине). I — изолированное русло и пойма; II — турбулентное взаимодействие; III, VI — перетекание из поймы в русло ($\alpha \approx 7^\circ$ и 3°); V, VII — перетекание из русла на пойму ($\alpha \approx 2^\circ$ и 4°).

Как видно на рис. 3, при выходе воды на пойму средние на вертикалях скорости руслового потока резко снижаются (от 0,9 до 0,3—0,4 м/сек), в то же время происходит небольшое увеличение скоростей на пойменных вертикалях (по сравнению с изолированным руслом). Это увеличение значительно на прирусловых вертикалях поймы и весьма быстро убывает с удалением вертикали

от русла. Практически уже на расстоянии 50 см от русла изменением пойменных скоростей под влиянием руслового потока можно пренебречь. Уменьшение скоростей руслового потока за счет перетекания жидкости с поймы не компенсируется небольшим возрастанием пойменных скоростей и обусловлено затратами энергии на преодоление сопротивлений поперечных течений.

Это отражается и в изменении пропускной способности как русла, так и всего потока в целом (рис. 1). На рис. 1 приведены кривые расходов для русловой части потока (рис. 1, В) при различных условиях взаимодействия. Аналогичные кривые расходов приведены и для всего потока в целом (рис. 1, Б). На рис. 1, А приведены суммарные для изолированных русел (II) и пойм различной шероховатости (III, IV, VI) кривые расходов воды, а также при их взаимодействии (II—III, II—IV, II—V) при условии перетекания жидкости из пойм в русло. Как видно на рис. 1, наибольшее уменьшение пропускной способности наблюдается при перетекании масс жидкости из поймы в русло. При перетекании же из русла на пойму, пропускная способность составного сечения существенно больше и даже превышает суммарную для изолированных отсеков. По-видимому, в этом случае затраты энергии несколько меньше, чем на трение об изолирующую потоки стеклянную стенку.

Аналогичная картина наблюдается и при анализе кривых зависимостей $C_p = f(H)$ при различных условиях взаимодействия (рис. 3, Б). Вычисление параметра C_p производится по формуле

$$\text{Шези } C_p = \frac{v_p}{\sqrt{H_p i}}, \text{ т. е. без учета инерционных членов.}$$

Относительные величины уменьшения пропускной способности потока при перетекании из поймы в русло по данным опытов в пределе достигают 35—40% (рис. 1, Г), существенно увеличиваясь с увеличением шероховатости поймы ($\Delta_{III} = 2 \text{ мм}$; $\Delta_{IV} = 20 \text{ мм}$).

В естественных условиях по исследованиям автора [4] и Скородумова [12] уменьшение пропускной способности потоков может достигать 40—50%.

Особенно существенным фактором является различие в сопротивлениях и уменьшении пропускной способности потоков при изменении направления поперечных перемещений масс жидкости, а именно из русла на пойму и наоборот. Действительно, таковые явления наблюдаются в природных условиях в паводочный период, хотя процессы затопления пойм в естественных условиях значительно сложнее и в большинстве случаев существенно отличаются от рассматриваемых [10].

Все приведенные выше рассуждения, да и большинство экспериментальных работ по изучению процессов взаимодействия отсеков потока, движущихся с различными скоростями (при условии параллельности их осей), относятся к какому-либо конкретному

поперечному сечению потока. В то же время характеристики потока изменяются по его длине; происходит перераспределение масс жидкости и количества движения между его частями, приводящее к уменьшению градиентов скоростей на границах отсеков потока с различными шероховатостями и глубинами. В конечном итоге, как показали опыты Эгли [16], выполнявшиеся в каналах составного сечения значительной длины, при параллельности осей потоков, происходит стабилизация их режима и уменьшение затрат энергии на процессы взаимодействия. Действительно, анализируя данные экспериментов в каналах составного сечения значительной длины, Эгли не обнаружил дополнительных затрат энергии на процессы взаимодействия.

Более сложен механизм движения при непараллельности осей руслового и пойменного потоков, где процесс обмена массами жидкости между его русловой и пойменными частями происходит непрерывно.

Таким образом, рассматривая задачу о взаимодействии отсеков потока движущихся с различными скоростями, необходимо отметить, что она является по своему существу трехмерной и все расчеты, выполненные для какого-то одного конкретного сечения потока, хотя и помогают вскрывать физическую сущность процесса, являются недостаточными.

Общеизвестно, что решение трехмерных задач в настоящее время выполняется, как правило, приближенными способами.

Способы расчета планов течений, основанные на методе Н. М. Бернадского, применимы к водотокам с плавным изменением глубин. Составные же сечения, и в том числе потоки в руслах с поймами, характеризуются резким изменением глубин и шероховатостей по ширине и, как следствие, высокими поперечными градиентами скоростей, вызывающими «кинематический эффект» или интенсивный процесс перетекания. Указанные особенности не позволяют применять к расчету параметров таких потоков метод Бернадского без дополнительного анализа.

Решение задачи расчета характеристик такого трехмерного потока в русле сложного сечения в настоящее время задерживается отсутствием надежного экспериментального материала, полученного на установках достаточной длины и с учетом изменения параметров потока как по ширине, так и по длине.

ЛИТЕРАТУРА

1. Агасиева С. И., Барекян А. Ш. Изменение средних скоростей главного русла и коэффициента Шези при прохождении паводка. Метеорология и гидрология, № 9, 1961.
2. Барышников Н. Б., Николаев В. Ф. Пропускная способность русла с различной по ширине шероховатостью. Труды ЛГМИ, вып. 25, 1967.
3. Барышников Н. Б., Саликов В. Г. Энергетические затраты при взаимодействии отсеков потока с различной шероховатостью. Метеорология и гидрология, № 9, 1968.

4. Барышников Н. Б. К определению максимальных расходов воды на реках с поймой. Труды ЛГМИ, вып. 36, 1969.
5. Барышников Н. Б. Розанов В. А. Уменьшение пропускной способности русел с неоднородной шероховатостью по ширине. Труды ЛГМИ, вып. 36, 1969.
6. Гончаров В. Н. Динамика русловых потоков. Гидрометеиздат, Л., 1962.
7. Железняков Г. В. Интегро-дифференциальные уравнения неустановившегося движения воды в реках. Метеорология и гидрология, № 3, 1969.
8. Ле Ван Киеп. Движение воды в открытых руслах составного поперечного сечения. Автореферат диссертации, МГМИ, 1968.
9. Овчаров Е. Е. К вопросу об экстраполяции кривых расходов воды до высоких уровней с помощью уравнения равномерного движения. Доклады ТСХА, вып. 56, 1960.
10. Попов И. В. Деформации речных русел и гидротехническое строительство. Гидрометеиздат, Л., 1969.
11. Радюк А. А. О пропускной способности русла с неоднородной шероховатостью по ширине. Труды Сиб. технол. ин-та, сб. 41, 1967.
12. Скородумов Д. Е. Вопросы гидравлики пойменных русел. Труды ГГИ, вып. 128, 1965.
13. Спицын И. П. О механизме взаимодействия основного русла и поймы. Труды ЛГМИ, вып. 13, 1962.
14. Хитов Ю. Д. К вопросу кинематики пойменного потока извилистого русла. Труды Сиб. технол. ин-та, сб. 41, 1967.
15. Delleur I. W., Toebe G. H., Udeozo B. C. Uniform flow in idealized channel/flood plain geometries, Proceed. of XII Congress of the International Association for Hydraulic Research, vol. 1, USA, 1967.
16. Hegly M. Note sur l'écoulement de l'eau dans un canal a profil complexe. Paris, 1936.
17. Toebe G. H., Sooky A. A. Hydraulics of meandering rivers with flood plains. J. of the Waterways and Harbors. Civil Engrs., 93. № 2, 1967.
18. Townsend D. R. An Investigation of turbulence characteristics in a river model of complex cross section Proceed. Inst. Civil Engrs., 40, 1968.

О ДИНАМИКЕ ВЗАИМОДЕЙСТВУЮЩИХ ПОТОКОВ ГЛАВНОГО РУСЛА И ПОЙМЫ НА ПРЯМОЛИНЕЙНЫХ УЧАСТКАХ

В данной работе рассматривается динамика взаимодействующих потоков главного русла и поймы на прямолинейном участке. Работа выполнена на экспериментальных материалах, полученных в лаборатории водных исследований Ленинградского гидрометеорологического института.

Учету стока воды в речных руслах с поймой уделяется большое внимание как в отечественной [1—6, 10—12], так и в зарубежной литературе [7—9]. Большой интерес к данной проблеме обусловлен тем, что до настоящего времени еще полностью не вскрыт механизм взаимодействия руслопойменных потоков на прямолинейных участках.

В 20—30-х годах получила распространение схема расчета пропускной способности, согласно которой живое сечение расчленилось на русловую и пойменную части, каждая из которых приводилась к схеме плоского потока. Потоки отсеков русла и поймы рассматривались как гидравлически независимые друг от друга, как бы разделенные фиктивной, лишенной сопротивления, перегородкой. Для каждого отсека, так же как это делается для русла простого профиля, применяется формула Шези

$$Q = \omega C \sqrt{RI},$$

где ω — площадь живого сечения русла (поймы); C — коэффициент Шези для русла (поймы); R — гидравлический радиус русла (поймы); I — уклон водной поверхности русла (поймы).

Вычисленные расходы для каждого отсека складываются и получают суммарный расход. С гидравлической точки зрения этот метод не удовлетворяет правильности расчета расходов воды для русла с поймой, так как наличие турбулентного обмена в горизонтальном поперечном направлении бесспорно существует, что далее в работе будет показано. Неучет турбулентного обмена в зоне взаимодействия потоков русла и поймы приводит к значительным ошибкам в расчете расходов воды для таких потоков [1—9]. Более подробный анализ данной проблемы изложен в работах [6, 11].

При взаимодействии потоков русла и поймы в натуральных условиях ряд исследователей обнаружили поперечные уклоны, а известно, что вид свободной поверхности оказывает существенное влияние на кинематическую структуру потока и его динамику. Н. И. Маккавеев в работе [12] приводит следующее: «У потоков с широким руслом поперечный профиль водной поверхности не может быть горизонтальным при резких колебаниях уровня воды. По данным наблюдений на реках отметки водного зеркала на стрежне потока становятся при подъеме уровней выше, а при спаде ниже, чем отметки зеркала вдоль берегов (Лохтин, 1877, Рагозин, 1880) ... Заметную разницу уровней воды на пойме и в русле обнаружил Б. В. Поляков (1930) при изысканиях на р. Дон».

Для большего подтверждения того, что при взаимодействии потоков руслового с пойменным возникают поперечные уклоны, укажем на данные еще одной работы [10], где приводятся материал гидрометрических исследований на р. Иртыш. При затоплении поймы р. Иртыш были обнаружены значительные и устойчивые уклоны водной поверхности. Из данной работы следует, что косо-струйность пойменного потока по отношению к общему направлению потока обуславливает наличие поперечных уклонов водной поверхности, имеющих направление от русла к коренному берегу при подъеме уровня воды, приводящего к притоку воды на пойму, и, наоборот, поперечные уклоны от склона долины к руслу при оттоке воды с поймы или горизонтальную поверхность воды. При анализе поперечных уклонов авторы данной работы не принимали во внимание материалы наблюдений на участках, имеющих:

а) препятствия для поступления воды на пойму (поступление воды на пойму по отдельным протокам),

б) препятствия для стекания воды с поймы (явления естественного и искусственного подпора).

Из рассмотрения исключены концы пойменных массивов и крутые меандры, а также участки поймы у крутых поворотов русла. Из анализа данных материалов можно сделать вывод о том, что явление поперечного уклона при взаимодействии руслового и пойменного потоков исследовалось на участках близких к прямолинейным.

Достаточно полно вскрыть механизм взаимодействия между русловым и пойменным потоками на основе натуральных данных не представляется возможным из-за наличия дополнительных явлений (различные протоки, положение русла в плане долины и др.), которые часто затушевывают явление взаимодействия потоков русла и поймы. Данное явление достаточно полно можно изучить в лабораторных условиях, чему и посвящена данная работа.

Кинематическая структура потоков исследовалась на модели прямолинейного руслового участка с односторонней поймой и прямоугольной формой сечения русла и поймы. Модель руслопойменного участка имела следующие размеры: ширина русла была

равна 40 см, ширина поймы 100 см, рабочая длина модели равнялась 9 м. Шероховатость русла — бетонная поверхность, а абсолютная шероховатость поймы для опытов в данной работе равнялась 2 см. Уклон дна русла и поймы был равен 0,0019. Боковые стенки русла и поймы выполнены из зеркального стекла.

В процессе эксперимента потоки русла и поймы исследовались как при изоляции, так и при взаимодействии последних. Для измерения скоростей и углов векторов скоростей по длине участка были назначены четыре гидроствора (0,6; 2,5; 5,0 и 7,5 м) от головы участка. В створе 0,6 м русловой и пойменной потоки в течение всех опытов находились в изолированном состоянии, так как между ними всегда находилась перегородка из зеркального стекла, что было необходимо для создания различных типов взаимодействия потоков. Наблюдениями уровней на перегородке из стекла, в начальном створе, можно было создавать вход потоков в русловую и пойменную части русла с различными уровнями, что обеспечивалось регулировкой щитов в головной части установки. В зависимости от соотношения уровней потоков русла и поймы, в начальном створе, получались (вышеуказанные) различные типы взаимодействия потоков. Более подробно об этом будет изложено ниже.

При проведении опытов измерялись и исследовались следующие характеристики потока:

1. В изолированном состоянии (в основном створе 5 м) измерялись скорости потока через 1 см по глубине на 7 вертикалях в русле и на 11 вертикалях на пойме при 3—5 наполнениях в каждом. Для каждого опыта измерялся контрольный расход воды по водосливу в конце установки, а также измерялась температура воды.

2. При взаимодействии потоков главного русла и поймы объем измерений гидравлических характеристик и исследований структуры потока увеличивался. Скорости потока измерялись на 4 створах (0,6; 2,5; 5,0 и 7,5 м), вместо одного створа для изолированных потоков. При измерении скорости в точке здесь же измерялся и угол вектора скорости. Для измерения угла вектора скорости был приспособлен транспортир к трубке Реббока, а также была прикреплена ниточка на данную трубку, что позволяло измерять углы векторов скоростей. Дополнительно для выявления косоструйности, а также для выявления динамики вихревых структур применялись различные красящие вещества, древесные опилки и др.

3. Проводилась тарировка потоков русла и поймы как в изолированном состоянии, так и при их взаимодействии. Данная работа была необходима для установления функциональных связей $Q=f(H)$ для данных потоков. Данные тарировок $Q=f(H)$ с пересчетом их на скорости потока показаны на рис. 1. Из рисунка можно сделать вывод о том, что чем больше углы векторов скоростей в

направлении к русловой части потока, тем больше уменьшение средней скорости руслопойменного потока (кривые 5 и 6 рис. 1).

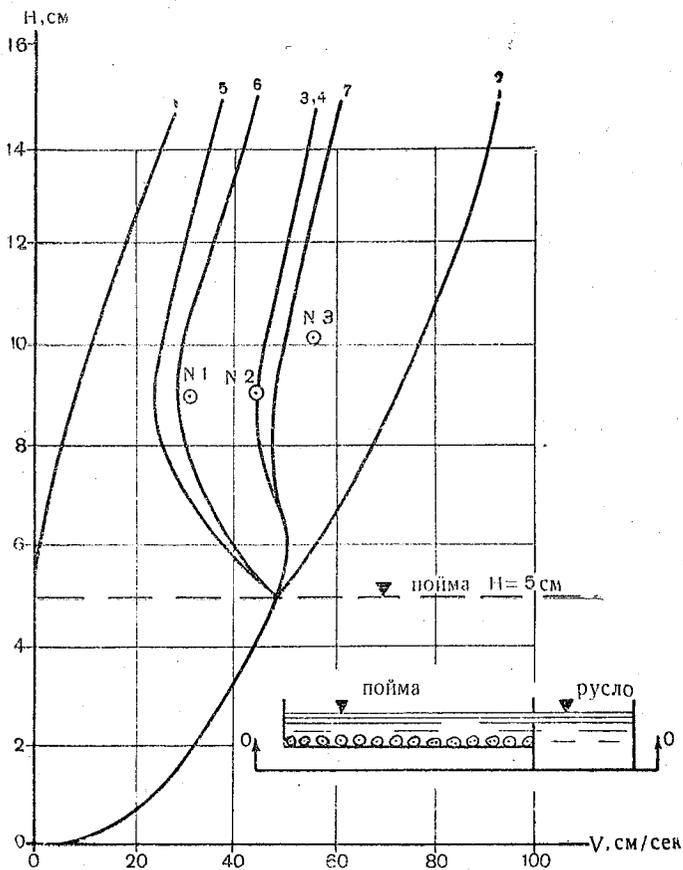


Рис. 1. Кривые зависимости $V = f(H)$:

1, 2 — средние скорости изолированного пойменного и руслового потоков;
 3 — средние скорости руслопойменного потока при изоляции; 4—7 средние скорости руслопойменного потока при взаимодействии, соответственно для углов вектора скорости α , равных $0^\circ, -10^\circ, -5^\circ, 4^\circ$

При изменении направления вектора скорости потока, а именно, при направлении его к пойме, мы наблюдаем увеличение средних скоростей потока в сравнении со скоростями, представленными кривой 3 (рис. 1). В ранее опубликованных работах не отмечалось такого явления, что при взаимодействии потоков главного русла и поймы средняя скорость для всего живого сечения может не только уменьшаться, но и увеличиваться.

Для анализа дальнейшего прилагаемого материала здесь уместно сделать некоторую систематизацию его и ввести понятия — первый, второй и третий типы взаимодействия потоков. Подразделение на три типа взаимодействия потоков носит не только каче-

ственный, но и количественный характер. Качественную сторону мы рассмотрим, исходя из анализа кинематической структуры потоков, при взаимодействии последних. Количественная сторона видна из анализа рис. 1.

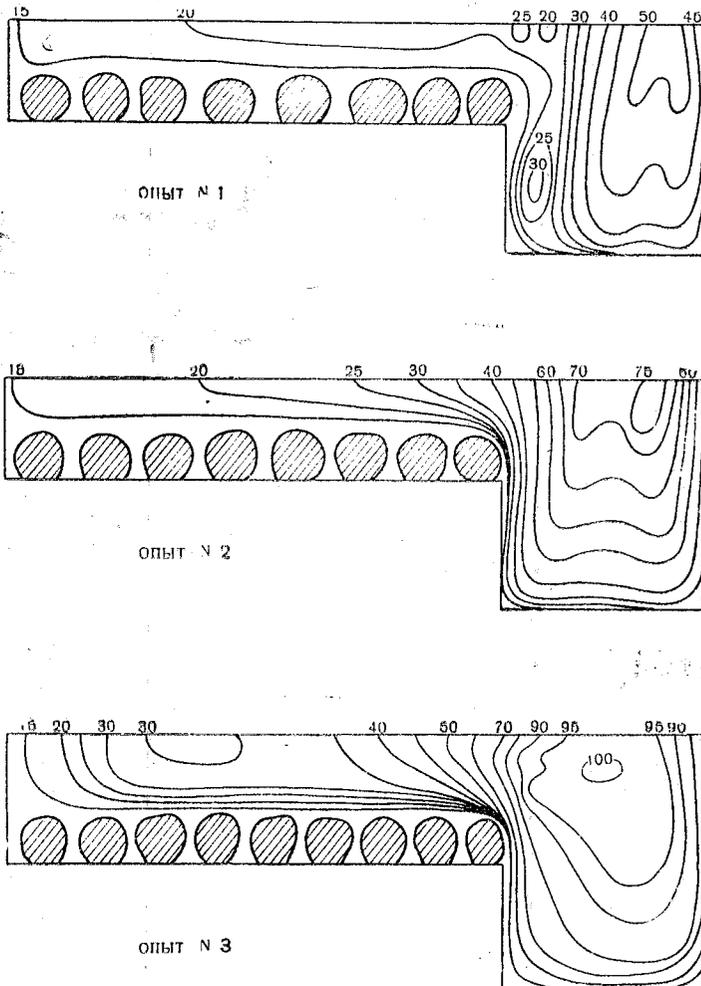


Рис. 2. Поле изотак ($см/сек$) при взаимодействии руслового и пойменного потоков в створе 5 м для опытов:

Опыт № 1 — направление вектора скорости в русло при $h_p = 9,0 см$, $Q_{вз} = 19,35 л/сек$, $V_{п\ вз} = 16,8 см/сек$, $V_{р\ вз} = 44,7 см/сек$, $V_{р+п\ вз} = 31,2 см/сек$, $Re = 18\ 700$, $Fr = 0,17$; **опыт № 2** — направление вектора скорости совпадает с основным направлением движения потока при $h_p = 9,0 см$, $Q_{р+п\ вз} = 27,82 л/сек$, $V_{п\ вз} = 18,1 см/сек$, $V_{р\ вз} = 62,2 см/сек$, $V_{р+п\ вз} = 44,8 см/сек$, $Re = 27\ 000$, $Fr = 0,34$; **опыт № 3** — направление вектора скорости на пойму при $h_p = 10,0 см$, $Q_{р+п\ вз} = 44,7 л/сек$, $V_{п\ вз} = 27,2 см/сек$, $V_{р\ вз} = 84,5 см/сек$, $V_{р+п\ вз} = 55,8 см/сек$, $Re = 39\ 000$, $Fr = 0,45$.

Каждый тип взаимодействующих между собой потоков отличается по направлению вектора скорости, указывающего какие массы воды куда перетекают, пойменные в русловую часть или русловые в пойменную часть. При отсутствии поперечных перетеканий угол вектора скорости в области взаимодействия потоков равен нулю. Следовательно:

1. Первый тип взаимодействия потоков — вектор скорости имеет направление в русло.

2. Второй тип взаимодействия — векторы скоростей совпадают с общим направлением потоков, т. е. не наблюдается поперечных перетеканий масс жидкости относительно основного направления потоков.

3. Третий тип взаимодействия потоков — векторы скоростей имеют направление на пойму.

Подразделение на типы взаимодействия диктуется и характером кинематического поля, той скоростной структурой, которая получается при взаимодействии потоков в зависимости от направления векторов скоростей.

Для анализа кинематической структуры потоков (рис. 2) на всех створах, где измерялись скорости потока и углы векторов их, были построены поля изотак для опытов № 1, 2, 3 (рис. 1), каждый из которых характеризует тот или иной тип взаимодействия потоков. Из анализа кинематической структуры потоков и направленных векторов скоростей (рис. 2) видно, что:

1. При угле векторов скоростей $3-10^\circ$ в русло, поле изотак (рис. 2, опыт № 1) показывает изгиб изотак в сторону руслового потока, что свидетельствует о поперечных перетеканиях части масс пойменного потока в русло. Для подтверждения вышесказанного можно привести план течений для данного опыта, где линии тока, обозначенные соответствующими цифрами имеют изгиб на пойменной части в русло (рис. 3, опыт № 1).

Характер кинематической структуры потока, плана течений, направление векторов скоростей для данного опыта отражает первый тип взаимодействия потоков. При данном типе взаимодействия потоков массы пойменного потока, имеющие меньшие скорости $V_{п}$, чем в русле, вторгаются в массы руслового потока, имеющие большие скорости $V_{р}$, чем в пойменном потоке. В процессе массообмена, пришедших масс пойменного потока с основными массами руслового потока, последние испытывают сопротивление обтекания и теряют часть своего количества движения на преодоление сопротивления и на сообщение вступившим массам дополнительной продольной скорости [2]. Данная работа турбулентного обмена приводит к уменьшению средней скорости всего руслопойменного потока (рис. 1, кривые 5 и 6) (уменьшение или увеличение средних скоростей руслопойменных потоков при трех типах взаимодействия потоков здесь и далее рассматривается в сравнении с кривой 3, рис. 1) и чем больший объем пойменных масс потока вторгается в русловую поток, тем большее количество

движения затрачивается русловым потоком на преодоление сопротивления, создаваемого пойменными массами потока, что приводит к еще большему снижению средней скорости руслопойменного потока.

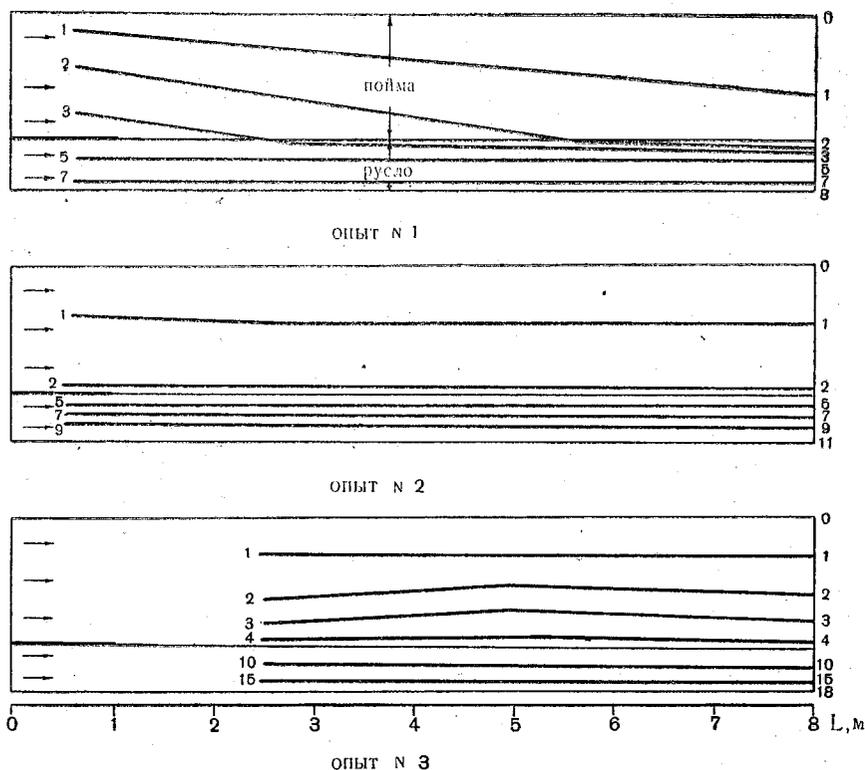


Рис. 3. Планы течений при взаимодействии руслового и пойменного потоков для опытов № 1, 2, 3

При данном типе взаимодействия вихревые структуры, которые были показаны в работе [4], в данном случае не наблюдались. Это объясняется тем, что при углах вектора скорости больше 3° , возникающая косоструйность при поперечном перетекании масс пойменного потока, сильно деформирует водную поверхность и все вихревые структуры, которые зарождаются в зоне взаимодействия потоков, быстро разрушаются и вследствие чего не наблюдается локализованных вихревых структур, как это имеет место в работе [4].

Косоструйность на поверхности пойменного потока по отношению к общему направлению движения потока обуславливается наличием поперечного уклона водной поверхности [10], что подтвер-

ждается данными опытов. Поперечный уклон водной поверхности выражается в перепаде отметок уровней воды ΔH в поперечнике участка русла с поймой. Для обнаружения и измерения данного перепада уровней в начале участка (створ 0,6 м) постоянно находилось разделительное стекло, по которому можно было определять ΔH . При первом типе взаимодействия потоков отметки уровня воды пойменного потока всегда были выше отметок уровня воды руслового потока, что обуславливало поперечные перетекания масс жидкости с поймы в русло. Разность уровней в поперечнике руслопойменного участка показывает на то, что русловой и пойменный потоки имеют разные продольные уклоны водной поверхности, при данном типе взаимодействия потоков уклон водной поверхности пойменного потока всегда выше, чем в русле $I_{п} > I_{р}$.

2. При нулевых углах векторов скоростей (рис. 2, опыт № 2) продольный уклон пойменного потока равен продольному уклону руслового потока $I_{п} = I_{р}$, поле изотак трансформируется только в зоне взаимодействия потоков. Это происходит за счет работы вихревых структур, что показано в работе [4] и др., но с тем различием, что, зарождаясь, вихревые структуры не смещались ни в зону пойменного потока, ни в зону руслового потока, а перемещались в зоне раздела потоков. По размерам вихревые структуры наблюдались с диаметром 15—30 см, которые можно отнести к мезовихрям [13], а известно, что при вихревых структурах средних размеров [13, 14] диссипативных потерь энергии не происходит, а происходит передача энергии данными вихревыми структурами от одного потока другому и между ними, что и показал анализ данных опытов.

Поле изотак, за исключением створа 0,6 м, сохраняет свою индивидуальность (не трансформируется) от створа к створу (рис. 2, опыт № 2), кроме зоны взаимодействия потоков, где наблюдается трансформация скоростного поля, вызванная работой вихревых структур.

Несмотря на явно выраженные вихревые структуры и связанную с ними работу потоков, уменьшение средней скорости руслопойменного потока не наблюдается (рис. 1, кривая 4) или оно находится в пределах точности измерений скоростей. План течений (рис. 3, опыт № 2) также характеризует то, что поперечного перетекания масс жидкости (из поймы в русло или из русла на пойму) не наблюдается и лишь незначительные перераспределения масс жидкости наблюдаются в зоне взаимодействия потоков.

Данный режим взаимодействия потоков главного русла и поймы позволяет отнести его ко второму типу взаимодействия потоков.

3. Третий тип взаимодействия потоков характеризуется направлением углов векторов скоростей в сторону пойменного потока. При данном типе взаимодействия потоков массы руслового потока, имеющие большие скорости $V_{р}$, вторгаются в массы основ-

ного пойменного потока, имеющие меньшие скорости $V_{п}$, чем в русле. Результат массообмена, вторгшихся масс руслового потока с массами пойменного потока, приводит к увеличению средних скоростей потока главного русла и поймы (рис. 1, кривая 7).

Продольный уклон водной поверхности руслового потока при данном типе взаимодействия всегда больше продольного уклона водной поверхности пойменного потока $I_p > I_{п}$, что создает перепад уровней в поперечнике.

Из анализа поля изотак (рис. 2, опыт № 3) следует, что в результате поперечного перетекания масс руслового потока на пойму происходит деформация скоростного поля пойменного потока (рис. 2, опыт № 3). Скорости пойменного потока повышаются в сравнении со скоростями изолированного пойменного потока.

Планы течений (рис. 3, опыт № 3) показывают изгиб линий тока в направлении пойменного потока, что также характеризует перемещение масс руслового потока на пойму. В отношении вихревых структур при данном типе взаимодействия получается та же картина, что и при первом типе взаимодействия потоков. Косоструйность сильно деформирует поверхность воды, что приводит к большим изменениям или разрушению вновь возникающих или ранее возникших вихревых структур.

Из вышеизложенного можно сделать следующие основные выводы:

1. При взаимодействии потоков можно выделить три типа взаимодействия их, так как каждый тип взаимодействия потоков отличается друг от друга не только качественной, но и количественной стороной:

а. При первом типе взаимодействия руслового и пойменного потоков векторы скоростей направлены в русло. Продольные уклоны пойменного потока всегда больше продольных уклонов руслового потока, что приводит к поперечным перетеканиям масс пойменного потока в русловую часть. При данном массообмене пришедших масс пойменного потока с основным русловым потоком происходит потеря части количества движения русловым потоком на преодоление сопротивления и на сообщение вступившим массам дополнительной продольной скорости [2]. При первом типе взаимодействия потоков происходит уменьшение средней скорости потока главного русла и поймы (рис. 1, кривая 5 и 6), тем большее, чем больше угол вектора скорости.

б. При втором типе взаимодействия углы векторов скоростей в зоне взаимодействия равны нулю. Продольный уклон водной поверхности руслового потока всегда равен продольному уклону водной поверхности пойменного потока. Косоструйность не наблюдается и, следовательно, перепада уровней ΔH между русловым и пойменным потоками не обнаружено. При данном типе взаимодействия потоков ясно выражена работа вихревых структур [4] — мезовихрей. Уменьшение или увеличение средних скоростей русло-

пойменного потока не наблюдается (рис. 1, кривая 4). При расчете расходов воды при втором типе взаимодействия потоков эффект взаимодействия потоков можно не учитывать.

в. При третьем типе взаимодействия потоков векторы скоростей направлены в сторону поймы. Продольные уклоны водной поверхности руслового потока всегда выше продольных уклонов водной поверхности пойменного потока, что приводит к поперечным перетеканиям масс руслового потока на пойму. При массообмене пришедших масс руслового потока с основными массами пойменного потока часть количества движения руслового потока передается пойменному потоку. При данном типе взаимодействия потоков происходит дополнительное ускорение масс пойменного потока, приводящее к увеличению средних скоростей руслопойменного потока (рис. 1, кривая 7).

2. Поперечные перетекания масс жидкости обусловлены поперечным уклоном

$$i_{\text{п}} = \frac{\Delta H}{B'}$$

где ΔH — перепад уровней воды в створе руслопойменного потока; B' — ширина, на которой наблюдаются поперечные перетекания масс жидкости.

При поперечном перетекании масс жидкости возникает косо-струйность, что позволяет измерять углы векторов скоростей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Скородумов Д. Е. Вопросы гидравлики пойменных русел в связи с задачами построения и экстраполяции кривых расходов воды. Труды ГГИ, вып. 128, Л., 1965.
2. Гончаров В. Н. Динамика русловых потоков. Гидрометеониздат, Л., 1962.
3. Барышников Н. Б., Розанов В. А. Уменьшение пропускной способности русел с неоднородной шероховатостью по ширине. Труды ЛГМИ, вып. 33, Л., 1969.
4. Спицын И. П. О взаимодействии потоков основного русла с поймой. Метеорология и гидрология, № 10, 1962.
5. Агасеева С. И. и Барекян А. Ш. Изменение средних скоростей главного русла и коэффициента Шези при прохождении паводка. Метеорология и гидрология, № 9, 1961.
6. Железняков Г. В. Теоретические основы гидрометрии. Гидрометеониздат, Л., 1968.
7. Delleur I. W., Toebes G. H., Udeozo B. C. Uniform flow in idealized channel-flood plain geometries. Proceed. of XII Congress of the International Association for Hydraulic Research, vol. 1, USA, 1967.
8. Sellin R. H. I. A laboratory investigation into the interaction between the flow in the channel of a River and that over its Flood Plain. La Houille Blanche Revue International de L'eau. Numiro 7, 1964.
9. Hegly M. Note sur l'écoulement de l'eau dans un canal a profil complexe. Paris, 1936.
10. Гордилов А. В., Россоманин М. В. Поперечные уклоны водной поверхности затопленной поймы (на примере р. Иртыш). Труды ГГИ, вып. 88, Л., 1961.

11. Спицын И. П. Взаимодействие потоков русла и поймы при условии параллельности их осей. Автореферат диссертации. ЛГМИ, 1963.
 12. Маккавеев Н. И. Русло реки и эрозия в ее бассейне. Изд. АН СССР, М., 1955.
 13. Таунсенд А. Структура турбулентного потока с поперечным сдвигом. Пер. с англ. Г. И. Баренблатта, ИЛ, М., 1959.
 14. Великанов М. А. Динамика русловых потоков. Гостехиздат, М., 1954—1955.
-

Н. Б. Барышников, Г. В. Иванов

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ РУСЛОВОГО И ПОЙМЕННОГО ПОТОКОВ ПРИ ПЕРЕСЕЧЕНИИ ИХ ОСЕЙ¹

Вопросы расчета паводочного стока, имеющие огромное практическое значение, в последние годы стали предметом широких обсуждений. Это обусловлено открытием Г. В. Железняковым [9] «кинематического эффекта». Значительные разработки в этом направлении выполнены в Советском Союзе [1, 4, 5, 17] и за рубежом [20, 21]. В большинстве работ [3, 10, 16] отражены результаты изучения кинематического эффекта, возникающего при параллельности осей руслового и пойменного потоков. В то же время, начиная с 1962 г., опубликован ряд исследований [8, 14, 15 и др.], посвященных изучению проблемы взаимодействия потоков при пересечении их осей. Как в Советском Союзе [1, 6, 9, 17], так и за рубежом [20, 21, 22] для изучения вопроса широко применялось лабораторное моделирование. В 1965 г. Д. Е. Скородумовым [14] впервые опубликованы данные анализа обширных полевых изысканий, выполненных ГГИ на семи реках Советского Союза. Несколько позднее в 1969—1970 гг. были выполнены специальные полевые исследования процессов взаимодействия руслового и пойменного потоков при пересечении их осей под углом 135° на р. Сож [11].

Несмотря на значительное количество опубликованных работ, многие аспекты проблемы изучены недостаточно и требуют дальнейшего экспериментального и теоретического анализа.

Именно поэтому в 1970—1971 гг. в Ленинградском гидрометеорологическом институте и были поставлены эксперименты по изучению отдельных аспектов указанной проблемы. На гидравлическом лотке размерами $12 \times 2,5$ м была смонтирована модель руслового потока с поймой при пересечении их осей под углом 45° . Параметры рабочей части модели, а также расположение створов измерений и скоростных вертикалей, приведены на рис. 1.

Особенностью методики экспериментов, отличающей ее от ранее выполненных работ [1, 9, 15], явилось изучение характеристик потоков русла и поймы как при их изоляции, так и при взаимодействии. Данная методика разработана еще в 1960 г.

¹ Эксперименты и первичная обработка материалов выполнены инженерами А. К. Коноваловым и А. Н. Купцовым.

В. Н. Гончаровым и успешно применялась на кафедре динамики русловых потоков Ленинградского гидрометеорологического института его учениками для изучения процесса взаимодействия руслового и пойменного потоков при параллельности их осей [4, 16]. При пересечении осей потоков методика применена впервые, в связи с этим необходимо кратко осветить некоторые ее особенности.

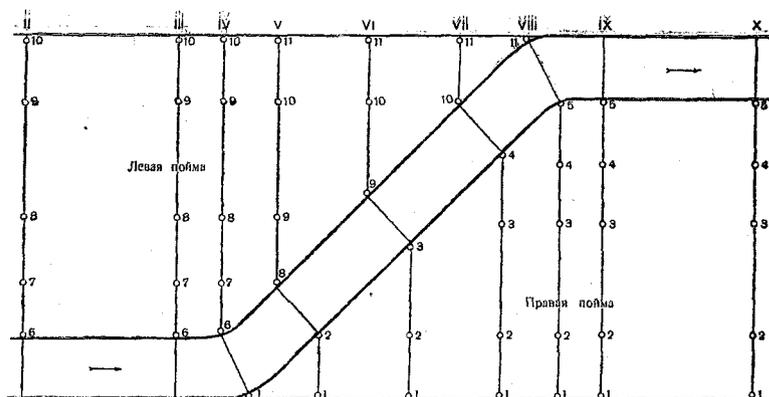


Рис. 1. План расположения створов измерений и скоростных вертикалей.
Глубина русла модели 5 см, ширина — 40 см.
II—X номера створов; 1—11 — номера скоростных вертикалей

Для изучения гидравлических характеристик русла оно изолировалось от поймы стеклянными стенками. Несколько сложнее изучить соответствующие характеристики поймы в условиях ее изоляции (при пересечении ее руслом). Для получения характеристик изолированной поймы русло было засыпано песком, сверху забетонировано и на бетон нанесена шероховатость, выполненная из галечника крупностью 1,8 см, аналогичная остальной шероховатости. После изучения гидравлических характеристик изолированной поймы, первоначальная модель была восстановлена. При этом русло во всех экспериментах было выполнено из железного бетона (гладкое), а пойма из гальки с высотой выступов 1,8 см. Продольный уклон модели 2,4‰.

В начале и конце установки были устроены специальные щиты, позволявшие регулировать подачу воды на установку и уклон свободной поверхности на ней.

Измерения скоростей потока, глубин и уровней выполнялись на 9 створах, на каждом из которых располагалось по 10 скоростных вертикалей. Измерение скоростей осуществлялось трубкой Пито-Дарси, а уровней и глубин — игольчатой рейкой. Контроль за измерениями расходов воды выполнялся по двум треугольным водосливам. Первый позволял определять суммарный расход воды

на установке и расход ее пойменной части, второй — расход только русловой составляющей (при взаимодействии руслового и пойменного потоков).

Наибольший расход воды на установке был равен 120 л/сек, а наибольшие глубины в русле — 15,0 см.

Первичная обработка материалов заключалась в вычислении скоростей и расходов воды по створам измерений, оценке их точности путем сравнения данных, полученных гидрометрическим способом с данными по водосливу. Отклонения измеренных величин от контрольных по водосливу во всех экспериментах не превышали 5%, что позволяет считать их достаточно надежными.

Анализ экспериментальных данных выполнялся отдельно для руслового и пойменного отсеков.

В условиях изоляции под влиянием изгиба потока происходит перераспределение уклонов свободной поверхности по длине, что приводит к изменению пропускной способности русла по длине потока. Действительно, на II и X створах расходы воды проходят при меньших глубинах, чем на створах изгиба (IV—VIII) (рис. 2).

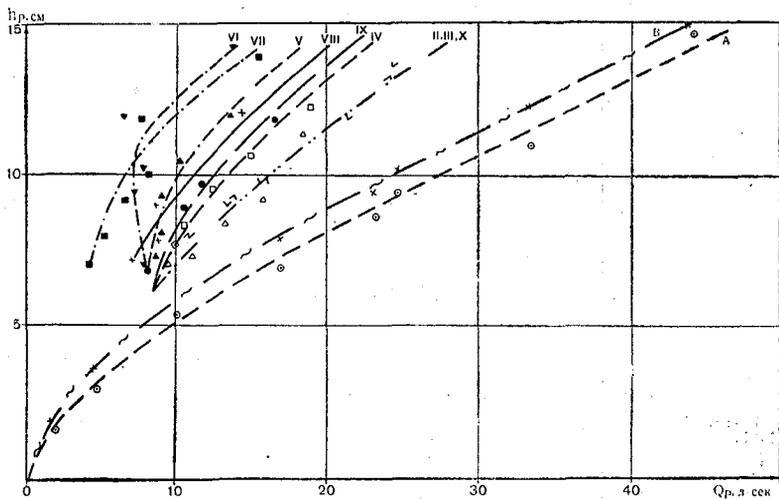


Рис. 2. Кривые расходов воды для русловой части потока в условиях его взаимодействия и изоляции:

Изолированное русло: А — II, III, IX, X — створы; В — IV — VIII створы; II — X — кривые расходов для руслового потока, взаимодействующего с пойменным, цифра у кривой $Q_p = f(H)$ соответствует номеру створа.

Это, по-видимому, можно объяснить некоторым увеличением сопротивлений при преодолении потоком изгиба. Не останавливаясь на анализе причин этого явления, ибо он выполнен в ряде работ [2, 12, 13], необходимо рассмотреть вопросы перераспределения расходов воды между русловым и пойменным потоками при их взаимодействии. На рис. 2 изображены кривые расходов воды, полученные по данным измерений в различных створах. Кривые рас-

ходов для русловой части потока, полученные для условий взаимодействия потоков, располагаются значительно левее соответствующих кривых для изолированного русла, что можно объяснить влиянием следующих факторов: перераспределением расходов воды между руслом и поймой, их уменьшением за счет возрастания сопротивлений при взаимодействии потоков, т. е. влиянием кинематического эффекта, и уменьшением продольных уклонов поверхности воды главного русла. Для II, III и X створов это уменьшение по сравнению с изолированным руслом, хотя и достигает 40%, но значительно меньше, чем для створов, расположенных непосредственно в месте пересечения динамических осей потоков (IV—VIII). Особенно велико уменьшение пропускной способности русла за счет взаимодействия, достигающее 82,6% на VI створе, расположенном примерно в середине установки (рис. 1).

Столь значительное уменьшение происходит из-за образования в русловой части потока водоворотной зоны, которая наблюдалась визуально в ходе выполнения экспериментов инженерами Коноваловым и Купцовым и фиксировалась при помощи марганцовокислого калия ($KMnO_4$) и мельчайших наносов. При движении последних в русле на участке пересечения потоков у левого берега образовалась отмель, которая располагается по всей ширине русла в створе VI и уменьшается по направлению к IV и VIII створам (рис. 3).

Поле скоростей изолированного руслового потока отличается теми же характерными особенностями, которые отмечены в ряде работ [2, 12], описывающих поток, преодолевающий сложный изгиб. Действительно, на IV и VIII створах отмечается смещение максимальных скоростей к выпуклому берегу и по преодолению потока изгиба перемещение к противоположному берегу. В то же время при воздействии пойменного потока скоростное поле существенно деформируется. Происходит значительное уменьшение абсолютных значений скоростей во всех створах. Особенно оно велико в створе VI, где скорости снижаются в несколько раз по сравнению с изолированным потоком (табл. 1).

Таблица 1*

h_p , см	Средние скорости в створах русла, см/сек										Примечание
	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X		
11,68	69,8	69,8	67,8	68,6	69,8	76,0	72,7	72,0	76,0	Изолированный	
11,98	45,6	43,5	38,5	27,7	13,3	15,9	29,7	34,5	40,2	Взаимодействует с пойменным потоком	
9,20	64,5	61,1	59,2	61,1	61,1	63,8	66,7	63,8	68,2	Изолированный	
9,17	37,1	37,4	31,9	25,6	18,9	23,1	24,0	28,8	29,2	Взаимодействует с пойменным потоком	

* Отличие значений средних скоростей в различных створах изолированного русла объясняется неравномерностью изменения средних глубин по длине руслового потока.

Распределение средних на вертикалях скоростей по ширине руслового потока также несколько изменяется под воздействием пойменного. При достаточно больших наполнениях поймы левый берег русла как бы выполняет роль водослива, что приводит к образованию вихревой зоны у левого берега (рис. 3) и смещению максимальных скоростей от выпуклого берега (створ IV) в центр потока. Вместе с этим происходит и дальнейшее переформирование скоростного поля потока. Динамическая ось потока смещается к правому берегу русла, а структура потока у левого берега крайне сложная. По предварительным данным можно отметить, что происходит дальнейшая интенсификация вторичных течений.

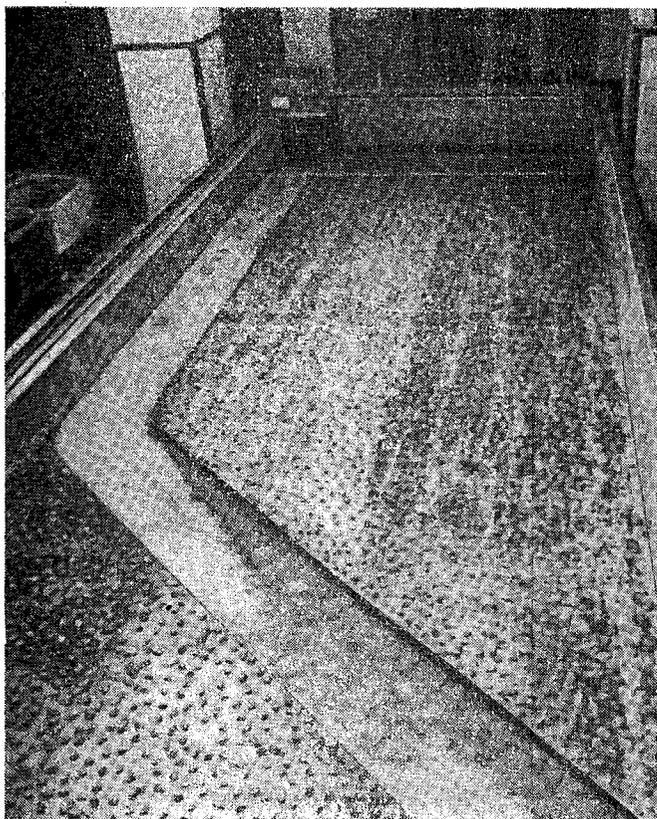


Рис. 3. Водоворотная зона в русловой части потока

Поперечные течения в русловом отсеке потока можно считать причиной повышения уровня на пойме выше пересечения ее руслом и снижения его ниже по течению, т. е. русловой поток в дан-

ном случае как бы выполняет роль дополнительного препятствия для потока поймы. Этот факт отмечен в работе [22] и позволил ее автору выдвинуть гипотезу о возможности замены сужений долины по длине реки при ее моделировании мерными устройствами. Полученные данные в относительных величинах были нанесены на график $\frac{v_p}{v_{p,6}} = f\left(\frac{h_p}{h_{p,6}}, \alpha\right)$ [19]. На рис. 4 данные для угла пересечения осей потоков, равного 45° , находятся в полном соответствии с ранее полученными и дополняют их.

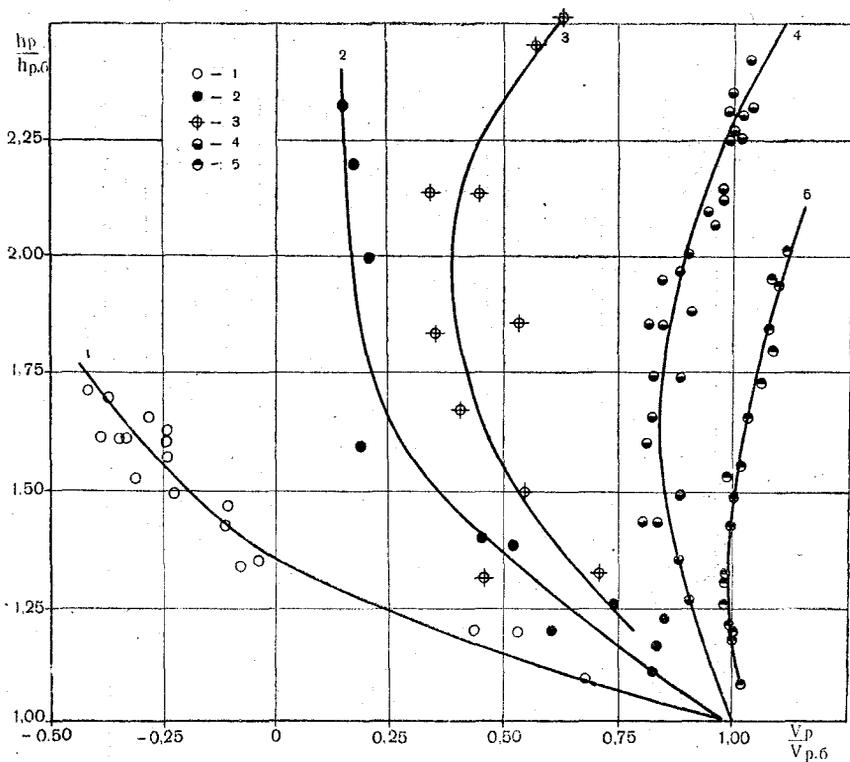


Рис. 4. Кривые зависимости $\frac{v_p}{v_{p,6}} = f\left(\frac{h_p}{h_{p,6}}\right)$:

1 — р. Сож у Славгорода, $\alpha = 135^\circ$; 2 — р. Луга у Толмачева, $\alpha = 90^\circ$; 3 — экспериментальные данные при $\alpha = 45^\circ$; 4—5 — экспериментальные данные при $\frac{n_p}{n_p} = 2,07$ и $1,67$; $\alpha = 0^\circ$ (1, 2, 4, 5 — данные заимствованные из работы Ю. Н. Соколова [19]).

Перейдем к рассмотрению потока поймы. Причины, вызывающие изменения гидравлических характеристик взаимодействующего пойменного потока, как и сами характеристики, существенно

изменяются по его длине. В верхней части потока поймы наблюдается небольшое увеличение как скоростей, так и расходов воды, в пределе достигающее 20—30%, по сравнению с изолированной поймой. Это явление объясняется воздействием руслового потока, имеющего значительно большую, чем у пойменного, энергию и передающего часть своей энергии потоку поймы. В данном случае происходит процесс аналогичный процессу взаимодействия руслового и пойменного потоков при параллельности их осей, достаточно широко освещенный в литературе.

Несколько сложнее происходят процессы на участке поймы между IV и VIII створами, т. е. на участке пересечения руслового и пойменного потоков. Ввиду того, что ширина поймы изменяется по длине потока, все расчеты приводились к единице ширины пойменного потока (для возможности сравнения). При этом характер изменения гидравлических характеристик на левой пойме существенно отличен от его изменения на правой. Ибо в первом случае русловой поток как бы выполняет роль подпорной стенки, а во втором — массы жидкости руслового потока, обладающие значительной энергией, переливаются на правую пойму и тем самым резко увеличивают местные скорости и энергию пойменного потока. Это приводит к росту пропускной способности правой поймы, в пределе достигающему 50% и более.

На ниже расположенном участке (IX—X створы) расходы воды, до глубин на пойме, равных 4 см, существенно возрастают (по сравнению с изолированной поймой и достигают соответственна 140 (IX створ) и 156% (X створ), а затем постепенно падают. Это объясняется соотношением энергетических запасов руслового и пойменного потоков. Действительно, при малых наполнениях поймы (до 4 см) энергия руслового потока, а следовательно, и скорости течения, которые являются отражением кинетической энергии потока ($E = \frac{mv^2}{2}$), значительно больше, чем у пойменного.

По-видимому, при глубинах близких к 4 см эта разница несколько нивелируется, и массы руслового потока, перетекающие на пойму, хотя и увеличивают скорости течения на ней и ее энергию, но их относительная величина становится менее значимой. В. Н. Гончаров [8] определял это положение как «ведущий русловой или пойменный потоки». Употребляя его терминологию, следует отметить, что до глубин на пойме около 5 см ведущим является русловой, а затем его роль переходит к пойменному потоку.

Характер распределения средних на вертикалях скоростей по пойме, взаимодействующей с руслом, для глубины ее наполнения, примерно равной 7 см, приведен на рис. 5. Из рисунка видно, что при пересечении поймы руслом происходит как бы скачок абсолютных значений скоростей. Последние увеличиваются от 20—30 см/сек (на участке выше пересечения) до 40—50 см/сек (на участке ниже его).

Большое влияние на абсолютные значения скоростей, их распределение по пойме и направление оказывает водоворотная зона, образующаяся у левого берега руслового потока в месте его пересечения с пойменным. Эта зона, с одной стороны, как бы регулирует перелив масс жидкости из русла на нижерасположенную пойму, с другой стороны, обуславливает величину подпора и тем самым также оказывает существенное влияние на скоростное поле вышерасположенного пойменного потока.

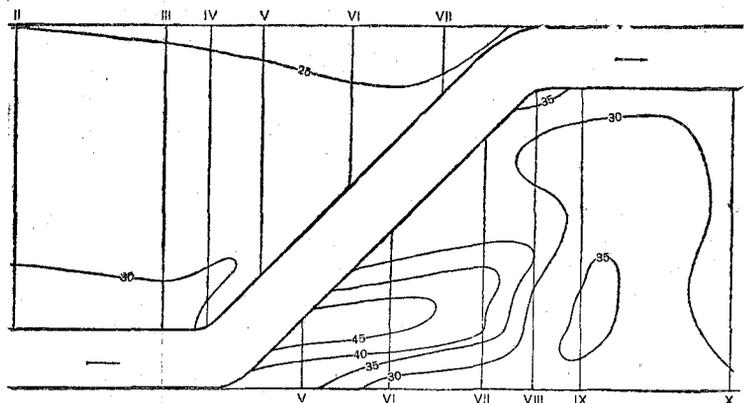


Рис. 5. План установки с изотохами (пойменный поток при взаимодействии его с русловым при глубине поймы 7 см)

В заключение следует отметить, что случай взаимодействия руслового и пойменного потоков при пересечении их осей является весьма сложной трехмерной задачей, физическая структура которой пока еще вскрыта недостаточно. Поэтому при создании математических моделей необходимо учитывать возникающую в русловом потоке водоворотную зону, являющуюся как бы естественным регулятором перераспределения масс жидкости между руслом и поймой.

Данное экспериментальное исследование подтвердило закономерности, полученные в работе [19] и несколько дополнило их, в частности при построении графика $\frac{\bar{v}_p}{v_{p,6}} = f\left(\frac{h_p}{h_{p,6}}, \alpha\right)$ для значений $\alpha = 45^\circ$.

ЛИТЕРАТУРА

1. Агаснева С. И., Барекян А. Ш. Изменение средних скоростей главного русла и коэффициента Шези при прохождении паводка. Метеорология и гидрология, № 9, 1961.
2. Барышников Н. Б., Иванов Г. В. Поведение потока на сложном изгибе. Труды ЛГМИ, вып. 13, 1962.

3. Барышников, Н. Б. Об учете взаимодействия руслового и пойменного потоков при построении и экстраполяции кривых расходов воды. Труды ЛГМИ, вып. 25, 1967.
4. Барышников Н. Б., Саликов В. Г. Энергетические затраты при взаимодействии отсеков потока с различной шероховатостью. Метеорология и гидрология, № 9, 1968.
5. Барышников Н. Б. К определению максимальных расходов воды на реках с поймой. Труды ЛГМИ, вып. 36, 1969.
6. Барышников Н. Б., Розанов В. А. Уменьшение пропускной способности русел с неоднородной шероховатостью по ширине. Труды ЛГМИ, вып. 36, 1969.
7. Бутаков А. Н. Исследование потока на пойме и в русле. Труды ЛИВТ, вып. 124, 1969.
8. Гончаров В. Н. Динамика русловых потоков. Гидрометеонздат, Л., 1962.
9. Железняков Г. В. Гидравлическое обоснование методов речной гидравлики. Изд-во АН СССР, М., 1950.
10. Железняков Г. В. Теоретические основы гидрометрии. Гидрометеонздат, Л., 1968.
11. Карасев И. Ф. Влияние поймы на пропускную способность русла. Труды ГГИ, вып. 172, 1969.
12. Козлова Т. И. Распределение продольных скоростей на изгибе. Труды ЛГМИ, вып. 25, 1967.
13. Розовский И. Л. Движение воды на повороте русла. Изд-во АН УССР, Киев, 1957.
14. Скородумов Д. Е. Вопросы гидравлики пойменных русел в связи с задачами построения и экстраполяции кривых расходов воды. Труды ГГИ, вып. 128, 1965.
15. Соколов Ю. Н. Лабораторное исследование пропускной способности русла при пересечении под прямым углом пойменного и руслового потоков. Сб. «Вопросы водохозяйственного строительства». Минск, 1939.
16. Спицын И. П. О механизме взаимодействия потоков основного русла и поймы. Труды ЛГМИ, вып. 26, 1964.
17. Спицын И. П. О взаимодействии потоков основного русла и поймы. Метеорология и гидрология, № 10, 1968.
18. Хиллов Ю. Д. К вопросу исследования пойменного русла извилистого потока. Труды Сибирского технологического ин-та, сб. 41, 1967.
19. Barishnikov N. B., Ivanov G. V., Sokolov Yu. N. Role of Flood Plain in Flood Discharge of a River Channel Proceed. XIV Congress of the IAHR, vol. 5, Paris, 1971.
20. Seillin R.H.I.A. Laboratory Investigation into the Interaction between the Flow in the Channel of a River and That over its Flood Plain. La Houille Blanche Revue Internationale de L'eau, № 7, 1964.
21. Toebees G. H., Sooky A. A. Hydraulics of Meandering Rivers Flood Plains. J. of the Waterways and Harbors Civil. Eng. 93, № 2, 1967.
22. Thirriot C. Simulation des zones d'inondation dans l'étude sur modèle réduit de propagation des crues. Proceed. XIV Congress of IAHR, vol. 5, Paris, 1971.

А. А. Левашов, С. В. Шмидт

К ВОПРОСУ О ДЕФОРМАЦИЯХ РУСЛА И ПОИМЫ РЕКИ НАДЫМ

Задачей работы является изучение русловых деформаций в условиях мерзлотной зоны, а также разработка рекомендаций по применению расчетных методов в указанных выше условиях.



Рис. 1. Измерение скорости движения гряд

Для ее решения летом 1969 г. были проведены специальные наблюдения за режимом перемещения наносов и русловыми деформациями на двух участках р. Надым. Перемещение наносов на этих участках происходило в основном в донногрядной фазе. Измерение параметров гряд осуществлялось следующим образом: геометрические характеристики определялись по данным ушаченных промеров, а измерение скорости — посредством фиксации положения гребней гряд в различные моменты времени (рис. 1).

Скорость движения гряды принималась равномерной и определялась по формуле $W = \frac{L}{T}$, где L — расстояние между положениями гребней гряд за время T . Результаты измерений приведены в табл. 1.

Таблица 1

Дата измерений	Продолжительность между измерениями в сутках	Путь перемещения гребня гряды, м	$W = \frac{L}{T}$, м/сутки	Высота гряд, м	Длина гряд, м	Глубина воды над гребнем, м	Уклон свободной поверхности, ‰	Примечание
14/VII—17/VII	3	0,50	0,17	0,20	12,0	0,35	0,13	114 км от устья, главное русло (у берега)
"	3	0,55	0,18	0,30	12,0	0,45	0,13	
"	3	0,50	0,17	0,30	12,0	0,35	0,13	
17/VII—25/VII	8	0,90	0,11	0,15	12,0	0,32	0,13	Протока
"	8	0,85	0,11	0,15	12,0	0,30	0,13	
13/VII—25/VII	12	23,0	1,90	1,70	15,0	0,60	0,13	80 км от устья, главное русло (у берега)
2/VIII—7/VIII	5	0,50	0,10	0,16	12,0	0,30	0,09	
31/VII—7/VIII	7	0,90	0,13	0,16	12,0	0,30	0,09	
2/VIII—7/VIII	5	0,55	0,11	0,16	12,0	0,30	0,09	
2/VIII—8/VIII	6	2,40	0,42	0,40	20,0	1,00	0,09	

Как видно из табл. 1, скорости движения гряд в главном русле в межень изменяются от 0,11 до 0,42 м/сутки, а в протоке значительно больше и достигают 1,9 м/сутки. Такие значительные колебания скоростей движения гряд можно объяснить резким изменением уклонов водной поверхности, скоростей течения и глубин в основном русле и протоках. Высота гряд в этот же период изменяется от 0,15 до 1,70 м. Превышение отметок переката над отметкой нижележащих плесов составляет 3,5 м.

На одном из участков были выполнены измерения расходов наносов батометром «Дон» при одновременном измерении параметров гряд. Расход наносов, определенный по параметрам гряд, составил 0,82 кг/сек, а измеренный батометром «Дон» — 1,03 кг/сек. Довольно близкие результаты подтверждают возможность измерения расходов наносов по характеристикам гряд, что является существенным при изучении руслового режима рек отдаленных районов Севера, на которых прозрачность воды достаточно высока.

Используя данные полевых измерений скоростей, высот и длин гряд при различных глубинах, а также хронологические графики

колебания уровня воды, можно подсчитать пути перемещения гряд за отдельные периоды года, что существенно для характеристики русловых деформаций.

Этот ориентировочный расчет для рек, протекающих в отдаленных районах Севера, в связи с интенсивным им освоением в последние годы, необходим для выяснения скоростей русловых деформаций, ибо стационарные наблюдения фактически отсутствуют.

Анализ хронологических графиков уровней по ст. Надым — р. Надым и данных наблюдений в период работы экспедиции позволяет сделать вывод о том, что поверхность побочней в паводок покрыта слоем воды толщиной около 1 м в течение 24 дней. В то же время по побочню перемещаются песчаные гряды со скоростью близкой к измеренной (табл. 1) $W = 0,42$ м/сут. Если принять указанную скорость как минимальную, ибо глубины на побочне и скорости воды в паводок значительно больше, чем в межень, то гряды за паводок перемещаются не менее, чем на 10 м. Гребни гряд в русловой части потока покрыты таким же или большим слоем воды в течение всего года. В этих условиях перемещение гребней гряд должно произойти не менее чем на 150 м/год.

На отдельных участках скорости движения гряд могут достигать 1,9 м/сут. Такие значительные скорости перемещения гряд свидетельствуют об отсутствии стабилизации русловых процессов, особенно в периоды паводков, прорыва заторов и ледохода.

Для межених и паводочных уровней целесообразно установить, в какой фазе происходит режим перемещения наносов. Для этой цели могут быть использованы критерии, разработанные В. Н. Гончаровым [1].

$$V' = 2,5 V_n \left(\frac{K_5}{H} \right)^{1/2};$$

$$V''' = 2,5 V_n \left(\frac{H}{K_5} \right)^{1/2},$$

где V' и V''' — критические скорости потока, при которых (соответственно) возникают и исчезают гряды; H — глубина потока; V_n — несдвигающая скорость.

Значения критических скоростей V' и V''' , полученные по формулам Гончарова на основе данных полевых наблюдений, составляют соответственно для межени 0,20 и 0,85 м/сек и для паводка 0,29 и 1,70 м/сек.

Средние скорости потока на этом участке по данным экспедиции и данным гидрологического поста ст. Надым достигают 0,80 м/сек в межень и 1,25 м/сек в паводок на плесовых участках и 1,5 м/сек и более на перекатах. Отсюда можно сделать вывод, что на р. Надым в течение года имеют место оба режима перемещения наносов. Данные наблюдений подтверждают этот вывод. Так, на р. Надым наблюдаются как донные гряды,

присушие межени, так и остаточные от паводка. Поэтому формула Гончарова, хотя и полученная по лабораторным данным, позволяет определить наличие различных режимов перемещения наносов в реках, близких по режиму р. Надыму.

В весеннее половодье высоты и скорости движения гряд значительно больше, чем в межень. Так по формуле Ю. М. Корчохи [3]

$$\Delta = 50 \cdot H \left(\frac{V}{W} \right)^{-0,165} \cdot e^{0,022 \frac{V}{W}}$$

высота гряд Δ на р. Надым в паводок ($H = 9,6$ м) может достигать 2,86 м, что близко совпадает с натурными данными. Величина вертикальной деформации, определенная нами по поперечным и продольным профилям русла Надым на расчетном участке достигает 3,5 м.

Наряду с рассмотренными деформациями русла, обусловленными воздействием потока, на северных реках весьма значительное, а часто и определяющее влияние на русловые и пойменные деформации оказывает лед.

Заторы, весьма интенсивные на р. Надым и формирующиеся при низких уровнях, способствуют преобразованию межениго русла, а при высоких, вызывают деформацию поймы. Поэтому особо существенное значение имеет правильный учет воздействия льда на русловые деформации на реках, протекающих в районах с суровым климатом особенно с юга на север, где ежегодно в период интенсивных ледоходов, наблюдается образование заторов.

Период ледостава на таких реках длится от 6,5 до 7,5 месяцев, т. е. больше половины года.

Толщины льда к маю достигают максимальных значений — 1,20 м, а затем постепенно уменьшаются и в период ледохода составляют 0,6—0,8 м. Вскрытие реки сопровождается одной — двумя, а иногда и тремя подвижками с последующим густым ледоходом, продолжающимся от 3 до 5 дней. Продолжительность заторов, имеющих место при вскрытии реки по данным станции Надым, достигает 5 дней (табл. 2).

Таблица 2

Год	1946	1951	1954	1964
Дни месяца	21—28/V	19/V	20—24/V	24—27/V
Продолжительность затора в днях	5	1	2	4

При заторах, образующихся, как правило, в расширяющихся частях у островов и больших осередков, лед может выходить на прибрежную пойму, что вызывает деформации не только берегов по всей их высоте, но и деформации поймы и островов. Деформации выражены довольно четко. Их косвенной характеристикой может служить большое количество деревьев, обрушенных в русло при разрушении берегов.

Отметки максимальных горизонтов воды, определенные по меткам, оставленным льдом на деревьях, свидетельствуют о частом выносе льда на пойму. Это подтверждается также годовыми кольцами наплывов на краях сухобоких деревьев. Число колец в наплывах колеблется от 1 до 20. По-видимому, более поздние повреждения сохранились плохо.

Уклоны свободной поверхности при высоких ледоходных горизонтах, определенные по многочисленным меткам, примерно равны 0,21 ‰ и 0,18 ‰, соответственно для участков, расположенных на 114 и 80 км от устья реки Надым.

При заторах возникают поперечные течения из русла на пойму. Подобный поперечный уклон водной поверхности, вызванный затором льда, был отмечен наблюдателем в районе поста Надым. Помимо этого, в период экспедиции были зафиксированы следы поперечных течений (метки, мусор на деревьях). Поперечные уклоны на обследованных участках достигали 6—7‰ и превосходили соответствующие продольные уклоны паводочного периода в 30—35 раз. Наличием таких поперечных течений можно объяснить расчленение многих островов, расположенных в русле реки, а также образование новых протоков, которыми изобилует р. Надым и отчленение частей поймы, т. е. образование новых островов. Перемещение русловых песков при заторах может происходить также поперек русла, о чем косвенно свидетельствует направление отдельных обсохших высоких гребней гряд, расположенных преимущественно перед островами. Наблюдались случаи, когда лед, образовавшийся с осени на побочнях, осередках и примерзший к ним, поднимался водой на несколько дней позднее, чем лед над непромерзшей частью русла (отмечено наблюдателем в 1969 г.). При таком положении возможен занос части примерзшего льда надвигающимися гребнями гряд, т. е. его захоронение. Это подтверждается состоянием поверхности ухвостья побочня, где имеют место провалы песков, ямы и трещины (рис. 2). Ухвостье побочня частично растет вниз по течению за счет перемещающихся по побочню и сходящих с него в затонскую часть гряд. Кроме того, как справедливо считает Б. П. Панов [5], возможен занос отдельных льдин в затонскую часть побочня, так как здесь наблюдаются обратные уклоны поверхности воды. Оставшиеся при падении уровня льдины самозахороняются в свежих рыхлых песчаных отложениях. Такое же явление самозахоронения льдин непосредственно наблюдал Е. М. Катасонов [2] в морских отложениях недалеко от мыса Буорхая, где небольшая застрявшая около берега

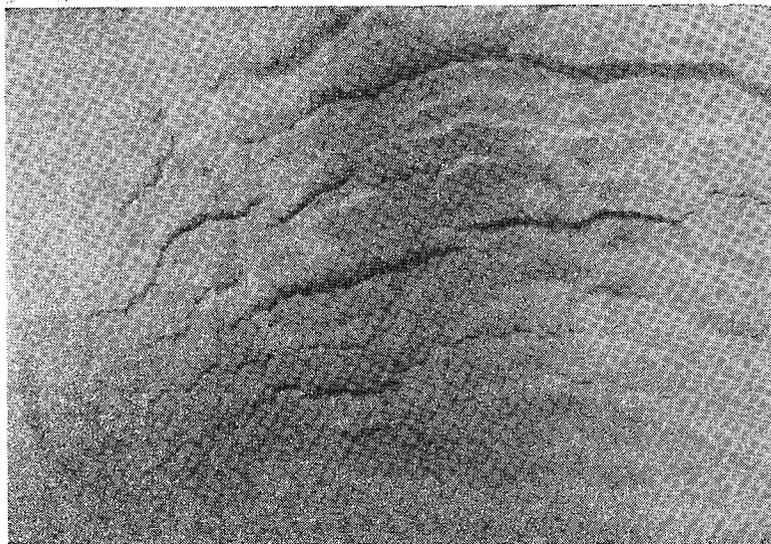


Рис. 2. Трещины и провальные ямы на побочне р. Надым (от таяния захороненного льда)

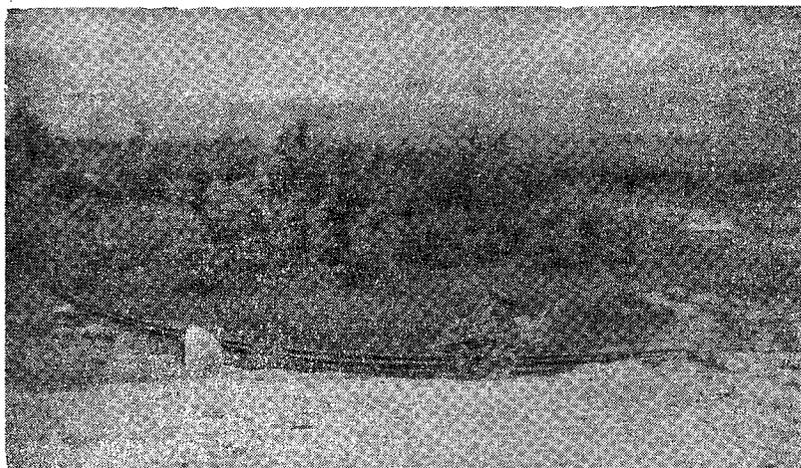


Рис. 3. Деформированные льдом рельсы.

ледяная глыба за какие-нибудь двое суток погрузилась в отложение. Причем слой грунта над ней составлял 10 см. По-видимому, на р. Надым имеют место оба случая: захоронение (занос песком примерзшего к побочню со стороны затонной части льда) и самозахоронение отдельных льдин, что подтверждается косвенными признаками, а именно: имеются отдельные воронки в песках побочней от растаявших захороненных льдин, сплошные системы льдин, сплошные системы трещин (рис. 2) и опускание песков, которое приурочено как раз к ухвостью побочня и распространяется на величину возможного прироста его ухвостью. Система трещин как бы обрисовывает конечные бывшие очертания нижней части побочня (или бывшего уреза затонской части).

Разрушающее воздействие льда на сооружения, расположенные на прибрежной пойме, подтверждается деформацией полотна железной дороги, строительство которой на участке было закончено в 1952—1953 гг. Полотно, проходящее по прибрежной пойме, вообще размыто, а рельсы согнуты ледоходом и смещены от первоначального положения приблизительно на 25 м (рис. 3). В некоторых местах полотно пересекли глубокие протоки и погнутые льдом рельсы висят над ними.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гоицаров В. Н. Динамика русловых потоков. Гидрометеонздат, Л., 1962.
2. Катасонов Е. М. Льды в морских отложениях. Природа, № 6, М., 1967.
3. Корчоха Ю. М. Некоторые результаты исследований песчаных гряд в натуральных условиях. Автореферат диссертации, ГГИ, 1969.
4. Леващов А. А. Приближенное определение повторяемости высоких половодий на реках с отсутствием гидрологических наблюдений. Метеорология и гидрология, № 10, 1966.
5. Панов Б. П. Зимний режим рек СССР. Изд. ЛГУ, 1960.

Е. С. Субботина, С. В. Шмидт

НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ ДЕФОРМАЦИИ РЕЧНЫХ РУСЕЛ И ПОЙМ В УСЛОВИЯХ МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫХ ГРУНТОВ НА ПРИМЕРЕ РЕК ПОЛУИ И НАДЫМ

В современной научной литературе почти полностью отсутствуют сведения об особенностях деформаций речных русел и пойм в условиях многолетнемерзлых грунтов.

В то же время развивающееся усиленными темпами освоение природных богатств, открытых в зонах многолетнемерзлых пород, невозможно без использования почти неизученных северных рек как транспортных путей и источников водоснабжения. Кроме того, эти реки пересекаются линиями газо- и нефтепроводов. Следовательно, вопрос о деформациях русел таких рек приобретает важное практическое и научное значение.

Западно-Сибирская экспедиция кафедры Динамики русловых потоков в летние периоды 1968 и 1969 гг. произвела натурные исследования руслового процесса на ряде рек северной части Западно-Сибирской низменности, протекающих в зоне многолетнемерзлых пород, в том числе на Полуе и Надыме, пересекаемых трассой газопровода «Сияние севера» на участке Уренгой-Салехард.

Некоторые итоги исследований экспедиции приводятся в настоящей статье.

На реке Полуи были произведены рекогносцировочные обследования на протяжении 200 км, более подробно исследовался участок 74—178-го км от устья. На реке Надыме рекогносцировка производилась на 120-километровом участке, а участок от 70 до 118 км исследовался детально.

Благодаря плоскому рельефу, малому врезу речных долин и близкому залеганию к земной поверхности водоупорных пород, исследуемый район является районом с замедленным поверхностным стоком и слабым естественным дренажем грунтовых вод.

Реки, протекая по почти плоской равнине, имеют незначительное падение от 1,0 до 10 см на 1 км длины. Гидрографическая сеть этого района хорошо развита. Густота речной сети составляет 0,3—0,4 км на 1 км². Заболоченность районов достигает 70%.

Климат исследуемого района суровоконтинентальный. Так, среднегодовая температура в г. Салехарде — 6,7°. Глубина сезонного промерзания грунтов весьма значительна, например, в районе г. Салехарда достигает 2,7 м.

Протаивание начинается в конце мая или начале июня, наибольшая скорость протаивания наблюдается в июле, максимальной величины оно достигает в октябре.

В период работы экспедиции глубина протаивания на поймах р. Полуй составляла от 40 до 60% от максимальной величины протаивания.

Исследования последних лет показали, что на территории Тюменской области сплошной мерзлоты нет. Так, например, под большими озерами и реками Обь, Пур, Таз и другими многолетняя мерзлота отсутствует, а под менее крупными водоемами и водотоками ее верхняя поверхность залегает на глубине нескольких десятков метров.

Поймы большинства рек имеют мелкогребнистый рельеф и изобилуют протоками, сорами, озерами, старицами и болотами. Поверхностные горизонты сложены песками и лесовидными суглинками. Суглинистые отложения имеют слоистое строение. Песчаные аллювиальные и эоловые отложения широко развиты в долинах реки Надым и других крупных его притоков.

На поймах и берегах обследованных рек подземных (ископаемых) льдов не обнаружено.

Отсутствие многолетней мерзлоты под крупными реками и глубокое ее залегание под мелкими обусловило характер русловых процессов, аналогичный процессам на реках [3], текущих за пределами зоны многолетней мерзлоты. Так, на участке Уренгой-Салехард в период обследований, произведенных экспедицией, сезонно-промерзающие грунты, не успевшие полностью оттаять к моменту производства работ, встречались только на поймах рек.

На основании анализа данных натуральных наблюдений можно в первом приближении главные реки рассматриваемого участка отнести к двум группам:

а) реки Полуй, Танапча и другие, имеющие относительно медленно деформирующиеся в плане русла и довольно стабильные поймы, сложенные в значительной мере суглинками и даже глинами;

б) реки Надым, Пур и Ярудей, характеризующиеся интенсивностью русловых деформаций. Грунты русел и пойм этих рек состоят преимущественно из мелкозернистых песков.

Существенное влияние на характер русловых процессов рек группы «а» как в период весеннего ледохода, так и в свободный ото льда, оказывают мерзлые грунты на поймах. Например, на р. Полуй к моменту прохождения пика паводка глубина оттаявшего слоя на поймах составляет около 10% от максимально возможной. Так, в июле 1968 г. на поймах и островах р. Полуй наблюдались мерзлые, достаточно плотно сцементированные суглинки и глины (рис. 1), по-видимому, мало поддающиеся разрушению под влиянием потока, определяющие достаточную стабильность поймы и играющие струенаправляющую роль.

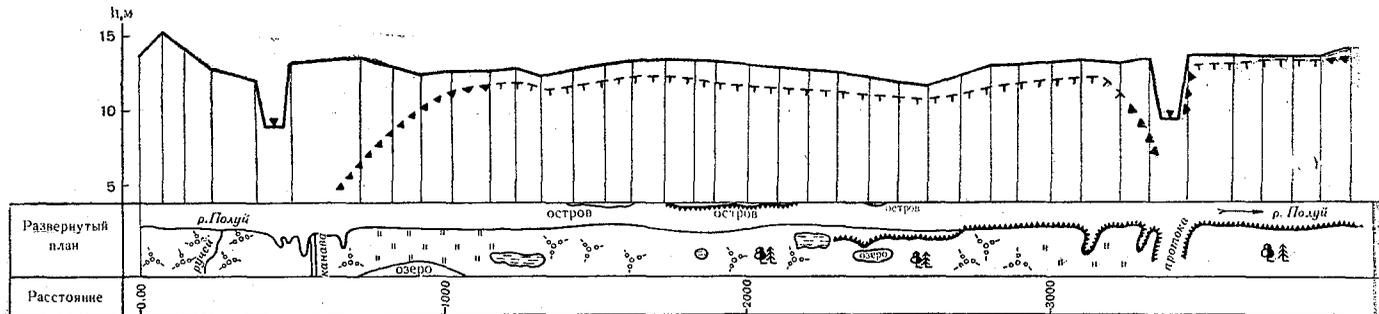


Рис. 1. Продольный профиль правого берега р. Полуй (170—174-й км) с нанесенной границей мерзлоты

Примером стабильности русла р. Полу́й может служить устойчивость вполне завершенной меандры на 163-м км, где долгие годы, во всяком случае более 30 лет существует перешеек шириной около 100 м. Таким же примером может служить участок 74-го км.

По типу руслового процесса р. Полу́й следует отнести к рекам свободной меандрирования, хотя на ней имеются отдельные участки с иными типами русловых процессов, так, например, островная многорукавность встречается на участках реки, расположенных на 314—312, 286—284, 208—207, 180—174-м км от устья.

На участке, примерно от 40 до 130-го км часть русла занята островами, заросшими луговой и кустарниковой растительностью. Эти острова образуются, очевидно, путем отчленения участков поймы вследствие образования протоков по понижениям, созданным в результате неравномерного вытаивания многолетнемерзлых грунтов. Берега на этом участке, в основном, низкие, сложенные супесчаными грунтами и мелкозернистыми песками.

Глубина залегания верхней поверхности мерзлых грунтов на поймах колеблется в довольно значительных пределах и зависит от ряда факторов: литологического состава грунтов, их криогенного строения, амплитуды температуры на поверхности земли, рельефа, экспозиции и крутизны склонов, мощности снежного покрова, характера растительности и т. п.

На береговых склонах р. Полу́й отмечены довольно многочисленные случаи солифлюкции, а на пойменных террасах и склоновых долины пучение грунтов и другие проявления, свойственные мерзлым грунтам, например, термокарстовые озера, обнаруженные на поймах и островах.

Рекам группы «б» — Надыму, Ярудею и другим, русла и поймы которых состоят в основном из хорошо промытых песчаных грунтов, характерны значительные внутрирусловые деформации и интенсивное морозное выветривание на поймах вблизи их русловых склонов, в результате которого береговые склоны могут за один сезон разрушаться на несколько метров в плане, значительно увеличивая твердый сток рек. В период половодья и летних паводков осередки, отмели и другие русловые образования перемещаются вниз по течению реки, изменяя свои размеры.

Мерзлые грунты на поймах и островах в районе обследования встречались редко и представляли собой отдельные сыпучемерзлые, несцементированные образования, легко поддающиеся разрушению потоком.

На приустьевом участке р. Надым, ниже 50-го км, мерзлотные процессы на поймах более значительны. Для пойм указанных рек весьма опасным является нарушение их растительного покрова. В этих случаях поверхность поймы немедленно подвергается интенсивной эрозии, местами принимающей форму движения небольших песчаных барханов.

По данным натурных наблюдений р. Надым можно отнести к осередковому типу руслового процесса и выделить два вида многорукавности:

1) русловые многорукавности осередковогго типа, где крупные формы представлены подвижными, преимущественно сползающими крутыми грядами, образующие осередки со слабо закрепленной поверхностью;

2) русловая многорукавность островного типа, характерная наличием островов.

Обследования (визуальные) проводились от устья до 118-го км. Этот участок на карте русловых деформаций, составленной С. И. Пиньковским [2], отнесен к русловой многорукавности, что подтвердилось и наблюдениями экспедиции. Образование многорукавного русла можно объяснить неравномерностью промерзания толщи грунтов на пойме, что ведет к появлению местных понижений ее поверхности, которые в последующем промываются потоками, возникающими на пойме в половодье. По-видимому, многорукавность обусловлена здесь не отторжением пойм, а вызывается осередковым типом руслового процесса. Границы русла в плане не имеют закономерной искривленности, характерной для меандрирующих рек; пойма островная со следами большого количества протоков. Основные деформации выражаются в образовании и сползании осередков. Таким образом, русло реки в плане незначительно извилистое умеренно разветвленное с часто встречающимися островами, осередками, косами, рукавами.

По данным полевых наблюдений плановые изменения русла р. Надым составляют 10 и более метров в год. Интенсивное перемещение песчаных гряд в паводочный период, высота которых местами достигает 3 м, со скоростью около 200 м/год, способно вызывать деформации русла до 3 м.

Следует отметить, что в низкую межень (22/VII 1969 г.) расход влекомых наносов у створа перехода составлял 1 кг/сек.

Общую оценку интенсивности русловых деформаций р. Надым, которая несомненно является неустойчивой рекой, можно дать по сравнению с некоторыми другими реками, русла которых сложены сыпучими или плохо сцементированными грунтами, например р. Аму-Дарьи. Так, по формуле В. М. Маккавеева [1] устойчивость русла р. Аму-Дарьи определяется коэффициентом $K = 0,5$, а для р. Надым $K = 0,85$.

Зимний режим, особенно ледовые образования, оказывает существенное, а в зоне многолетней мерзлоты иногда и определяющее влияние на деформации русел и пойм и расположенные на них сооружения. К наиболее серьезным факторам, влияющим на деформации пойм и русел на р. Надым, следует отнести: заторы льда, примерзание льда к поверхности осередков и побочной, захоронение льдин, находящихся ниже головы побочной (около затонской части), надвигающимися гребнями песчаных гряд, интенсив-

ное разрушение ледоходом пойменных берегов, а также и сооружений на пойме прочными льдинами, примером чему может служить разрушение железнодорожного пути и насыпи грунтовой дороги в районе нового водомерного поста (рис. 2).



Рис. 2. Разрыв насыпи автогужевой дороги на пойме р. Надым (114-й км)

ЛИТЕРАТУРА

1. Антроповский В. И. Гидроморфологические зависимости и их дальнейшее развитие. Труды ГГИ, вып. 169, 1969.
2. Пиньковский С. И. Типы речных русел Средней и Южной Сибири. Труды ГГИ, вып. 94, 1962.
3. Попов И. В. Деформации речных русел и гидротехническое строительство. Гидрометеонздат, Л., 1969.

Н. Б. Барышников, Г. В. Иванов, А. А. Левашов

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ РУСЛОВЫХ ДЕФОРМАЦИЙ НА ОСНОВАНИЯ ОПОР ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧ

Основания опор линий электропередач (ЛЭП) являются самостоятельными гидротехническими сооружениями. При их расположении на берегах и поймах рек они подвержены интенсивному воздействию как ледовых образований, так и русловых деформаций. Теоретическое обоснование и расчет сооружений такого типа разработан недостаточно, а привлечение методов теории мостостроения и берегоукрепления требует внесения существенных коррективов. При строительстве ЛЭП вдоль рек и особенно часто при переходе их трассы через реки наиболее острой проблемой является защита оснований опор ЛЭП от русловых деформаций. Данное исследование посвящено изучению русловых деформаций у оснований опор на примере ЛЭП, построенной в 1965—1969 гг. вдоль верхнего участка р. Томи. С целью изучения гидролого-гидравлических характеристик, характера русловых деформаций и состояния оснований опор в 1967—1969 гг. Ленинградским гидрометеорологическим институтом были проведены полевые исследования верхнего участка р. Томи.

Проектантами было предложено, а строителями осуществлено крепление оснований опор со стороны реки при помощи бетонных блоков размерами $2,0 \times 1,3 \times 0,7$ м, уложенными в 4—7 рядов по высоте (рис. 1). Внутренняя полость такого основания заполнялась галькой крупностью около 10 см. Бетонные блоки, как правило, не были соединены между собой в ряду и между рядами, а их первый ряд уложен непосредственно на речное дно, без заглупления.

По данным полевых исследований было установлено, что наибольшее воздействие русловые деформации оказывают на основания опор ЛЭП, расположенных на внешних берегах излучин. При этом происходит интенсивный вымыв грунта из под нижнего ряда блоков (со стороны реки) и создание «ниши». Отдельные блоки нижнего ряда близки к разрушению. Такое положение объясняет-

ся тем, что крупность частиц грунта под блоками близка к 10 см, а в паводок поток перемещает валуны размерами до 30—40 см (рис. 2).

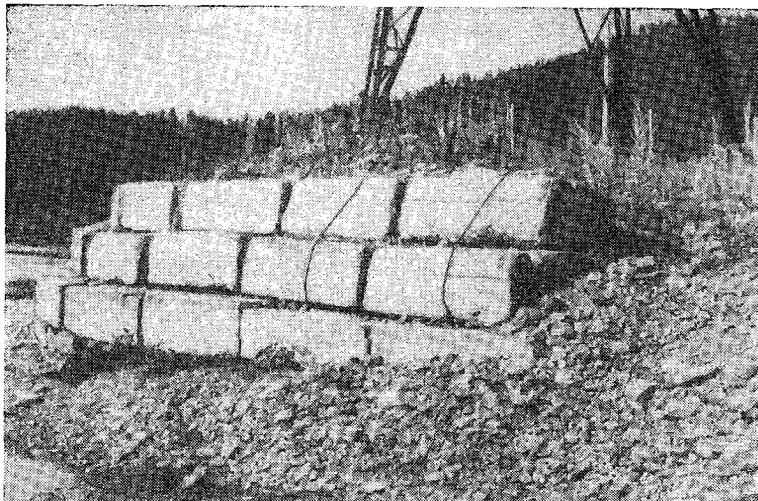


Рис. 1. Крепление оснований опор, выполненное из блоков (вид со стороны реки)

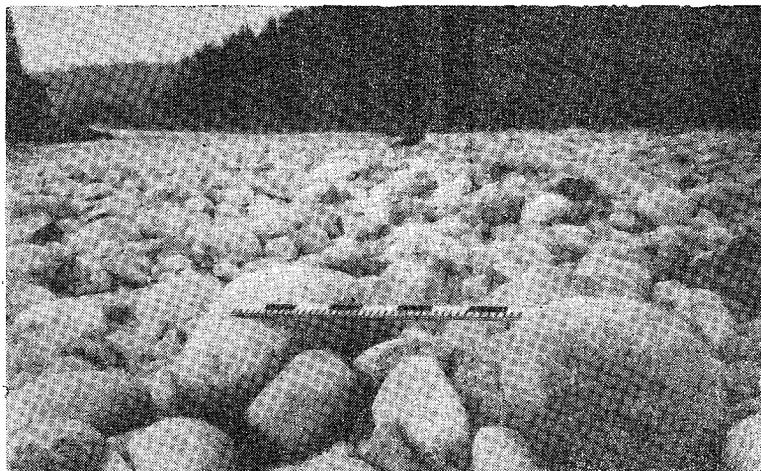


Рис. 2. Отложение наносов в русле р. Томи

Задачей наших исследований явилась разработка рекомендаций:

1) по предотвращению разрушения оснований опор действующей ЛЭП от русловых деформаций;

2) по учету русловых деформаций и их влияния на основания опор ЛЭП при проектировании последних.

С этой целью на основании данных аэрофотосъемки, выполненной в 1961 г. и русловых съемок 1967—1968 гг. были установлены типы русловых процессов и дан прогноз русловых деформаций по методике, разработанной в Государственном гидрологическом институте [5].

Однако любая типизация русловых процессов является довольно грубой схемой. В естественных условиях часто встречаются случаи, когда на исследуемых участках рек наблюдаются комбинации различных типов русловых процессов. Особенно осложнен вопрос при рассмотрении горных и полугорных рек, для которых данная типизация находится еще в стадии разработки. Действительно, на горных реках, имеющих высокие значения уклонов свободной поверхности, резко возрастает роль сопротивляемости подстилающих, как правило, скальных оснований, прикрытых слоем отложений различной толщины. Да и сам процесс перемещения мелких частиц качественно отличен от перемещения крупной гальки и валунов крупностью до 0,5—1 м.

Учитывая это, мы подходим к применению гидроморфологического метода к исследуемому полугорному участку р. Томи с известной осторожностью.

Основной нашей задачей было выявление тех потенциальных опасностей со стороны русловых деформаций, которые могут оказать в ближайшие и последующие годы отрицательное, вплоть до разрушения оснований опор, воздействие на работу ЛЭП.

Летом 1967 и 1968 гг. были исследованы четыре гидроморфологически однородных участка р. Томи с целью оценки состояния оснований опор, характера русловых деформаций, установления возможности применения гидроморфологического метода оценки русловых процессов к условиям полугорных рек и, если это возможно, определение типа руслового процесса.

Результаты обследований позволяют сделать предварительный, но очень важный вывод о том, что гидроморфологический метод, разработанный для равнинных рек, в целом применим и к рекам полугорным. Однако в ряде конкретных случаев возникают значительные трудности при определении типа руслового процесса на отдельных конкретных участках реки. В качестве примера можно привести участок реки в районе станции Чарыш длиной в 2,5 км. Данный участок расположен на изгибе речной долины с углом входа 50° и выхода 20° . Ширина долины в пределах участка колеблется от 150 до 400 м.

Все опоры линии электропередач находятся на левом выпуклом берегу за исключением опоры 283, расположенной в конце верхнего острова.

Продольный уклон свободной поверхности реки по нивелировке 25/VI 1968 г. составил $2,4\text{‰}$, а определенный по меткам высоких вод оказался равным $2,9\text{‰}$.

В начале участка расположены два острова, следующие друг за другом, причем первый верхний расчленяет однорукавное русло на две приблизительно равных по пропускной способности для межженного периода протоки. Поверхностные скорости течения воды в протоках (в период работы экспедиции) достигали 1 м/сек. Второй остров расположен ближе к правому берегу и отделен от него узкой протокой, шириной 20—25 м. Третий остров расположен в нижней части участка у левого берега (опоры 278—277) и отделен от последнего узкой протокой шириной до 8 м. Длина всех островов колеблется от 400 до 450 м, наибольшая ширина 60—100 м.

Имеется две гипотезы образования островов. Первая высказана одним из авторов гидроморфологического метода И. В. Поповым. Он считает, что острова, имеющиеся на участке, образовались при обсыхании крупных галечных гряд, возникающих при очень больших половодьях. При отсутствии в последующем лет со значительной водностью, поверхность этих гряд закрепляется растительностью и отложениями наилка и образовавшиеся таким образом острова имеют возможность наростать в высоту. Такой тип руслового процесса может быть отнесен к осередковому. В протоках, возникающих в результате образования островов, в свою очередь наблюдались различные типы руслового процесса: ленточногрядовый, побочневый и даже разновидности меандрирования.

Вторая гипотеза, в отличие от первой, считает, что образование островов обусловлено отторжением их от пойменных массивов протоками, возникшими в период высоких паводков низкой обеспеченности. В настоящее время довольно трудно установить какая из гипотез является правомерной. В пользу второй гипотезы выдвигается довод о наличии на островах вековых деревьев и мощного слоя чернозема, для образования которого необходим период, измеряемый сотнями лет. В то же время под почвенным слоем и слоем наилка находится окатанный галечник, свидетельствующий о расположении в этом месте в давние времена русла.

Независимо от правомерности той или иной гипотезы возникновения островов, исследуемый участок реки обнаруживает все характерные признаки осередкового типа руслового процесса. При этом типе процесса транспорт донных наносов в протоках происходит в основном в форме движения галечных ленточных гряд. На участке от 284 до 277 опоры расположено 5 перекошенных в плане ленточных гряд, разделенных порожистым участком. Второй порог замыкает участок. Расстояние между гребнями гряд (шаг гряды) в начале островного участка реки колеблется от 250 до 450 м.

На участке ниже порога, относительно прямолинейном, гряды отсутствуют, и гребень гряды обнаруживается лишь на расстоянии около 700 м, что, по-видимому, можно объяснить малым поступлением наносов через порог, препятствующим формированию гряд непосредственно ниже его. Все гряды сложены крупной галькой со

средней крупностью 10 см. Гряды приходят в движение только в периоды высоких паводков. Высота гряд по данным измерений в межень при глубинах до 2,0 м достигает 1,1 м, а по расчетам по формулам Н. С. Знаменской [2] и В. Н. Гончарова [1] при глубинах 7 м, наблюдаемых в паводки, соответственно 2,1 и 1,8 м. По-видимому, при очень высоких половодьях редкой обеспеченности высота гряд может достигать 2,0 м. Размыв берегов и островов, мощность пойменной фации на которых колеблется от 0,8 до 1,3 м (эта фация представлена супесями с примесью гальки), происходит также преимущественно в паводки.

Часть гряд, движущихся по протокам, причленяется к островам. На островах преобладает накопление наносов в их верхних частях, что приводит к их регрессивному (пятящемуся вверх по течению) перемещению. Например, верх острова, на котором находится опора 283, нарастает со скоростью 7—8 м в год. Имеющиеся на участке пороги оказывают существенное влияние на сползание гряд.

На участках выше порога возможно замедление движения гряд и их переформирование, приводящее к сложному взаимоположению их гребней (перекосы гребня, уменьшение шага гряд, неодинаковая высота и др.). Особенно четко это видно на участке подхода к первому порогу.

Деформации русла на рассматриваемом участке можно оценить на основе сопоставления данных аэрофотосъемки 1961 г. и съемки, выполненной экспедицией ЛГМИ в 1968 г. На схеме деформаций (рис. 3) видно, что деформации почти повсеместны, но незначительны и имеют разный знак, так, на участке от опоры 281 до 279 размыв чередуется с намывом и величина деформации в плане за период колеблется от 10 до 15 м, что составляет около 1,5—2,0 м/год. Более значительные деформации происходят на участках русла, где имеются острова. Так, ухвостье острова, расположенного у опоры 282, за этот же период намыто на 27 м или около 4 м/год. В начале участка правый берег размывается, а верх самого острова намывается и скорость намыва здесь достигает 7—8 м/год.

В середине участка (в 100 м ниже опоры 281) и в конце его располагаются пороги. Здесь сосредоточено большое количество валунов, особенно на пороге, расположенном в конце участка (размер валунов от 1,0 м и более). Очевидно существенного глубинного размыва на этих порогах не происходит, а на всем участке величина вертикальной деформации определяется перемещением гребней ленточных гряд, высота которых, как показывают расчеты, может достигать 2,0 м. Однако скорость деформации пойменной фации берегов и островов может резко увеличиться при образовании заторов льда на участке. Наличие островов благоприятствует образованию заторов в этом месте. Кроме того, неравномерное прохождение гряд через протоки обуславливает различную пропускную способность проток

в разные периоды. В связи с этим будет меняться и знак деформации на ближайших участках. Судя по современным скоростям деформации на участке, главной опасностью для деформации берегов у опор и их механического повреждения может оказаться ледоход и особенно заторы льда. Установить скорость движения ленточных гряд по имеющимся материалам не представляется возможным, ибо гребни гряд на аэрофотопланах не просматриваются. Определение же скорости движения гряд по эмпирическим формулам, основанным на экспериментальных (лабораторных) данных, как правило, дает резко завышенные, по сравнению с натурными, результаты. В то же время на участках расположения опор от 113 до 123 и от 79 до 100, обследованных в 1967 г., гидравлическим расчетом по эмпирическим формулам была установлена средняя скорость движения гряд, равная половине шага гряды в год, т. е. 300—350 м в год, фактически же ввиду низкой паводка 1968 г. гребни гряд, как показали обследования летом 1968 г., практически не изменили своего положения.

Таким образом, на основании данных обследований всех участков можно сделать вывод о том, что движение галечных гряд (наносы крупностью до 40 см) осуществляется неравномерно только в годы с высокими паводками. Средняя скорость движения гряд в эти годы может быть оценена ориентировочной величиной порядка 150—200 м в год и изменяется в различные по высоте паводков годы от 50—100 до 300—350 м в год. Высота гряд в годы с исключительно высокими паводками может достигать 1,8—2,5 м.

Наиболее опасными для ЛЭП являются бытовые деформации, происходящие при подходе подвалов ленточных гряд к основаниям опор. Глубины размывов в этом случае по предварительным подсчетам могут достигать 1,0—1,2 м.

В то же время натурные исследования не дают возможности оценить характер и величину местного размыва у оснований опор, ибо данная ЛЭП действует только 1—2 года, а в 1968 г. по рекомендации авторов строители укрепили основания опор, расположенных на берегах реки, крупнообломочным камнем.

Поэтому для оценки характера местного размыва у опор применен метод моделирования.

В соответствии с данными полевых исследований в лаборатории ЛГМИ были проведены эксперименты по изучению гидравлических характеристик потока, русловых деформаций и их воздействия на основания опор с целью выработки рекомендаций по защите и укреплению опор ЛЭП.

Объектом моделирования была выбрана схематизированная излучина русла с размещенным на ее внешнем берегу основанием опоры. Выбор участка такого типа обусловлен тем, что основания опор ЛЭП, расположенные в вершинах излучин, находятся под наиболее сильным воздействием потока. В качестве примера можно привести результаты полевых обследований оснований опор 122 и 123, 81/1, 81/2.

Расчет характеристик модели произведен по Фрудру, по методике, разработанный проф. И. И. Леви [3].

Модель была выполнена в малом гидравлическом лотке с переменным уклоном в двух масштабах 1/100 и 1/50.

Изучение гидравлики потока и русловых деформаций у опор ЛЭП производилось поэтапно.

Первый этап был посвящен исследованию поля скоростей на жесткой модели.

На втором этапе исследовались русловые деформации и их влияние на характер разрушения основания опоры. Для изучения качественной картины размыва был создан участок русла с размываемым дном и моделью основания опоры в 1/100 натуральной величины. Дно потока выполнялось из фракций следующих размеров: 0,1—0,3 см, 0,3—0,5 см, 0,5—0,7 см и 0,7—1,0 см. Эксперименты по изучению русловых деформаций осуществлялись при уровнях, соответствующих натурному расходу 2% обеспеченности.

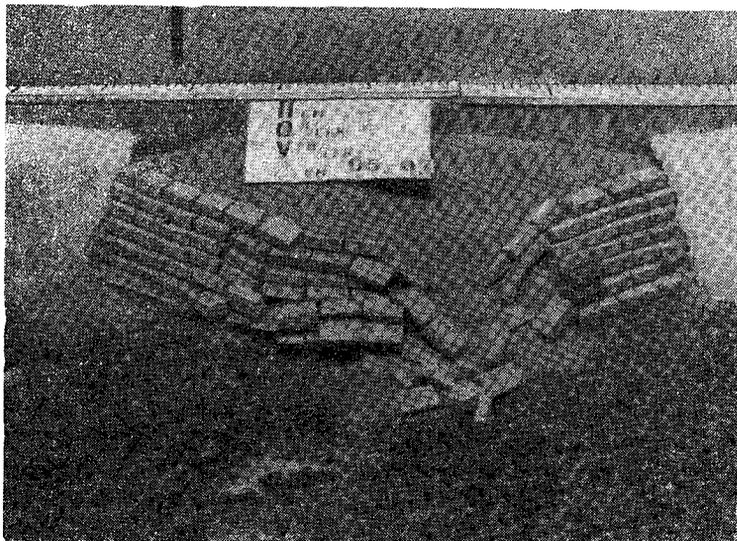


Рис. 4. Окончательная картина размыва крепления оснований опоры (масштаб модели 1 : 50)

Более подробно картина размыва у основания опор ЛЭП изучалась на модели в 1/50 натуральной величины. На этой модели было выполнено 47 опытов, состоящих из двух серий. Первая серия проводилась при коэффициенте сжатия потока $\varepsilon = 0,9$, а вторая — при $\varepsilon = 1,0$. Основные параметры опытов представлены в табл. 1. Дно русла выкладывалось песком крупностью 0,05—0,1 см. Окончательная картина размыва в каждом опыте фиксировалась на фотоснимках (рис. 4).

Основные характеристики опытов по изучению местного размыва у опор ЛЭП в 1969 г.

№ п/п	Q, л/сек	ω_c , см ²	$V_{ср}$, см/сек	$V_{ср}^*$, м/сек	$H_{ср}$, см	h_p , см	Крепление блоков между собой	Вид защиты	Время размыва t, сек
Серия I ($\Delta = 0,05 - 0,1$ см; $\varepsilon = 0,9$)									
а) 1	16,7	549,3	30,1	2,18	7,42	6,5	отсутствует	отсутствует	510
2	23,7	637,1	32,2	2,28	9,42	6,6	"	"	1620
3	23,8	771,6	31,8	2,25	9,55	7,6	"	"	2100
4	22,0	559,0	39,3	2,78	7,88	8,6	"	"	1560
б) 5	30,0	558,8	53,7	3,80	8,16	7,7	"	тюфяк с размером блока 2×2×0,7 см	385
6									
7	28,4	771,3	36,9	2,61	10,41	5,2	МОНОЛИТ	"	990
8	29,04	587,6	49,5	3,50	8,14	7,3	"	"	755
в) 9	27,76	749,0	32,2	2,28	10,05	8,8	"	тюфяк с размером блока 1×1×0,4 см	672
10	34,6	619,3	53,8	3,80	8,71	10,8	отсутствует	"	530
11	34,7	654,0	53,1	3,76	9,02	10,2	МОНОЛИТ	"	420
12	31,52	730,9	48,2	3,40	9,95	10,6	"	"	480

Г) 13	21,10	690,4	59,9	2,02	9,90
14	36,6	725,2	50,8	3,59	8,58
15	34,8	705,4	49,3	3,48	9,40
16	26,32	602,4	43,8	3,10	8,58
д) 17	19,04	564,0	33,7	2,38	8,07
18	26,70	509,0	52,4	3,70	8,22
19	26,32	616,0	42,7	3,02	8,76
20	28,58	543,0	52,6	3,72	7,75

Серия II ($\Delta =$					
а) 1	30,70	933,0	32,9	2,32	10,9
2	34,05	624,5	54,4	3,84	7,96
3	30,26	662,0	45,6	3,23	8,33
4	30,83	680,0	45,4	3,21	8,61
б) 5	31,90	755,5	42,2	2,97	9,22
6	35,60	712,5	50,0	3,54	8,96
7	33,42	704,0	47,5	3,36	8,80
8	29,25	754,0	39,3	2,78	9,38
в) 9	29,86	735,6	41,6	2,94	9,19
10	30,53	692,2	44,2	3,13	8,87
11	33,23	672,8	50,2	3,55	8,06
12	33,42	769,7	44,5	3,14	9,26

7,9	отсутствует	каменная отсыпка	390
9,0	"	"	360
7,8	"	"	500
6,8	"	"	1086
7,2	"	отсутствует	1910
4,9	"	"	321
7,2	"	"	827
6,2	"	"	567

0,05 — 0,1 см; $\varepsilon = 1,0$)

5,5	отсутствует	отсутствует	1260
7,8	"	"	570
8,3	"	"	720
8,6	"	"	551
8,4	МОНОЛИТ	тюфяк с размером блока 2,0×2,0×0,7 см	654
8,7	"	"	720
7,5	"	"	824
4,5	"	"	840
8,2	"	тюфяк с размером блока 1×1×0,4 см	1095
7,8	"	"	1245
8,9	МОНОЛИТ	"	1800
7,8	"	"	1020

Как видно из табл. 1, в первой серии опытов ($\epsilon=0,9$) деформации изучались при отсутствии защиты дна у опоры — опыты Ia и при защите дна: Ib — тюфяки с размерами одного блока $2 \times 2 \times 0,7$ см, Iv — тюфяки с размерами одного блока $1 \times 1 \times 0,4$ см и Ig — каменная отсыпка. В опытах Id изучалась устойчивость подножников опор. В серии II сжатие потока отсутствовало ($\epsilon=1,0$). В серии IIa крепления дна не было, в IIб дно покрывали бетонным тюфяком с размерами одного блока $2 \times 2 \times 0,7$ см и IIв — размер одного блока был таким же как и в серии Iv.

Анализ опытных данных показал, что бетонные тюфяки, уложенные у основания опор, смещают воронки размыва от основания опоры в сторону глубокой части русла. Размеры и вес блока бетонного тюфяка, не оказывая заметного влияния на глубину размыва даже в районе опоры, существенно влияют на устойчивость самих тюфяков. Так, например, во время размыва дна при наибольшем сжатии угол тюфяка с малым весом отдельного блока был поднят и загнут.

Характер и конфигурация размыва указывают на необходимость укладки бетонных тюфяков не только сбоку опоры, но и перед ней.

Опыты по выявлению влияния каменной наброски на размыв подтвердили эффективность ее в борьбе с размывом.

Из опытов также вытекает необходимость крепления блоков защиты основания между собой (в рядах и между рядами).

Защита из нескрепленных блоков, уложенная на размываемый грунт, легко разрушается под влиянием размывающего действия потока. Под нижним рядом блоков поток вымывает нишу, через которую он выносит грунт внутренней отсыпки.

Сравнение глубин местного размыва (табл. 1) I и II серий опытов показывает, что степень сжатия в пределах экспериментов не оказывает значительного влияния на величину глубины местного размыва; порядок величины размыва один и тот же. Защита из тюфяков и отсыпки снижает размыв у опоры и смещает его в более глубокую часть русла. Положение максимальной глубины размыва у опоры также зависит от скорости перемещения ленточной гряды и от расположения подвалья гряды относительно опоры.

Значения глубин местного размыва, полученные по данным экспериментов, сравнивались с расчетными, полученными по формулам В. С. Муромова, И. А. Ярославцева и А. М. Латышенкова для расчета местного размыва у мостовых опор. Это сравнение выявило значительное расхождение между опытными и расчетными величинами. Наименьшее расхождение получено с данными по формуле В. С. Муромова. Эти расхождения частично объясняются спецификой обтекания опоры, расположенной на берегу и частично вдающейся в русло. Опора обтекалась потоком только с одной стороны.

Учитывая то, что эксперименты подтвердили целесообразность применения каменных отсыпок; необходимо было произвести расчет крупности камней для условий прохождения паводков 2%-ной обеспеченности на р. Томи.

Расчет таковых был выполнен по ряду формул неразмывающих скоростей (детальный анализ последних приведен в работе Ц. Е. Мирцхулавы [4]. Результаты расчетов, полученные по этим формулам, довольно близки между собой. В качестве примера приводим в табл. 2 результаты расчетов по формулам С. В. Избаша и В. Н. Гончарова.

Таблица 2

№ опор	Глубина при уровне 2%-ной обеспеченности, м	Уклон	Критические значения крупности, см		Расчетная крупность, см	
			по Избашу	по Гончарову	по Избашу	по Гончарову
81/1	3,5	0,002	0,20	0,24	0,30	0,36
81/2	3,55	0,002	0,20	0,25	0,30	0,38
88	3,60	0,002	0,21	0,25	0,32	0,38
122	4,45	0,002	0,28	0,31	0,42	0,47
123	4,10	0,002	0,25	0,29	0,38	0,45

Расчетное значение крупности камней для отсыпки получено путем введения коэффициента запаса, равного 1,5.

В специально поставленных экспериментах было изучено влияние таких каменных отсыпок на характер и темп развития деформаций у оснований опор. Третья серия экспериментов позволила сделать ряд рекомендаций, которые были переданы строителям ЛЭП и частично реализованы. Эти рекомендации сводились к следующему:

1. Необходимо произвести отсыпку оснований опор крупнообломочным материалом крупностью не менее 0,4—0,5 м, при обязательной заделке ниш под нижним рядом блоков.

2. Каменные отсыпки не исключают, а замедляют процесс подмыва оснований опор, ибо из-под отсыпки вымываются более мелкие частицы грунта, а крупные заглубляются.

3. Необходимо один раз в 3—5 лет возобновлять эти отсыпки, гарантируя тем самым сооружения от разрушения.

Проведенные полевые и экспериментальные исследования позволяют сделать некоторые существенные выводы.

1. Необходимы дальнейшие, детальные, теоретически, натурные и экспериментальные исследования вопроса крепления оснований опор ЛЭП с целью разработки методики достаточно надежной и дешевой защиты их оснований.

2. При проектировании ЛЭП необходимо проводить тщательные исследования характера и типа русловых процессов на реках, пересекаемых трассами ЛЭП и особенно при расположении последних вдоль рек и на их основе разрабатывать фоновый прогноз русловых деформаций.

3. В условиях верхнего участка р. Томи наиболее экономичным и надежным средством защиты оснований опор являются качественно выполненные каменные отсыпки. Наименьшая крупность камней отсыпки может быть определена по формулам неразмывающих скоростей (при расходе 2%-ной обеспеченности) при условии введения коэффициента запаса, равного 1,5—2,0.

4. Экспериментальные работы помогли выявить наиболее уязвимые места принятой на р. Томи формы защиты оснований опор.

Таковым является подмыв оснований со стороны реки, происходящий из-за стеснения ее русла.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гончаров В. И. Динамика русловых потоков. Гидрометеониздат, Л., 1962.
2. Знаменская Н. С. Грядовое движение наносов. Гидрометеониздат, Л., 1968.
3. Леви И. И. Моделирование гидравлических явлений. Изд-во «Энергия», Л., 1967.
4. Мирцхулава Ц. Е. Размыв русел и методика оценки их устойчивости. Изд-во «Колос», М., 1967.
5. Попов И. В. Деформации речных русел и гидротехническое строительство. Гидрометеониздат, Л., 1969.

Н. Б. Барышников, И. Б. Цитлис

МЕТОДИКА РАСЧЕТА КРИВОЙ ДИФФЕРЕНЦИРОВАННЫХ ГЛУБИН В УСЛОВИЯХ ЗАРЕГУЛИРОВАННОГО СТОКА РЕКИ ВОЛГИ

Данная работа является продолжением опубликованной в 1965 г. статьи одного из авторов [1], выполненной на примере р. Иртыш. Задачей работы явилось исследование вопроса влияния вышерасположенного регулирующего водохранилища на режим глубин судоходного плеса с целью оценки применимости методики и внесения коррективов в последнюю за счет попускового режима работы ГЭС.

Учитывая, что детальное изложение методики опубликовано [1], в данной работе приводится лишь изложение ее основ необходимых для понимания дальнейшего материала.

В основу расчетной методики положена зависимость транзитной глубины T от определяющих факторов:

$$T = f [H_p, Q_{\max}(H_{\max}), W, B, n],$$

где H_p — расчетный уровень воды; $Q_{\max}(H_{\max})$ — максимальный расход (уровень) воды весеннего половодья; W — объем землечерпательных работ за навигацию; B — ширина судового хода; n — число дней от даты наступления максимального расхода воды до даты появления расчетной транзитной глубины. Параметр, косвенно учитывающий гидрологические условия навигации, режим деформации перекаатов и другие характеристики.

В методике принят способ приближенной оценки влияния отдельных факторов посредством статистической обработки данных за годы наблюдений. Весь диапазон уровней в период навигации разбивается на интервалы и для каждого из них выбираются расчетные значения. При этом обязательным является выбор величины расчетного уровня равного или близкого значению проектного. Затем вводится поправка к транзитным глубинам за счет ширины судового хода.

Анализ материалов по ряду рек позволил установить обратную линейную зависимость между транзитной глубиной и максимальным расходом (уровнем) воды весеннего половодья:

$$T_B = \alpha Q_{\text{макс}} + b,$$

где индекс u значения транзитной глубины указывает на то, что последняя взята при постоянном значении этой величины, в данном случае ширины B ; b — постоянная.

Параметр α , равный тангенсу угла наклона прямых, определяющий степень влияния расчетной величины на транзитную глубину, является отрицательной величиной и по абсолютной величине уменьшается с уменьшением значения расчетного уровня [1]. Такое изменение параметра α можно объяснить следующими причинами. $Q_{\text{макс}}$ — косвенная характеристика, учитывающая влияние намыва перекаатов на подъеме половодья и (частично) размыва их на спаде. С уменьшением значения расчетного уровня возрастает значение «саморазмыва» перекаатов, компенсирующее влияние намыва их в паводок. Поэтому по мере уменьшения расчетного уровня увеличивается время и величина размыва перекаатов, компенсирующая влияние намыва в период половодья. Для исключения влияния указанных выше факторов, в расчетное значение транзитной глубины вводится поправка за счет влияния максимального расхода по выражению:

$$\Delta T_Q = \alpha (Q_{\text{макс, расч}} - Q_{\text{макс}})$$

и далее

$$T_{B,Q} = T_B + \Delta T_Q,$$

где $T_{B,Q}$ — транзитная глубина, в которую введены поправки за счет отклонения ширины судового хода и максимального расхода (уровня) от принятых расчетных значений.

Как установлено предыдущими исследованиями [2, 3], зависимость транзитной глубины от объема землечерпательных работ близка к логарифмической или степенной:

$$T_{B,Q} = \gamma \lg(W + 1) + C,$$

где γ — коэффициент, определяющий приращение глубин за счет землечерпательных работ. Зависит от вида грунтов, слагающих лимитирующие перекааты, длины плеса, способа разработки перекаатов, типа земснарядов и других характеристик; C — постоянная.

Учет влияния объемов землечерпательных работ на величину расчетной транзитной глубины производится посредством введения поправки ΔT_W за счет отклонения фактического объема вынутого грунта от расчетного [1]. Тогда $T_{B,Q,W} = T_{B,Q} + \Delta T_W$.

Приращения глубин ΔT_W , полученные только за счет землечерпательных работ на отдельных судоходных плесах, достигают

50 см и более [5, 6]. Особенно большие значения приращений наблюдаются на вновь осваиваемых реках, когда они достигаются только за счет срезки вершин отдельных лимитирующих перекатов. В этих случаях при малых затратах средств и небольших объемах технических работ можно получить высокие приращения глубин. При последовательном увеличении объемов землечерпательных работ в разработку включается все большее число перекатов, в пределе стремящееся к общему числу перекатов на плесе, что приводит к необходимости затрат больших средств и усилий для получения относительно небольших приращений глубин.

В этом случае необходимо производить тщательные технико-экономические расчеты, которые обосновывали бы целесообразность проведения технических мероприятий, направленных на дальнейшее увеличение транзитных глубин. Этот вопрос, однако, выходит за рамки данной работы.

Особенно сложен учет гидрологических условий навигации, заносимости прорезей и саморазмыва перекатов, времени и методики разработки перекатов и других факторов. Поэтому для учета указанных факторов принята косвенная характеристика n лишь частично учитывающая влияние этих факторов на режим транзитных глубин. Необходимо отметить тот факт, что принятая методика расчета приводит к суммированию ошибок при введении поправок на ширину судового хода, на влияние максимального расхода воды и объема землечерпательных работ. Эти ошибки, а также неточность учета параметром n остальных факторов приводят к значительному разбросу точек, соответствующих данным наблюдений в поле координат зависимости

$$T_{B, Q, W} = f(n).$$

Имевшиеся в распоряжении авторов материалы не позволили провести анализ влияния на точность расчета еще одного фактора, а именно, отсутствия синхронности между изменением уровней на опорном посту и глубинами на отдельных перекатах.

Действительно, при длине судоходного плеса от 200 до 500 км и производстве водомерных наблюдений на одном посту, как правило, расположенном в середине плеса, особенно при прохождении волны паводка, уровни воды в течение суток на отдельных лимитирующих перекатах и водомерном посту существенно отличаются. В то же время при построении кривых глубин принято относить лимитирующую глубину к уровню именно расчетного поста, несмотря на то, что часто отсутствует синхронность изменения уровней воды на лимитирующем перекате и опорном посту.

Современные методы расчета движения волны паводка доставляют нам возможность учета этого фактора при расчете кривых дифференцированных глубин [4, 7] при условии увеличения числа опорных постов на судоходном плесе.

Для выяснения поставленных в работе задач были использованы материалы наблюдений на р. Волге по судоходному плесу: Горький — Нижне-Ураковский пережат за период с 1946 по 1968 гг. Ввиду того, что строительство Горьковской ГЭС, расположенной на верхней границе судоходного плеса, закончено в 1954 г., весь период наблюдений разбит на две группы. К первой группе относятся данные наблюдений до строительства ГЭС (1946—1953 гг.), а ко второй — остальные годы (1955—1968). Учитывая, что Щербак-овская ГЭС расположена на значительном расстоянии от судоходного плеса, ее влиянием на режим глубин расчетного плеса можно пренебречь. С 1954—1955 гг. режим глубин на расчетном плесе находится под непосредственным влиянием попускового режима работы Горьковской ГЭС. Данные за 1954 г., т. е. за период перекрытия реки, не были использованы.

Сведения об уровнях воды по опорному посту Просек с 1951 по 1968 гг., а с 1946 по 1951 гг. по опорному посту Исады получены из Управления гидрометслужбы. Проведенные контрольные проверки через промежуточный пост Чебоксары показали, что сведения по этим двум постам достаточно увязаны между собой. Сведения об уровнях воды можно признать удовлетворительными.

Данные о минимальных транзитных глубинах судоходного плеса за период с 1946 по 1968 гг. нельзя признать равнозначными. Действительно, при низких уровнях воды точность измерения глубины довольно высокая и принимается равной ± 5 см, при высоких уровнях точность измерения глубин существенно снижается. Это обусловлено как ошибками при измерении глубин на лимитирующих перекатах, так и ошибками в определении их местоположения в пределах судового хода. Точность измерения в этом случае может быть принята ± 10 см.

Сведения о максимальных расходах воды и датах их наступления получены из Верхне-Волжского управления гидрометслужбы. Их расчетная для судоходного плеса величина определялась как полусумма максимальных расходов по постам Горький и Вязовые.

Сведения об объемах землечерпательных работ также нельзя признать равноценными, ибо они зависят от принятой системы производства работ, типа земснаряда и от системы оценки выполненной работы. Если раньше объемы землечерпания оценивались самими производителями работ, то в настоящее время оценка производится по данным съемок русловых партий.

Несмотря на невысокую точность измерения объемов землечерпательных работ, эту величину вполне можно использовать для расчетов, ибо приращение глубины пропорционально логарифму объема землечерпательных работ, поэтому при расчете глубин не точности измерения объемов землечерпания нивелируются.

Построение расчетных зависимостей

Расчетные значения уровней воды выбраны на основе анализа кривых $T = f(H)$, построенных по данным фактических наблюдений. При этом в качестве расчетных принимались значения уровней: $H_p = 300, 200, 150$ и 75 см над «0» графика поста Просек. Принят в качестве расчетного проектный уровень (60 см) не представляется возможным, ибо при этом уровне недостаточно наблюдений. Поэтому для уровней воды ниже минимального расчетного рекомендуется построение графика связи (рис. 1):

$$\Delta T_p = f(\Delta H_{\text{мин}}).$$

Значение ΔT_p определяется как разность глубин фактической ($T_{\text{ф.в}}$) при минимальном уровне и расчетной при уровне 75 см ($T_{\text{р.в}}$), которые приведены к расчетной ширине судового хода:

$$\Delta T_p = T_{\text{ф.в}} - T_{\text{р.в}}.$$

Дальнейшие вычисления выполнены для каждого расчетного уровня по единой методике.

Учет ширины судового хода производился посредством введения поправки к глубинам:

$$\Delta T_B = \eta(B_{\text{ф}} - B_p).$$

Значение коэффициента η зависит от формы поперечного сечения русла на лимитирующих перекатах, от слагающих их грунтов и других характеристик. По литературным данным [7, 8] известно, что значение параметра η изменяется от 0,007 до 0,015. Для расчетного плеса р. Волги значение η принято равным 0,01. Следовательно, значение поправки может быть определено по формуле

$$\Delta T_B = 0,01(B_{\text{ф}} - B_p).$$

В качестве расчетной принимается наиболее часто встречающаяся при расчетном уровне ширина судового хода.

После введения поправок к фактическим глубинам (при расчетных уровнях) на ширину судового хода выполнено построение

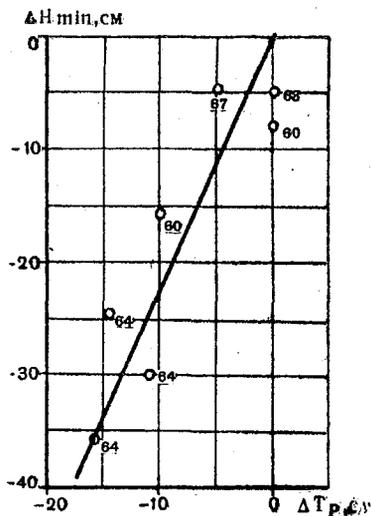


Рис. 1. Зависимость $\Delta T_p = f(\Delta H_{\text{мин}})$.

зависимостей глубин T_B от максимальных расходов воды, объемов землечерпательных работ и параметра n :

$$T_B = f(Q_{\text{макс}}, W, n).$$

Задачей построения указанных графических зависимостей является выяснение влияния максимальных расходов воды на расчетную величину транзитной глубины. Построение расчетных зависимостей $T_{B,Q,W} = f(n)$ возможно только в результате тщательного анализа всех исходных величин и подбора в качестве опорных значений глубин при близких объемах землечерпательных работ и параметра n .

Значения объемов землечерпательных работ определены по интегральным кривым $W = f(n)$ (рис. 2).

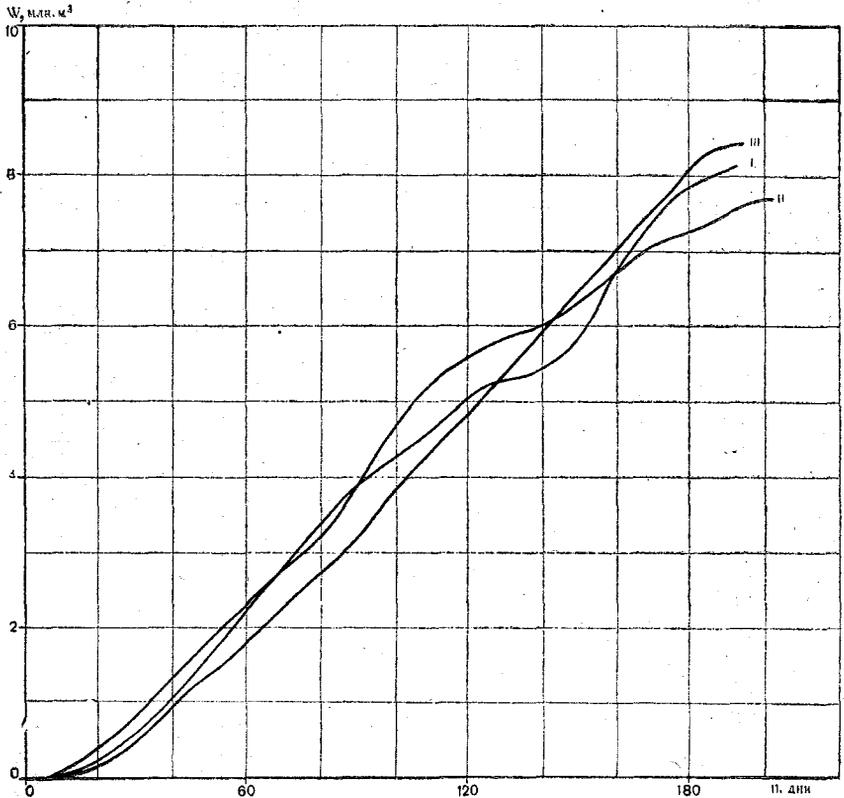


Рис. 2. Интегральные кривые объемов на плесе Горький—Н. Ураковский перекат р. Волги:

I — 1966 г.; II — 1967 г.; III — 1968 г.

При построении интегральных кривых по оси абсцисс откладывается не календарная дата, а время (в днях) от даты прохожде-

ния максимального расхода воды до выполнения данного объема землечерпательных работ.

Анализ полученных зависимостей $\Delta T_Q = f(Q_{\text{макс}})$ (при $Q_{\text{макс. расч.}} \Delta T_Q = 0$) (рис. 3) за периоды с 1946 по 1953 гг. и с 1955 по 1968 гг. показывает, что влияние максимального расхода воды на величину транзитной глубины практически не изменилось.

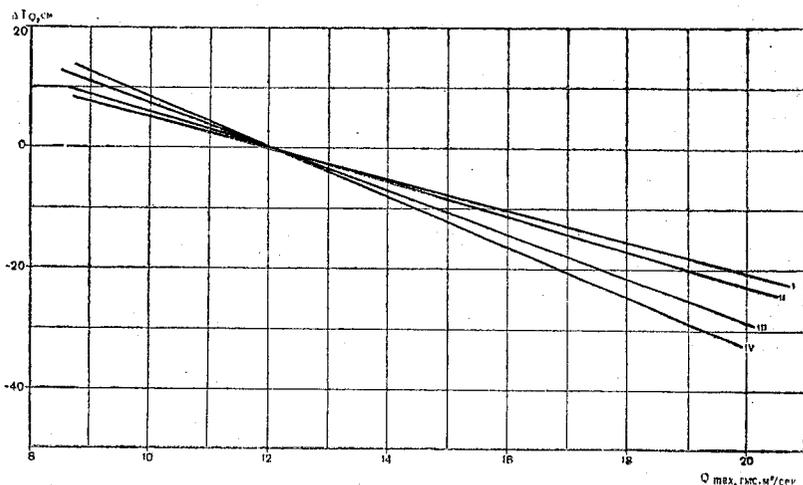


Рис. 3. Зависимость $\Delta T_Q = f(Q_{\text{макс}})$ при зарегулированном режиме:

I — $H_p = 75$ см; II — $H_p = 150$ см; III — $H_p = 200$ см; IV — $H_p = 300$ см.

Небольшое изменение угла наклона прямых

$$\Delta T_Q = f(Q_{\text{макс}})$$

находится в пределах точности его определения. Указанное положение позволяет сделать вывод о том, что влияние водохранилища на режим намыва перекатов на нижерасположенном плесе в период подъема паводка незначительно и им можно пренебречь при расчетах кривых дифференцированных глубин.

Затем по значениям глубин ($T_{B,Q}$), в которые введены поправки за счет отклонения ширины и максимального расхода весеннего половодья от расчетных величин, были построены графические зависимости вида $T_{B,Q} = f(W, n)$, т. е. в поле координат $T_{B,Q} = f(W)$ были проведены кривые, соответствующие постоянным значениям параметра n . Одна из кривых $T_{B,Q,n} = f(W)$, наиболее освещенная фактическими данными, была принята расчетной. Определяя отклонения ΔT_n исходных данных от расчетной кривой, считают, что они обусловлены влиянием параметра n . В поле координат $\Delta T_n = f(n)$ разброс точек обусловлен как точностью измерения и вычисления исходных данных, так и влиянием целого ряда второстепенных, неучтенных в методике факторов, которые в отдельных

случаях могут иметь решающее значение. В качестве примера можно привести удачно выполненные выправительные работы, интенсивные выносы наносов из оврагов или небольших притоков и отложение их на отдельных перекатах и др.

По-видимому, расчетные зависимости $T_{B,Q,n} = f(W)$, учитывая влияние объемов землечерпательных работ на величину транзитных глубин, недоучитывают влияния режима работы водохранилища вышерасположенной ГЭС на характер землечерпательных работ. Поэтому это влияние частично учитывается с помощью параметра n .

Анализ графических зависимостей $\Delta T_n = f(n)$ за периоды с 1946 по 1953 гг. и с 1955 по 1968 гг. (рис. 4) показал, что при всех расчетных уровнях поправки к глубине за счет влияния параметра n существенно отличны.

Так при зарегулированном режиме (рис. 4, А) и высоких значениях расчетного параметра n значения поправок к транзитным глубинам по абсолютной величине значительно больше, чем при бытовом.

Это явление особенно четко прослеживается при условии выбора расчетной кривой $T_{B,Q,n} = f(W)$ при одинаковом значении параметра n как при бытовом, так и при зарегулированном режимах, что достигается параллельным переносом кривых $T_{B,Q,n} = f(n)$ или совмещением значения $\Delta T_n = 0$ на кривых $\Delta T_n = f(n)$ (рис. 4, Б и 4, В) при различных уровнях и режимах. Как видно при сравнении рис. 4, Б и 4, В, верхние части кривых $\Delta T_n = f(n)$ при расчетных уровнях 200 и 300 см практически совпадают, в то же время при высоких значениях параметра n наблюдается их существенное расхождение.

Аналогичное расхождение наблюдается в поправках и при малых значениях параметра n при расчетных уровнях 75 и 150 см (табл. 1). Объяснением этого, по-видимому, является изменение характера деформации перекатов при пусковом режиме работы ГЭС по сравнению с бытовым.

Таблица 1

$H_p, \text{ см}$	ΔT_n	Д н и					
		50	80	100	120	160	180
75	$\Delta T_n \text{ быт}$	25	9	- 2	-10	-22	-24
	$\Delta T_n \text{ зар}$	60	21	- 4	-24	-55	-64
150	$\Delta T_n \text{ быт}$		-12	-22	-30	-44	
	$\Delta T_n \text{ зар}$		-20	-30	-41	-60	
200	$\Delta T_n \text{ быт}$		-16	-32	-44	-52	
	$\Delta T_n \text{ зар}$		-22	-50	-66	-74	

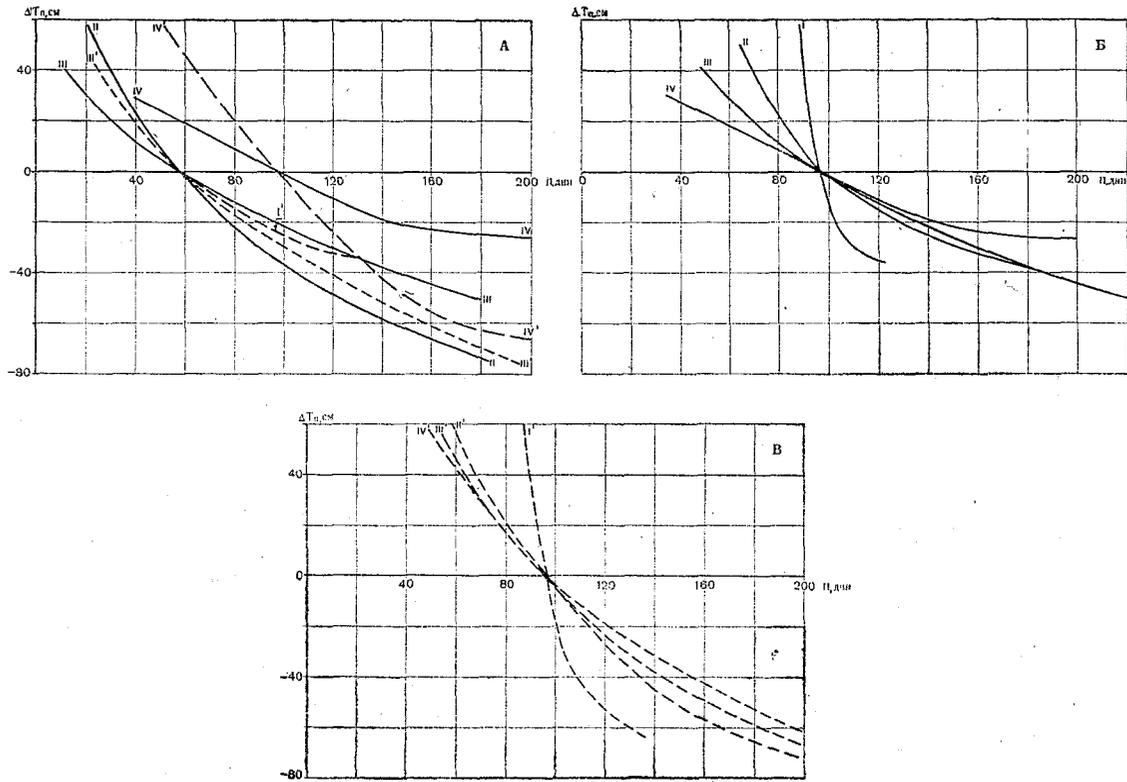


Рис. 4. Кривые зависимости $\Delta T_n = f(n)$:

А — расчетные; Б — совмещенные при бытовом режиме; В — совмещенные при зарегулированном режиме; I — $H_p = 300$ см;
 II — $H_p = 200$ см; III — $H_p = 150$ см; IV — $H_p = 75$ см (со штрихом при зарегулированном режиме)

По разработанной методике [1] рекомендуется строить графики спада в относительных величинах $\frac{Q_i}{Q_{\max}} = f(n)$, типизируя их в зависимости от абсолютной величины максимального расхода воды или других характеристик.

Действительно, кривые дифференцированных глубин строят обычно до начала навигации. В рассматриваемой методике для расчетов необходимо знать значения параметров n на будущую навигацию. Постепенно с развитием методов прогноза и расчетов гидрографов стока определение параметра n не будет представлять каких-либо трудностей. В настоящее же время построение типовых кривых $\frac{Q_i}{Q_{\max}} = f(n)$ представляется целесообразным и вполне оправданным.

В работе были проведены контрольные расчеты для оценки эффективности разработанной методики в условиях бытового и (отдельно) зарегулированного режимов стока на судоходном плесе Горький — Н. Ураковский перекат р. Волги. К сожалению, для контрольных расчетов были привлечены данные за те же годы наблюдений, которые были использованы для построения расчетных связей. Это существенно снижает объективность оценки методики в целом.

Однако задачей работы, как указывалось выше, являлось установление возможности применения разработанной расчетной методики к условиям зарегулированных рек. В связи с этим указанные недостатки оценки принципиального значения не имеют. Контрольные расчеты выполнялись как для условий бытового режима, так и для условий зарегулированного режима стока р. Волги. Результаты контрольных расчетов приведены в табл. 2 и 3.

Таблица 2

Оценка эффективности методики при бытовом режиме стока р. Волги

Абсолютная величина отклонений, см	Количество отклонений	
	абсолютное	в %
5	50	75,8
6—10	9	13,6
11—15	3	4,5
>15	4	6,1
Всего	66	100

Оценка эффективности методики при зарегулированном стоке р. Волги

Абсолютная величина отклонений, см	Количество отклонений	
	абсолютное	в %
5	22	40,8
6—10	13	24,1
11—15	11	20,4
>15	8	14,7
Всего	54	100

Как видно из табл. 2 и 3, результаты расчетов при бытовом режиме можно признать хорошими. Действительно 90% всех отклонений расчетных величин от фактических не превышают точности измерения глубины, т. е. ± 10 см. При этом необходимо отметить и второй немаловажный фактор. Кривые $\Delta T_n = f(n)$ проводились как нижние огибающие фактических данных. Тем самым учитывалось, что ошибки в сторону занижения расчетной величины по сравнению с фактической являются менее болезненными для водного транспорта, чем в сторону завышения, т. е. по данной методике производится расчет гарантированных величин.

При проведении кривых $\Delta T_n = f(n)$ по центрам тяжести групп точек, т. е. как осредняющих кривых, ошибки расчетов будут значительно меньше, а эффективность методики выше.

Несколько худшие результаты контрольных расчетов получены при зарегулированном режиме стока, обусловленном режимом работы Горьковской ГЭС. Как видно из табл. 3, только 65% всех отклонений расчетных величин находятся в пределах точности измерения (± 10 см), а около 35% всех отклонений превышает 10 см. Эти результаты указывают на необходимость дальнейшей доработки методики расчета кривых дифференцированных глубин с целью применения ее к расчету глубин на зарегулированных реках. Однако эту доработку и внесение коррективов в методику необходимо апробировать на ряде объектов. При расчетах же только по плесу р. Волги можно сделать лишь предварительные выводы и рекомендации.

Выводы

1. В результате проведенных разработок установлено, что при применении методики к зарегулированным рекам, надежность расчетов по разработанной методике снижается и последняя гаранти-

рует точность расчетов ± 10 см только в 65% всех случаев. При точности расчетов ± 15 см обеспеченность метода достаточно высока и составляет 85%.

2. Предлагаемая методика позволяет производить расчеты объемов землечерпательных работ, которые необходимо выполнить при принятой методике работ для получения заданных приращений глубин и тем самым оценить экономическую эффективность этих работ. В то же время методика позволяет выполнить и обратную задачу, т. е. рассчитать приращения глубин при заданных объемах землечерпания.

3. Рассматриваемая методика дает возможность применения долгосрочных прогнозов, в частности максимального расхода воды, даты его наступления и гидрографа стока, при расчетах транзитных глубин.

4. Совершенствование методики как в условиях бытового, так и в условиях зарегулированного стока следует производить посредством введения коррективов на отсутствие синхронности в изменениях глубин на лимитирующих перекатах судоходного плеса и уровня на опорном посту в период прохождения паводков, уточнения параметров, учитывающих саморазмыв перекатов и заносимость прорезей, методику трассирования судоходных прорезей и др.

ЛИТЕРАТУРА

1. Барышников Н. Б. Методика расчета кривой дифференцированных глубин при прогнозах уровня р. Иртыша. Труды ЛГМИ, вып. 23, 1965.
2. Барышников Н. Б. Прогнозы навигационного стока и минимальных транзитных глубин на судоходных реках. Труды ЛГМИ, вып. 7, 1958.
3. Барышников Н. Б. Расчет минимальных транзитных глубин на судоходных реках. Труды ГГИ, вып. 69, 1960.
4. Грущевский М. С. Волны попусков и паводков на реках. Гидрометеоздат, Л., 1969.
5. Доманевский Н. А. Эффективность дноуглубительных работ. Речиздат, М., 1947.
6. Кустов Л. И. Развитие путевых работ на Волге. Речиздат, М., 1947.
7. Маккавеев Н. И. Русло реки и эрозия в ее бассейне. Изд. АН СССР, М., 1955.
8. Федоров В. В. О построении и практическом использовании кривых зависимости транзитных глубин от уровней воды. Труды Академии речного транспорта, вып. 1, 1952.

А. К. Богданова, В. Н. Степанов

ВЛИЯНИЕ СПУТНЫХ И ВСТРЕЧНЫХ ТЕЧЕНИЙ НА ПОВЕДЕНИЕ ПЛОТНОСТНОГО ПОТОКА В ПРОСТРАНСТВЕ (КАЧЕСТВЕННАЯ ОЦЕНКА)

Явление свободного растекания плотностных потоков в трехмерном пространстве (без ограничения боковыми стенками) в природных условиях наблюдается весьма часто. К таким примерам следует отнести растекание более соленых и, как правило, более плотных струй средиземноморских вод в прибосфорском районе Черного моря, распространение средиземноморской струи в Атлантическом океане и многие другие примеры.

Поведение таких плотностных потоков, особенно в условиях движения окружающей среды, изучено крайне слабо. Имеющиеся сведения по натурным наблюдениям носят не систематический характер. Для иллюстрации на рис. 1 приведены конкретные случаи различного растекания средиземноморских вод в прибосфорском районе Черного моря по наблюдениям 1961 и 1962 гг. Поскольку рельеф дна постоянен, разность плотностей между втекающей средиземноморской и окружающей черноморской водой менялась незначительно, то различие в формах растекания соленых вод связано с воздействием меняющегося по направлению и скорости основного черноморского течения.

При оконтуривании струи средиземноморских вод лишь в отдельных случаях проводились наблюдения над течением, поэтому не представлялось возможным проследить механизм воздействия основного потока черноморских вод на движение и трансформацию плотностного потока. Некоторые ответы на эти вопросы можно получить путем моделирования плотностного потока в лаборатории.

В 1970 г. Институтом биологии южных морей АН УССР были начаты работы по моделированию процесса трансформации и взаимодействия плотностного потока со спутным и встречным течением основных вод. Моделирование проводилось в лаборатории водных исследований ЛГМИ. На первом этапе исследований ставилась задача качественной оценки рассматриваемого явления.

Опыты выполнялись в лотке размерами $0,4 \times 0,6 \times 13$ м со стеклянными стенками, так что можно было производить визуальные

наблюдения и измерения фронтальной скорости не только сверху, но и сбоку. Для расширения диапазона измерений траектории

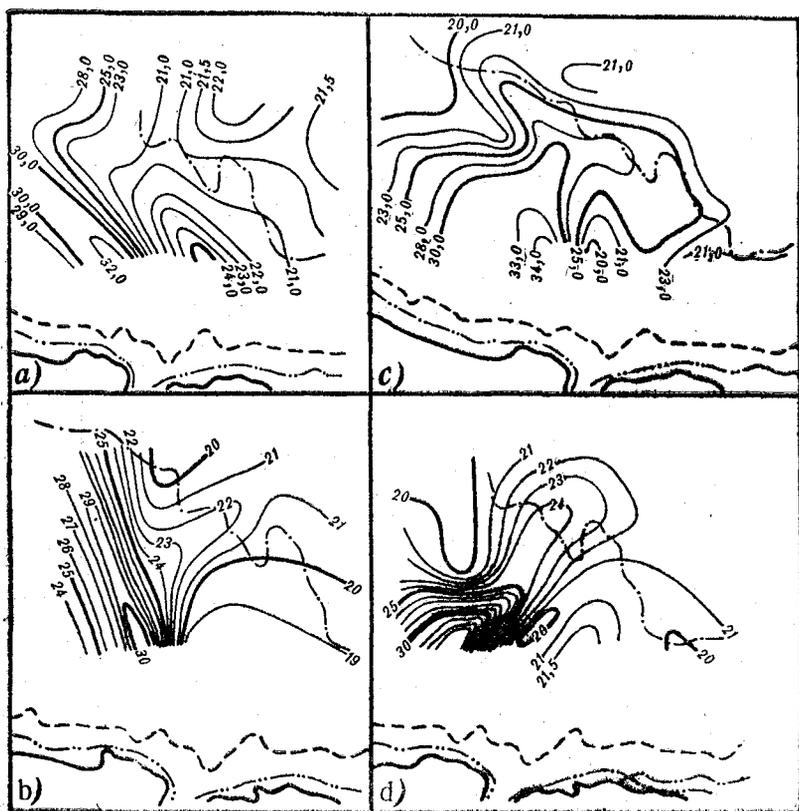


Рис. 1. Растекание средиземноморской струи ($S^0/00$) в придонном слое прибуфторского района Черного моря:
a — 13 — 15 октября 1960 г.; *b* — 21 — 22 февраля 1961 г.; *c* — 5 — 6 декабря 1961 г.;
d — 12 — 16 октября 1962 г.

струи в плане была принята схема рассеянного пополам потока и рассматривалась половина симметричного потока (рис. 2). Такой подход к решению подобных задач нередко встречается в практике гидродинамического моделирования. Здесь усложняются некоторые условия проведения опытов, а именно: требуется точное установление подстилающей поверхности в поперечных сечениях по горизонту, появляются дополнительные касательные напряжения в вертикальной плоскости оси симметрии. Что касается дополнительных потерь на трение у вертикальной стенки — аналога оси

симметрии потока, то ими можно пренебречь, вследствие несоизмеримо малой высоты по сравнению с шириной и длиной распространения потока:

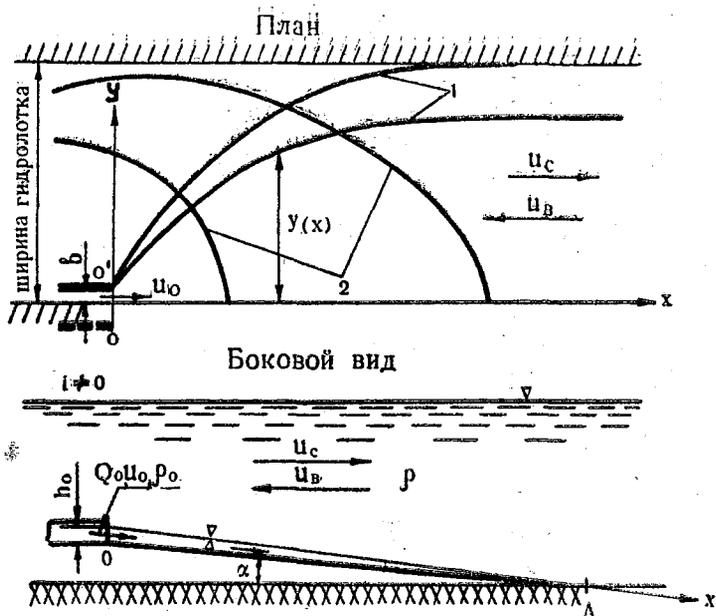


Рис. 2. Схема опытов:

\bar{u}_c , \bar{u}_v — обозначение спутных и встречных течений (осредненных на участке OA);
 1 — форма расширения струй в плане при спутном и слабом встречном течениях;
 2 — форма расширения струй в плане при относительно сильных встречных течениях.

Плотность жидкостей измерялась набором ареометров с точностью до $0,0001 \text{ г/см}^3$. Средняя скорость плотностного потока на выходе определялась по расходу Q_0 и площади поперечного сечения на выходе, т. е. $u_0 = \frac{Q_0}{b h_0}$, где b — полуширина линейного источника; h_0 — высота потока на выходе. Скорость движения фронта подкрашенного плотностного потока по подстилающей поверхности измерялась с помощью пяти секундомеров. Расширение потока в установившемся режиме непосредственно в каждом опыте наносилось на масштабную сетку, соответствующей сетке подстилающей поверхности.

Как для встречного, так и для спутного течений опыты проводились при углах наклона подстилающей поверхности $\alpha = 0^\circ 10'$, 5° и 10° и плотности нижнего потока $\rho_0 = 1,005$; $1,01$ и $1,02 \text{ г/см}^3$. В качестве основного верхнего потока служила водопроводная вода бассейна лаборатории ($\rho = 1,0 \text{ г/см}^3$). Координаты расширяющихся плотностных струй на масштабных сетках для каждого

опыта давались в безразмерных единицах, относительно ширины источника ($\bar{x} = \frac{x}{b}$ и $\bar{y} = \frac{y}{b}$). Траектории группировались в сводные графики для каждого угла наклона подстилающей поверхности.

Из большого числа выполненных опытов для иллюстрации результатов на рис. 3, 4 и в табл. 1 приводятся лишь наиболее характерные случаи. На рис. 3 представлены графики расширения струй в форме $y = f(x)$ при встречных и спутных течениях для $\alpha = 0^\circ 10'$ и 10° в установившемся режиме. Изменение фронтальной скорости $\bar{u}_f = f(x)$ в начальный момент формирования плотного потока при встречных спутных течениях верхнего потока представлено в виде графиков на рис. 4.

Эти графики дают качественную оценку явлению воздействия течений на динамику плотного потока не ограниченного боковыми стенками. В спокойной воде или при малых скоростях внешнего течения расширение потоков при $\alpha = 0^\circ 10'$ в пределах исследуемых плотностей ($\rho_0 = 1,005 \div 1,02 \text{ г/см}^3$) примерно одинаково. Замечено, что стабилизация контура потока при больших значениях $\Delta\rho = \rho_0 - \rho$ происходит быстрее. С увеличением наклона подстилающей поверхности относительное расширение потока при всех $\Delta\rho$ уменьшается. Например, при одной и той же разности плотностей ($\Delta\rho = 0,02$) и на одном и том же расстоянии от источника ($x = 10$) при наклоне подстилающей поверхности $\alpha = 5^\circ$ относительное расширение струи было равным примерно 12, а при $\alpha = 10^\circ$ $\bar{y} = 8$. При углах наклона подстилающей поверхности больше 5° при одних и тех же значениях скоростей встречного потока относительное расширение плотного потока уменьшается с ростом разности плотностей.

Таблица 1

Расширение струй								
№ кривой на рис. 3	1	2	3	4	5	6	7	8
$\Delta\rho = \rho_0 - \rho, \text{ г/см}^3$	0,02	0,02	0,02	0,005	0,01	0,01	0,005	0,005
α	10°	$0^\circ 10'$						
$\bar{u}_c, \text{ см/сек}$	0,5	2,92	14,3	6,25	—	—	—	—
$\bar{u}_B, \text{ см/сек}$	—	—	—	—	2,63	3,9	4,67	3,9
Фронтальная скорость								
№ кривой на рис. 4	1	2	3	4	5	6	7	
$\Delta\rho = \rho_0 - \rho, \text{ г/см}^3$	0,005	0,02	0,005	0,02	0,01	0,01	0,005	
α	10°	10°	$0^\circ 10'$	$0^\circ 10'$	$0^\circ 10'$	10°	10°	
$\bar{u}_c, \text{ см/сек}$	7,5	0,09	1,7	—	—	—	—	
$\bar{u}_B, \text{ см/сек}$	—	—	—	0,1	3,9	2,14	2,99	

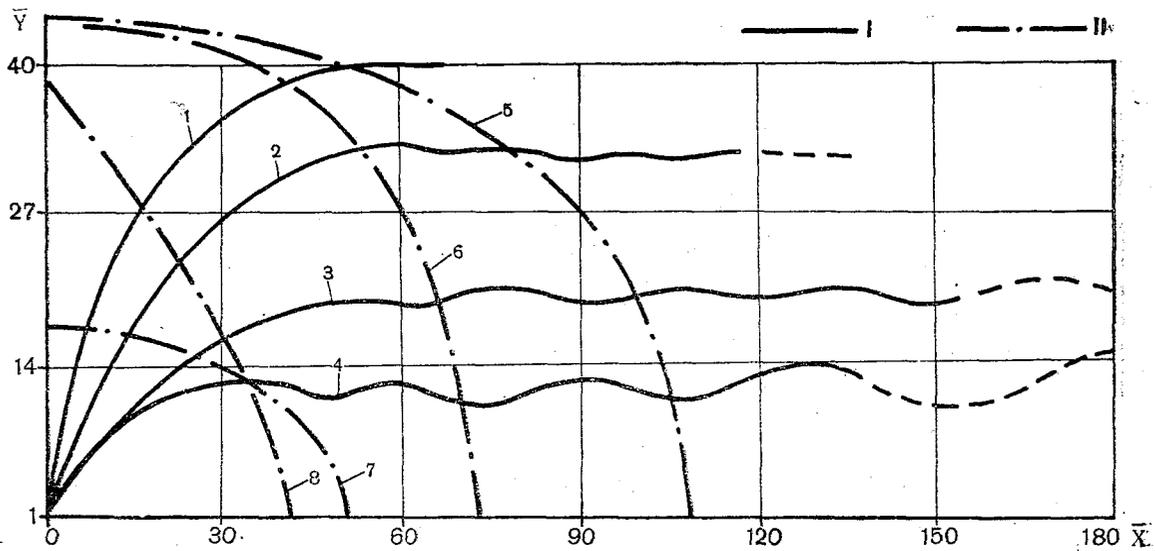


Рис. 3. Расширение струй:

I — спутное течение; *II* — встречное течение. Кривые 1–8 рассчитаны по данным табл. 1.

Фронтальная скорость потока u_{ϕ} при $u \approx 0$ во всех опытах постепенно уменьшается независимо от значений α и $\Delta\rho$. При встречных течениях с ростом скорости \bar{u}_v уменьшается устойчивость границы раздела потоков и увеличивается интенсивность перемешивания.

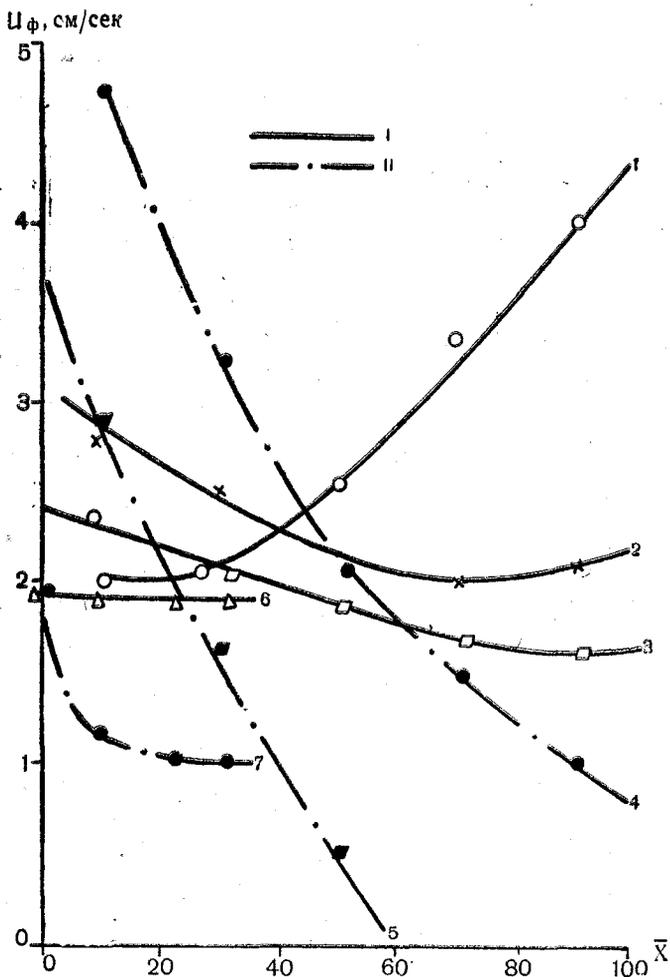


Рис. 4. Фронтальная скорость потока:

I — спутное течение; II — встречное течение. Кривые 1–7 рассчитаны по данным табл. 1.

вания. С дальнейшим возрастанием встречного течения происходит выклинивание плотностного потока, перемешанные воды увлекаются верхним течением. В этом случае плотностной поток расширяется к истоку. Чем больше относительная скорость основного

течения $\left(\frac{u_B}{u_0}\right)$, тем быстрее происходит выклинивание. С возрастанием скорости встречного течения происходит пропорциональное ему торможение движения фронта и при малых углах α скорости u_Φ падают почти линейно и значительно быстрее, чем при больших значениях α .

При спутных течениях с ростом \bar{u}_c происходит интенсивное перемешивание вод и относительное сужение потока более заметное при малых значениях α . Граница раздела и боковой контур потоков размываются и имеют в соответствующих плоскостях волновые очертания. Дальнейший рост скорости спутного течения приводит к полному разрушению потока или образованию своеобразного клина видимой границы потока, дальше которой происходит полное перемешивание вод. В наших опытах, например, для $\alpha=0^\circ 10'$

и $\Delta\rho=0,02$ это явление наблюдалось при $\frac{\bar{u}_c}{u_0} > 1,0$. Спутное течение увеличивает скорость движения фронта плотностного потока. При $\bar{u}_c > u_\Phi$ происходит постепенное вырождение потока, перемешанные воды на определенном удалении от выпуска принимают скорость основного течения.

Таким образом, спутные и встречные течения играют решающую роль в трансформации плотностных потоков, не ограниченных стенками канала. Первые результаты моделирования процесса воздействия встречного и спутного течений основных водных масс на поведение относительно небольшого плотностного потока позволяют понять причины различных форм фронта средиземноморских вод, наблюдавшихся в прибосфорском районе в разное время. Сейчас с большой долей уверенности можно предположить, что в октябре 1960 г. и в феврале 1961 г. (рис. 1, *a* и 1, *b*), когда отмечалась четко выраженная струя средиземноморских вод без выклинивания в районе исследований, основное черноморское течение совпадало с направлением движения средиземноморских вод. В октябре 1962 г. и декабре 1961 г. (рис. 1, *c* и 1, *d*) в исследуемом районе отмечалось выклинивание средиземноморских вод, но в октябре они растекались по более обширной площади по сравнению с декабрем. Подобное растекание средиземноморских вод, судя по данным моделирования, говорит о том, что черноморское течение было встречным по отношению движения средиземноморских вод.

Таким образом, даже первые результаты по моделированию поведения плотностного потока в пространстве при различных скоростях встречного и спутного течений основных масс раскрывают причины различного растекания средиземноморских вод в прибосфорском районе Черного моря.

ФОРМИРОВАНИЕ ФИЗИЧЕСКОЙ ГРАНИЦЫ РАЗДЕЛА РАЗНОНАПРАВЛЕННЫХ СТРАТИФИЦИРОВАННЫХ ПОТОКОВ В РЕЖИМЕ КВАЗИСТАЦИОНАРНОГО ДВИЖЕНИЯ

Изучение динамики разноплотностных, разнонаправленных потоков имеет существенное теоретическое и особенно практическое значение, например при расчетах прудов-охладителей, течений в морских проливах (Босфор, Дарданеллы, Гибралтар) и в ряде других задач, но этот вопрос слабо освещен в литературе.

Ряд случаев двухслойных разноплотностных потоков, например спутное течение, движение потоков в неподвижной среде (суспензионные потоки) или движение потока над неподвижной более плотной средой, изучены гидравликами несколько лучше. Следует отметить некоторые оригинальные работы: Тейлора [7], Поттера [6] и Тарнера [8] по изучению спутных течений двухслойных потоков; работы И. И. Леви [3], Н. П. Кулеша [2] и Л. В. Поборчей [4] по изучению суспензионных потоков, а также исследования термических стратифицированных потоков применительно к прудам и охладителям Б. В. Проскуракова [5], К. Я. Кинд [1] и др.

Если жидкость в бассейне состоит из двух или более слоев, стлечающихся по плотности или температуре, то в состоянии покоя физическая граница раздела между ними горизонтальна и четко выражена ($\gamma = 0$). При поступательном перемещении, хотя бы одного слоя, граница раздела меняет свое первоначальное положение, т. е. $\gamma \neq 0$. В дальнейшем под физической границей раздела понимается тонкий динамический слой, характеризующийся максимальным градиентом плотности. Этот слой четко выделяется в опытах при подкраске одного из потоков.

С целью изучения изменения положения границы раздела в зависимости от ряда реальных факторов нами проведены экспериментальные работы в лаборатории водных исследований Ленинградского гидрометеорологического института.

Опыты проводились в малом гидравлическом лотке с переменным уклоном размерами $10 \times 25 \times 400$ см. Разнонаправленные, разноплотностные потоки создавались путем использования разноплотностных растворов, вводимых в лоток с противоположных концов. Основной транзитный поток состоял из водопроводной

воды, встречный — из солевого или спиртового растворов различных концентраций. Солевой раствор применялся для создания нижнего потока, в опытах при $\frac{h_1}{h_2} > 1$ (h_1 и h_2 — глубина верхнего и нижнего потоков). Спиртовой раствор слабой концентрации применялся для получения верхнего потока при условии $\frac{h_1}{h_2} < 1$. Поток пресной воды в первом случае располагался выше раствора, а во втором — ниже его. Небольшая серия опытов (серия II) проводилась с подогретым верхним потоком.

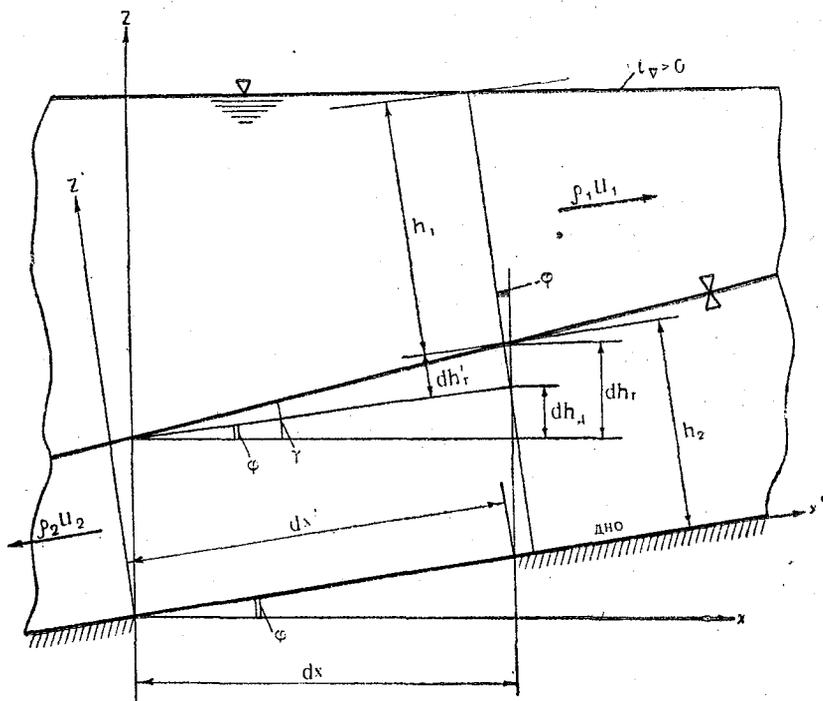


Рис. 1. Гидравлическая схема разнонаправленных стратифицированных потоков

На рис. 1 представлена гидравлическая схема потока. Выбор схемы обуславливался методикой проведения экспериментов. Измерение наклона дна лотка φ осуществлялось с помощью лабораторного нивелира, а глубин и других геометрических характеристик потоков — по мерным шкалам, установленным перпендикулярно дну лотка. Средняя скорость потоков определялась с помощью водослива, а максимальная — по движению нитевого облака, которое создавалось с помощью мелких кристаллов перманганата калия.

Учитывая малые размеры потока и его малые скорости, при измерении полей скоростей использовался метод фотокиносъемки подкрашенной жидкости. В качестве красителей применялись также кристаллы перманганата калия. При быстром погружении в поток кристаллы, растворяясь оставляют вертикальные следы в виде нитей, которые сохраняют свою устойчивость в пределах времени вполне достаточном для инструментального измерения скорости перемещения нитевого облака, а также его киносъемки.

В соответствии с рис. 1, наклон границы раздела двух разнонаправленных потоков на участке dx определяется как $\frac{dh_r}{dx} = \operatorname{tg} \gamma$.

Величина dh_r (перепад абсолютных высот границы раздела на участке) представляет собой сумму изменений перепадов высот дна dh_d и границы раздела относительно дна dh'_d :

$$dh_r = dh_d + dh'_d \frac{1}{\cos \varphi}. \quad (1)$$

Следовательно, уклон физической границы раздела можно охарактеризовать равенством

$$\frac{dh_r}{dx} = \frac{dh_d}{dx} + \frac{dh'_d}{dx'} \frac{1}{\cos \varphi}. \quad (2)$$

Величина $\frac{dh_r}{dx}$ зависит, главным образом, от соотношения расходов верхнего и нижнего потоков (Q_1 и Q_2). Для плоской задачи это соотношение равно соотношению единичных расходов (q_1 и q_2), $\frac{q_2}{q_1} = \frac{u_2 h_2}{u_1 h_1}$, где h и u глубина и средняя скорость потоков (индекс 1 соответствует верхнему потоку, а 2 — нижнему).

В условиях химической стратификации (солевой) для полной характеристики расходов верхнего и нижнего потоков необходимо учитывать соотношение их плотностей $\rho^* = \rho'_2 / \rho_1$. При термической стратификации следует учитывать различие вязкостей потоков введением средневзвешенного для двух потоков значения

$$\nu = \frac{\nu_1 \rho_1 + \nu_2 \rho_2}{\rho_1 + \rho_2}.$$

В условиях наших опытов достаточной характеристикой изменения осредненного положения физической границы раздела является корреляционная зависимость вида

$$\frac{dh_r}{dx} = f\left(\rho^* \frac{u_2 h_2}{u_1 h_1}\right). \quad (3)$$

Диапазон изменения основных параметров в опытах представлен в табл. 1, а значения величин ρ ; $\rho^* \frac{u_2 h_2}{u_1 h_1}$; $\frac{dh_d}{dx}$ изменялись в пределах:

$$0,99 \leq \rho \leq 1,03 \text{ г/см}^3; 0,01 \leq \rho^* \frac{u_2 h_2}{u_1 h_1} \leq 10; -0,0384 \leq \frac{dh_d}{dx} \leq 0,0207.$$

Таблица 1

Серии опытов	ρ_1	ρ_2	Уклон дна $i_d = dh_d / dx$	Количе- ство опытов	Примечание	
А	1,00	1,01	0,001 0,0207 0,013	4 3 3	Верхний поток — пресная вода; нижний поток — солевой раствор.	
Б	1,00	1,02	0,001 0,00575 0,013	3 3 4		
В	1,00	1,03	0,01 0,00575 0,013	3 3 3		
Г	1,00	1,005	0,001 0,00575 0,013	4 3 3		
Д	1,00	1,005	0,013	9		
Е	1,00	1,01	-0,0384 -0,0207 -0,013 -0,00575 0	2 2 2 2 3		
И	0,992	1,00	0,001 0,013	3 3		Верхний поток — подогретая вода; нижний поток — холодная вода.
К	1,00	1,01	-0,0207 0 0,0207	4 3 4		Нижний поток — солевой раствор.
М	1,00	1,01	-0,0207 0 0,0207	4 4 3		
Н	1,00	1,002	-0,0171 0 0,0207	3 2 3		
П	0,99	1,00	-0,0207 0 0,0207	3 7 3	Верхний поток — спиртовой раствор.	

На рис. 2 и 3 приведены расчетные зависимости (3), полученные по экспериментальным данным для гладкого (рис. 2) и шероховатого (рис. 3) русел.

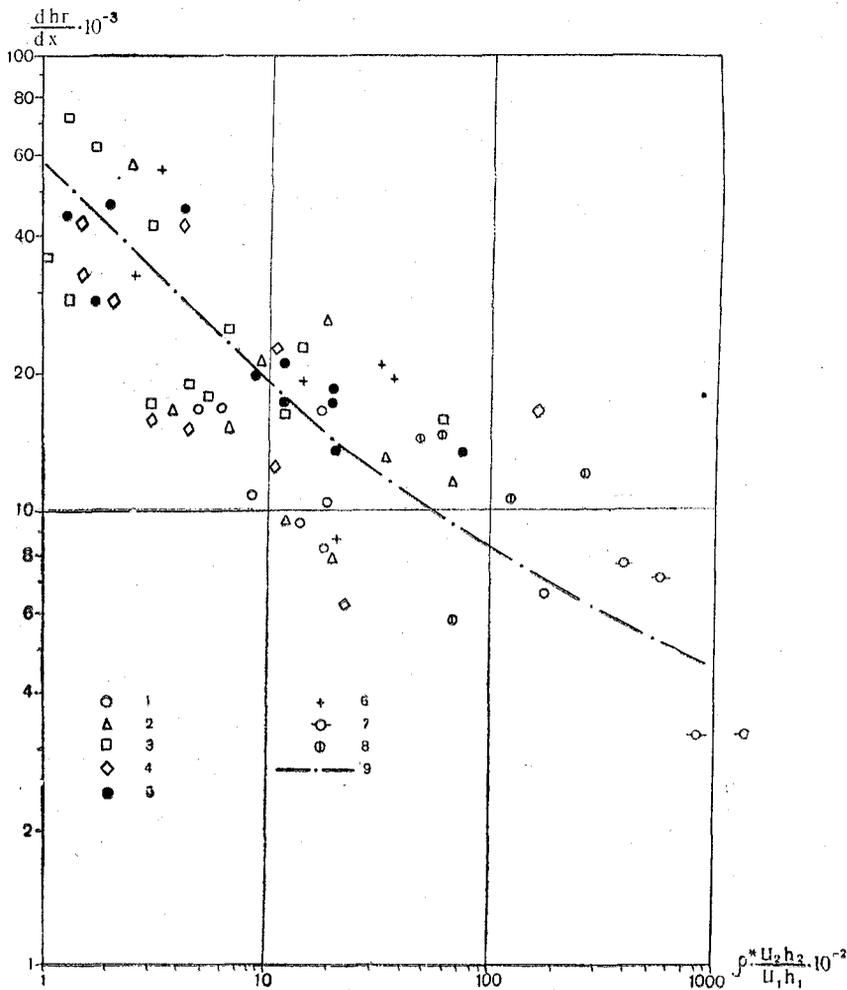


Рис. 2. Изменение наклона физической границы раздела разнонаправленных стратифицированных потоков в гладком русле:

1 — серия А; 2 — серия Б; 3 — серия В; 4 — серия Г; 5 — серия Д; 6 — серия Е; 7 — серия И; 8 — серия П; 9 — по формуле (4).

Большой разброс точек, соответствующих экспериментальным данным, в поле координат зависимости $\frac{dh_{\Gamma}}{dx} = f\left(\rho^* \frac{u_2 h_2}{u_1 h_1}\right)$ можно

объяснить волновым колебанием границы раздела потоков, ошибками измерений и нарушением стационарности процесса.

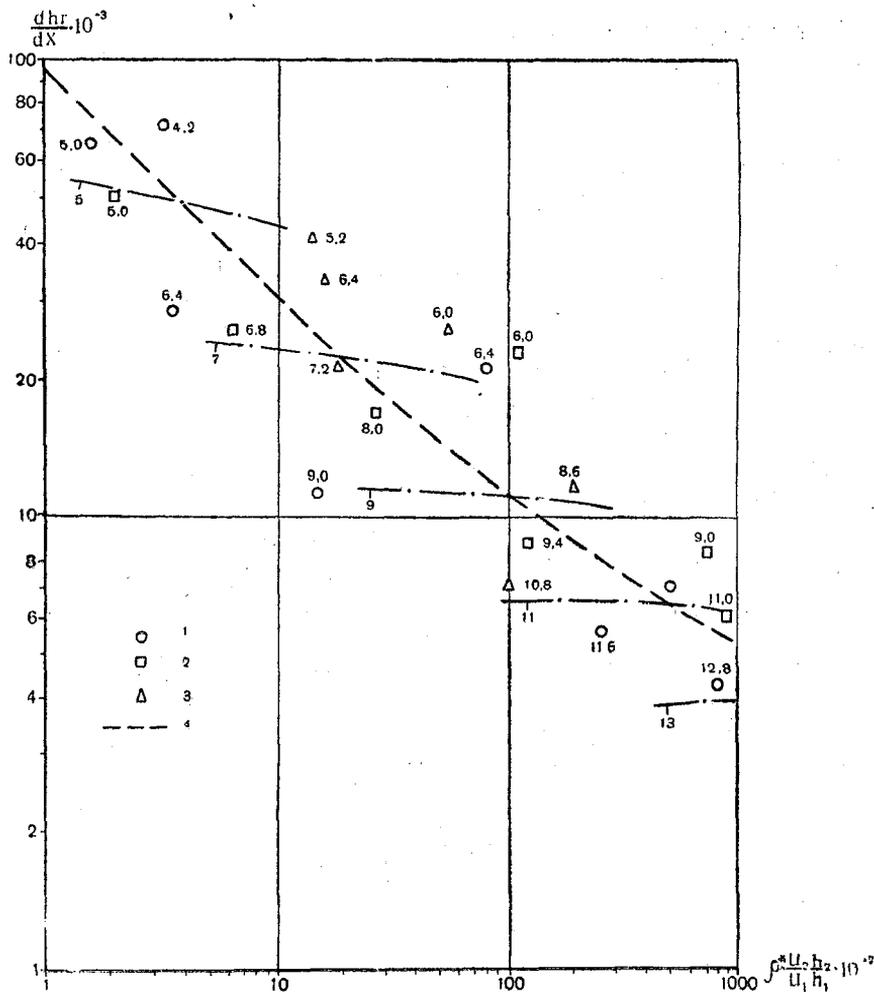


Рис. 3. Изменение наклона физической границы раздела разнонаправленных стратифицированных потоков в шероховатом русле: 1 — серия К; 2 — серия М; 3 — серия Н; 4 — по формуле (5); численные значения у опытных точек обозначают параметр шероховатости.

Используя общеизвестные методы подбора эмпирических формул по экспериментальным данным, нами получены приближенные уравнения положения физической границы раздела разнонаправленных стратифицированных потоков:

а) для гладкого русла (рис. 2)

$$\left(\frac{dh_r}{dx}\right)_r \approx 10^{-4} \exp \left[4,48 \left(\rho^* \frac{u_2 h_2}{u_1 h_1} \right)^{-0,0733} \right]; \quad (4)$$

б) для шероховатого русла (рис. 3)

$$\left(\frac{dh_r}{dx}\right)_ш \approx 10^{-4} \exp \left[4,66 \left(\rho^* \frac{u_2 h_2}{u_1 h_1} \right)^{-0,088} \right]. \quad (5)$$

Формулы (4) и (5) получены для условий изменения параметра $\rho^* \frac{u_2 h_2}{u_1 h_1}$ от 0,01 до 10.

В процессе экспериментов была принята попытка выяснения влияния относительной шероховатости $\frac{h_2}{\Delta}$ (Δ — абсолютная шероховатость) на положение физической границы раздела. Величина относительной шероховатости изменялась в пределах от 2 до 13 за счет изменения глубины потока h_2 , а значение шероховатости Δ оставалось постоянным.

Анализ результатов экспериментов позволил установить, что при $\rho^* \frac{u_2 h_2}{u_1 h_1} > 13$ влиянием шероховатости на положение физической границы раздела практически можно пренебречь, т. е. с увеличением глубины нижнего потока влияние шероховатости дна канала резко уменьшается.

Нами предпринята попытка унификации формул (4) и (5) посредством введения параметра k_Δ , учитывающего влияние шероховатости:

$$\left(\frac{dh_r}{dx}\right)_ш = k_\Delta \left(\frac{dh_r}{dx}\right)_r, \quad (6)$$

где

$$k_\Delta = \frac{\left(\frac{dh_r}{dx}\right)_ш}{\left(\frac{dh_r}{dx}\right)_r}. \quad (7)$$

В результате статистической обработки данных экспериментов получено приближенное аналитическое выражение для расчета параметра k_Δ :

$$k_\Delta \approx 1,87 - 0,058 \frac{h_2}{\Delta}. \quad (8)$$

Таким образом, подставив значение k_Δ по формуле (8) в формулу (6) получим

$$\frac{dh_r}{dx} \approx 10^{-4} \left(1,87 - 0,058 \frac{h_2}{\Delta} \right) \exp \left[4,48 \left(\rho^* \frac{u_2 h_2}{u_1 h_1} \right)^{-0,0733} \right]. \quad (9)$$

Уравнение (9) справедливо для $\frac{h_2}{\Delta} \leq 15$. При $\frac{h_2}{\Delta} > 15$ следует применять уравнение (4), независимо от шероховатости дна.

В соответствии с принятой схемой (рис. 1) для суспензионных потоков по Леви [3] при $u_1 = 0$, уравнение для расчета положения границы мутьевого потока можно записать:

$$\frac{dh_r}{dx} = \frac{\gamma' i_d - \left(\lambda_d + \frac{h_1 + h_2}{h_1} \lambda_r \right) \frac{u_2^2}{2g h_2}}{\gamma' - \alpha' \frac{u_2^2}{g h_2}}, \quad (10)$$

где $\gamma' = \frac{\gamma_2 - \gamma_1}{\gamma_1}$; γ_1 и γ_2 — удельный вес воды и взвесей; λ_d и λ_r — коэффициент сопротивления на нижней и верхней границах мутьевого потока; α' — коэффициент Буссинеска, учитывающий неравномерность распределения количества движения по глубине потока.

Таким образом, результаты данной работы позволяют оценить положение границы раздела двух разнонаправленных потоков, ограниченных боковыми стенками.

В заключение следует отметить, что данную работу нужно считать первой попыткой решения поставленной задачи, требующей дальнейшего продолжения исследований. Результаты наших исследований не свободны от некоторых погрешностей, в частности, обусловленных влиянием масштабного эффекта. Влияние последнего можно исключить путем постановки натуральных экспериментов или экспериментов на крупномасштабных моделях.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кинд К. Я. Исследование плотностных потоков. Труды координационных совещаний по гидротехнике, вып. XI, «Энергия», М.-Л., 1964.
2. Кулеш Н. П. Экспериментальное изучение основных характеристик донных потоков, образующихся в водохранилищах. Изв. ВУЗов МВО СССР, разд. строит. и архитект., № 8, Новосибирск, 1959.
3. Лев И. И. Теория донных потоков в водохранилищах. Изв. ВНИИГ, т. 62, Главэнергострой, М.—Л., 1959.
4. Поборчая Л. В. Суспензионные (мутьевые) потоки. «Океанология», № 5, 1962.
5. Проскуряков Б. В. Исследования теплового режима водоемов и водотоков. Труды совещания по современным методам расчета и моделирования температурных полей водоемов, Гидрометеоиздат, Л., 1966.
6. Potter O. E. Laminary boundary layer at the interface of co-current parallel streams Quart. J. Mech. and Appl. Math., vol. X, 3, 1957.
7. Taylor G I. An experiment on the stability of superposed streams of fluid. Proc. Cambridge Philos. Soc., vol. 23, 1927.
8. Turner S. S. The coupled turbulent transport of salt and heat across a sharp density interface. Intern. J. Heat Mass Transfer, vol. 8, 5 1965.

УЧЕТ ЛЕДОВОГО РЕЖИМА ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧ (на примере реки Томи)

В 1964—1969 гг. вдоль р. Томи была спроектирована и частично построена линия электропередач (ЛЭП), при этом основания опор размещались как на незатопляемых отметках, так и непосредственно на островах, берегах и поймах реки. Ряд оснований опор находится под воздействием русловых деформаций и ледовых образований. Учитывая, что в последние годы трассы ЛЭП не только пересекают реки, но все чаще проходят по их долинам, в Ленинградском гидрометеорологическом институте было проведено изучение влияния как русловых деформаций, так и ледовых образований на основания опор ЛЭП с целью выработки рекомендаций по их размещению в долинах полугорных рек и укреплению оснований опор действующей линии на р. Томи.

Вопросы воздействия русловых реформаций и рекомендации по уменьшению их влияния на основания опор ЛЭП освещены в статье авторов, написанной совместно с Г. В. Ивановым, а вопросы влияния ледовых образований в данной работе.

Особенностью ЛЭП является большое количество опор и, как следствие, необходимость обеспечения их невысокой стоимости. Поэтому методы, применяемые при расчетах устоев мостов, не всегда целесообразно применять для расчета креплений оснований опор ЛЭП, ибо последние являются менее капитальными сооружениями, чем мосты. При выходе из строя отдельных опор, убытки относительно невелики, тем более, чем при строительстве ЛЭП в современных условиях они, как правило, входят в энергетическое кольцо. Указанные предпосылки заставляют рассчитывать ЛЭП как специфические гидротехнические сооружения с учетом присущих им особенностей. Расчет таких сооружений зависит от их класса и, как правило, производится на основе уровней 2%-ной обеспеченности.

К сожалению, до настоящего времени отсутствуют научно-обоснованные технические указания и нормы учета влияния русловых деформаций и ледовых образований, учитывающие специфику именно этого типа сооружений.

С целью учета воздействия льда на основания опор ЛЭП, в 1968—1969 гг. были проведены экспедиционные работы на р. Томи, в результате которых были установлены как условия прохождения ледохода и образования зажоров и заторов, так и физические характеристики льда в весенний период.

Основания опор ЛЭП укреплены со стороны реки банкетками, сложенными из бетонных блоков, размерами $2,0 \times 1,3 \times 0,7$ м³ каждый и весом около 4,0 т. В соответствии с проектом блоки должны укладываться по периметру banquetки с обязательной перевязкой швов и соединением их между собой в рядах металлической проволокой. К сожалению, в ряде случаев эта установка проекта не выполнена строителями. В то же время соединение блоков между рядами проектом не предусмотрено и соответственно не сделано строителями. Высота таких banquetок у отдельных опор достигает 4—5 м (6—7 рядов блоков). Пространство между блоками ограждения и фундаментами опоры заполнено гравийно-галечной смесью.

В период экспедиционных исследований на р. Томи в качестве опорных были выбраны два участка длиной около 5 км каждый вблизи станций Теба и Бельсу. Избранные участки изобилуют островами, крутыми поворотами и перекатами. Все эти факторы способствуют образованию заторов. Помимо указанных, заторообразующими факторами в условиях р. Томи являются ледовые дороги — «зимники», служащие временными транспортными переправами через реки.

Зима 1968/69 г. была суровой и сопровождалась выпадением большого количества твердых осадков. Среднемесячные температуры воздуха по данным метеостанции Лужба приведены в табл. 1.

Таблица 1

Месяцы	XI	XII	I	II	III
Температура	-12,2	-19,0	-32,0	-25,0	-9,4

Минимальная среднесуточная температура воздуха, наблюдавшаяся в январе, достигла -44°C .

Ледостав, установившийся с 1-ой декады ноября 1968 г., стоял до 1-ой декады апреля 1969 г. Суровая зима, несмотря на обилие снега, вызвала интенсивный рост толщины льда, которая на отдельных участках реки достигла 1,0—1,2 м, при средней толщине 0,7—0,8 м. Местами сечение реки было в значительной степени зашуговано (рис. 1).

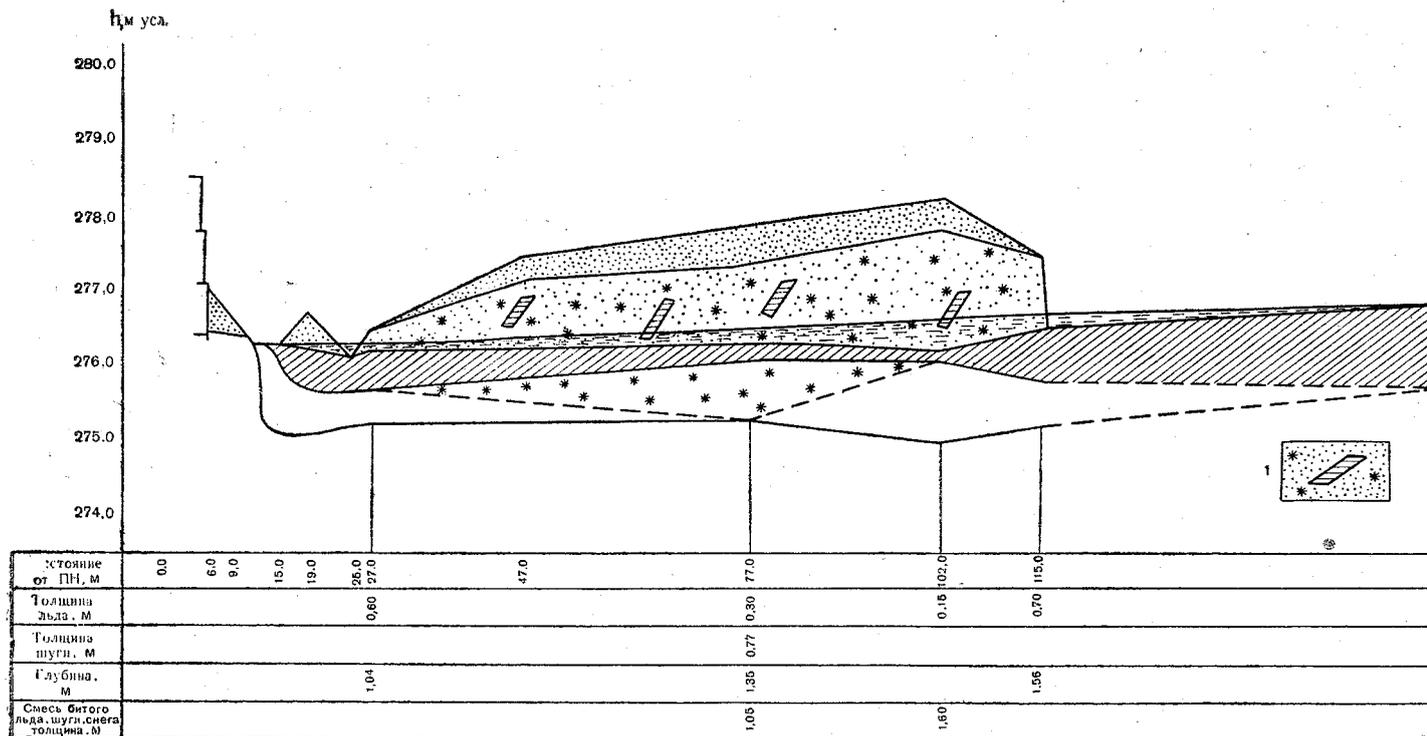


Рис. 1. Профиль поперечного сечения с ледовыми образованиями у опоры 82, по измерениям 13 апреля 1970 г.:
1 — смесь битого льда, шуги и снега.

Резкое повышение температуры воздуха в конце апреля, сопровождавшееся выпадением 80 мм осадков (за 2 дня), вызвало подъем уровня в реке и на ее притоках. 29 апреля приблизительно в километре выше станции Чарыш сформировался затор льда, который, взломав лед на нижерасположенном участке, продвинулся примерно на 2 км и остановился, вызвав угрозу затопления поселка Чарыш.

С целью ликвидации затора, железнодорожной службой была произведена серия мелких взрывов, которые не дали положительного результата. Поселок Чарыш был подтоплен местами до 1 м. Высота затора достигла 4 м. Мощный взрыв, произведенный в его голове, а также значительный напор воды (около 4 м) привели к прорыву затора. Образовавшаяся при этом масса льда продвинулась на 28 км и остановилась на островном участке ниже станции Лужба, вызвав подъем уровней до 4 м. Однако этот затор был

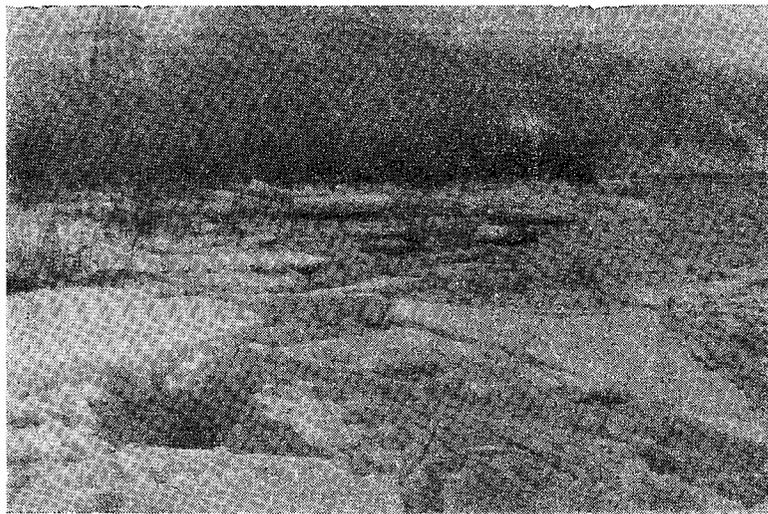


Рис. 2. Лед, выброшенный на берега реки у ст. Чарыш

кратковременным и через несколько часов его прорвало. При движении массы льда и воды после прорыва затора около 30%, находившегося на участке перед вскрытием реки, было выброшено на берега и поймы, в результате чего образовался ледяной коридор, по которому и прошла хвостовая часть заторной волны (рис. 2).

Таким образом, вскрытие р. Томи на участке длиной около 80 км (между станциями Чарыш и Бельсу) произошло в основном в результате механического воздействия заторных масс. В то же время на отдельных участках, особенно вблизи впадения притоков и выходов подземных вод, лед таял на месте, возникавшие промоины достигали 800 м в длину и 7 м в ширину.

Характер вскрытия реки, наблюдавшийся весной 1969 г., является типичным не только для верховьев Томи, но и для других полугорных рек, протекающих в близких к рассматриваемым климатических условиях.

Во время ледохода и в предшествующий ему период было произведено определение физико-механических характеристик льда и снега, необходимых для последующих расчетов.

Испытания прочности льда выполнялись методом ледяных клавиш непосредственно на реке. При этом использовались образцы, полученные из ледового покрова реки в предледоходный период и из льдин, выброшенных на берег в период ледохода. При помощи гидравлического пресса также были определены прочность льда на сжатие параллельно и перпендикулярно осям кристаллов как образцов льда в целом, так и его отдельных слоев (табл. 2 и 3).

Таблица 2

Соппротивление льда при изгибе (метод ледяных клавиш)

№ опыта	Направление излома	Длина консоли, см	Напряжение, кг/см ²	Температура воздуха, °С
1	Вниз	81	9,9	1,2
2	"	75	6,9	-0,6
3	"	82	8,7	0,4
4	"	79	9,8	-0,3
5	"	77	6,9	4,0
6	"	70	11,2	1,0
7	"	71	11,0	1,0
8	"	76	10,2	7,8
9	"	78	7,0	7,2
$\sigma = 9,1 \text{ кг/см}^2$				
1	Вверх	80	7,4	1,4
2	"	80	6,57	2,2
3	"	64	5,65	0,0
4	"	70	8,5	-1,8
5	"	70	6,18	-2,4
6	"	74	8,9	1,0
7	"	70	9,03	1,0
8	"	85	7,06	7,2
9	"	47	8,17	7,4
$\sigma = 7,5 \text{ кг/см}^2$				

Сопротивление кристаллического льда сжатию (в период ледохода)

Состояние поверхности	Слой льда, из которого взят образец (считая от поверхности), см	Размер образца, см	Напряжение, кг/см ²	Место взятия образцов	Направление сжатия по отношению к оси кристалла
Вода на льду	5—15	4,5×4,5×5,0	4	Опора 88, в 25 м от берега	Перпендикулярн
Вода на льду	5—15	4,5×5,0×5,0	6	Опора 88, в 25 м от берега	Параллельно
Вода на льду	15—25	5,5×5,5×5,0	20	Опора 88, в 25 м от берега	Перпендикулярно
		5,5×5,0×5,0	20		
Вода на льду	15—25	4,6×4,5×5,0	9	Опора 88, в 25 м от берега	Параллельно
		4,5×4,5×5,0	6		

Как видно из табл. 2 и 3, средние значения усилий при изломе клавиши вверх достигали 7,5 кг/см², вниз — 9,1 кг/см². Близкие значения получены и при испытании льда на сжатие параллельно оси кристаллов до 9,0 кг/см² и наибольшие при сжатии перпендикулярно оси кристаллов до 20 кг/см². Такие значительные различия напряжений можно объяснить разрушающим воздействием талой воды. Удельный вес льда по данным измерений составил 0,92 г/см³.

Довольно высокие значения прочности льда в период вскрытия можно объяснить теплоизолирующим действием снежного покрова, толщина которого на льду даже в предледоходный период местами достигала 100—150 см.

Воздействие льда на основания опор ЛЭП

Основания опор ЛЭП испытывали все виды ледовых нагрузок, но особенно большими были нагрузки во время движения масс льда после прорыва затора. Скорость движения этой массы достигала 3 м/сек и сопровождалась выталкиванием льда на берега и основания опор. При выталкивании льдин последние приподнимали и сдвигали бетонные блоки крепления опор в горизонтальном

направлении, что особенно четко прослеживалось у опор, где верхняя отметка валунно-галечной отсыпки не достигала верхнего ряда блоков (рис. 3). Размеры льдин, ударявших по основанию опор или вытолкнутых на берега реки, в пределе достигали 300 м^2 (15×20). В условиях р. Томи отмечено амортизационное действие снежного покрова. Так, у опоры 158 и в районе станции Таежная наблюдались навалы льда на снежном покрове толщиной до 1,5 м.



Рис. 3. Сдвиг льдом бетонных блоков основания опоры 82/2 (р. Томи в районе ст. Бельсу)

Основания опор, расположенных на вогнутых берегах крутого изгиба русла (например, опора 160), испытывают наибольшие нагрузки, возникающие от ударов одиночных льдин, а также при навалах льда при прорыве заторов.

Статистические нагрузки, возникающие при термическом расширении льда, оказываются существенными лишь при расположении опор непосредственно в русле реки.

С целью оценки влияния льда на основания ряда опор ЛЭП по формулам, приведенным в указаниях СН 76-66 [1], были произведены расчеты нагрузок, выполненные с учетом данных натурных исследований 1969 г.

1. Нагрузка $P_{зб}$ на вертикальные стены при ударе одиночных льдин:

$$P_{зб} = J v_{л} h \sqrt{\Omega A R_p} \sin \varphi^{\uparrow}.$$

¹ Условные обозначения, принятые в формулах, приведены в «Указаниях по определению ледовых нагрузок на речные сооружения СН 76-66».

2. Нагрузка на сооружение при навале зажорных масс:

а) перпендикулярно его фронту P_3 в т

$$P_3 = L_3 B (P_1 + P_2 + P_3 + P_4),$$

б) параллельно направлению течения P_6 в т/м

$$P_6 = \xi L_3 (P_1 + P_2 + P_3 + P_4).$$

3. Максимальная продольная нагрузка P_8 , возникающая при продвижении ледяного поля вдоль вертикального сооружения:

$$P_8 = AR_c h k f.$$

4. Статистическая нагрузка (P_T в т/м) на единицу длины фронта соприкосновения льда с сооружением, возникающая вследствие температурного расширения ледяного покрова:

$$P_T (R_c h + 2ah \nu \tau) S.$$

5. Нагрузка от навала ледяного поля, остановившегося у сооружения, P_n в т, действующая в горизонтальной плоскости вследствие течения воды и ветра:

$$P_n = P_1 + P_2 + P_3 + P_4.$$

В качестве примера в табл. 4 приведены результаты расчетов по ряду опор, находящихся под интенсивным воздействием ледовых образований. Действительно, расчетные значения нагрузок на основание опоры 81/2, находящейся непосредственно на берегу реки, от ударов одиночных льдин достигают 14,5 т/м, остальные же нагрузки не превышают 9,1 т/м.

В расчетах не учтены нагрузки вдоль опоры в направлении ее оси, возникающие при прорезании опорой ледяного поля, ввиду того, что размеры ледяных полей на р. Томи малы и не превышают 300 м², к тому же опоры ЛЭП расположены на берегах, заросших поймах и островах, затопляемых только в годы с исключительно высокими паводками.

На ряде опор (81/2, 158, 160 и др.) наблюдался следующий процесс разрушения оснований опор, укрепленных блоками. При движении льда после прорыва затора и при интенсивном ледоходе массы льда, выталкиваясь на берег, упираются в блоки верхнего ряда защиты основания опоры, приподнимают их и иногда даже опрокидывают. Особенно интенсивно этот процесс происходит при недостаточной засыпке основания валунно-галечной смесью и при отсутствии крепления блоков в рядах.

Расчет максимально допустимых нагрузок на данную конструкцию основания опоры выполнялся в предположении о том, что ледовые нагрузки могут вызвать сдвиг бетонных блоков защиты. Для верхнего ряда блоков (при отсутствии заполнителя внутри основания опоры):

$$P_{\text{бл}} = \frac{Gf}{l},$$

где G — вес блока (при отсутствии крепления) или блоков (при креплении); f — коэффициент трения; l — длина внешней части блока (блоков).

При наличии заполнителя необходимо также учитывать и его сопротивление сдвигу.

Результаты расчетов также приведены в табл. 4. Расчеты, по-видимому, целесообразно выполнять только для верхнего ряда блоков, ибо нижерасположенные блоки будут более устойчивы и для их сдвига необходимы значительно большие усилия. Тем более, что при разрушении вышерасположенного ряда блоков, сопротивление каждого последующего ряда резко уменьшается.

Результаты сравнения расчетных ледовых нагрузок и сил сопротивления (табл. 4) показывают, что на ряде опор крепление их оснований малонадежно. Причинами этого являются как отклонения от проекта при строительстве ЛЭП (отсутствие крепления блоков, недостаточная отметка отсыпки и др.), так и недостатки проекта (отсутствие крепления между рядами блоков, вертикальные стенки, форма основания опоры в плане и др.).

Таблица 4

Ледовые нагрузки на основания опор ЛЭП

№ п/п	Название нагрузок	Толщина льда, м	Величина нагрузки						Реакция блока багетки на сдвиг, т/м
			опора 160		опора 158		опора 81/2		
			т	т/м	т	т/м	т	т/м	
1	Нагрузка при ударе одиночных льдин в основание (P_{36})	0,9	226	15,0	193	12,9	97	14,5	1,0
	а) Нагрузка от навала загорных масс льда перпендикулярно его фронту (P_3)		194	11,4	166	7,6	54,5	9,1	1,0
	б) Нагрузка от навала загорных масс льда параллельно направлению течения (P_6)			10,5		6,8		8,1	1,0
2	Наибольшая продольная нагрузка, возникающая при продвижении ледяного поля вдоль вертикального сооружения (P_3)	0,9		6,2		6,2		6,2	1,0
3	Статическая нагрузка на единицу длины фронта соприкосновения льда с сооружением, возникающая при температурном расширении льда (P_m)	0,4		7,2		7,2		7,2	1,0
		0,9		22,0		11,0		22,0	
4	Нагрузка от ледяного поля, остановившегося у сооружения (P_H)	0,9		5,0		5,5		4,4	1,0

В результате анализа полевых и расчетных материалов можно привести ряд рекомендаций, направленных на улучшение проектирования и строительства ЛЭП, в частности при строительстве их оснований из сборного бетона:

1. Расчет верхней отметки крепления основания опор должен выполняться с учетом максимальных уровней заторно-зажорных явлений и ледохода, которые следует определить по данным полевых обследований.

2. При выборе места расположения опор ЛЭП необходимо учитывать гидроморфологию русел и пойм, максимально возможно сочетая форму основания опоры с формой берега. В частности, на излучине наиболее неблагоприятны условия установки опор на вогнутых берегах, более благоприятна установка опор на нижней части излучины.

3. Для уменьшения угла встречи льда с основанием опоры, защиту последней необходимо выполнять наклонной по вертикали и закругленной в плане.

4. При применении сборных конструкций целесообразно применять блоки конструктивно обеспечивающие крепления их в рядах и между рядами.

5. Необходимо периодически пополнять отсыпку основания опоры, не допуская снижения ее верхней отметки в предледоходный и паводочный периоды ниже отметки верхних блоков.

6. На крупных реках, где преобладающими могут быть статические нагрузки за счет температурного расширения льда, необходимо предусмотреть его окалывание у основания опор.

ЛИТЕРАТУРА

1. Указания по определению ледовых нагрузок на речные сооружения СН 76-66. Госстрой СССР, М., 1967.

ПОВЕДЕНИЕ ГИДРОМЕТРИЧЕСКОЙ ВЕРТУШКИ В ПУЛЬСИРУЮЩЕМ ПОТОКЕ

Гидрометрическая вертушка до настоящего времени продолжает оставаться самым распространенным и, пожалуй, одним из наиболее удобных приборов для измерения скорости течения воды в крупных водотоках. Несмотря на простоту устройства вертушки, теория ее до настоящего времени разработана недостаточно, что не позволяет судить о ее поведении в потоке с переменными по величине скоростями. Решение этой задачи позволило бы, во-первых, определить пределы, в которых гидрометрическая вертушка могла бы быть использована для измерения турбулентного потока и, во-вторых, оценить точность измерения средней скорости при наличии пульсации потока. В настоящей статье сделана попытка восполнить этот пробел.

Для вывода дифференциального уравнения движения ротора гидрометрической вертушки рассмотрим все моменты, действующие на него вокруг оси вращения.

Вращающий (полезный) момент

$$M_1 = A (U - k_r \omega)^2 \text{sign} (U - k_r \omega),$$

где A — коэффициент, зависящий от размеров и конфигурации ротора вертушки и параметров жидкости, кг; U — скорость потока жидкости, м/сек; k_r — геометрический шаг ротора вертушки, м/об; ω — угловая скорость вращения ротора, об/сек; символ $\text{sign} (U - k_r \omega)$ равен $+1$, если $U - k_r \omega > 0$, и равен -1 , если $U - k_r \omega < 0$.

Момент вязкого трения смазки в подшипниках и ступицы в жидкости

$$M_2 = - B \omega^2 \text{sign} \omega,$$

где B — коэффициент, зависящий от размеров ротора вертушки, жидкости и смазки, кг · м².

Момент сухого (кулонова) трения в подшипниках

$$M_3 = - C \text{sign} \omega,$$

где C — момент сухого трения, н · м.

Момент инерции ротора вертушки

$$I_0 + I_{ж},$$

где I_0 — собственный момент инерции ротора, $кг \cdot м^2$; $I_{ж}$ — момент инерции жидкости, увлекаемой ротором.

Очевидно, что $I_{ж}$ не является величиной постоянной и в общем случае может зависеть от скорости U набегающего потока и угловой скорости ω вертушки. Как показали экспериментальные исследования, для тяжелых вертушек типа Ж-3 величиной $I_{ж}$ можно пренебречь по сравнению с I_0 .

Так как при работе вертушки направление вращения ее ротора не меняется, то примем его за положительное ($\omega > 0$). Применяя теорему об изменении главного момента количества движения, получим дифференциальное уравнение движения ротора гидрометрической вертушки

$$2\pi(I_0 + I_{ж}) \frac{d\omega}{dt} + B\omega^2 + C = A(U - k_r \omega)^2 \text{sign}(U - k_r \omega). \quad (1)$$

Таким образом, поведение гидрометрической вертушки в движущемся потоке описывается нелинейным дифференциальным уравнением первого порядка с переменными коэффициентами. Это уравнение существенно отличается от уравнений, выведенных в [1, 5].

1. Рассмотрим установившееся движение при $U = \text{const}$. Очевидно при этом $\omega = \text{const} = n$, а $U - k_r \omega > 0$, следовательно,

$$Bn^2 + C = A(U - k_r n)^2.$$

Разделив правую и левую части на A и обозначив

$$k_r = a; \quad \frac{B}{A} = b \quad \text{и} \quad \frac{C}{A} = c,$$

получим после преобразований

$$U = an + \sqrt{bn^2 + c}$$

— характеристическое уравнение гидрометрической вертушки.

Выясним физический смысл коэффициентов b и c .

При $n = 0$, $U_0 = \sqrt{c}$, следовательно, $c = U_0^2$,

где U_0 — начальная скорость вертушки.

Для выяснения физического смысла b рассмотрим

$$\frac{dU}{dn} = k_r + \frac{bn}{\sqrt{bn^2 + U_0^2}}.$$

При увеличении n правая часть стремится к величине

$$k_r + \sqrt{b} = k,$$

где k — гидравлический шаг вертушки; следовательно,

$$\sqrt{b} = k - k_r.$$

При $n=0$ $\frac{dU}{dn} = k_r$. Заметим, что всегда $k > k_r$ из-за наличия момента вязкого трения жидкости.

Если $U_0 \ll (k - k_r)n$, что имеет место при достаточно большом n , то $U = kn$.

В общем случае

$$U = k_r n + \sqrt{(k - k_r)^2 n^2 + U_0^2}. \quad (2)$$

Величины k , k_r , b и c могут быть найдены для любой вертушки из ее свидетельства о тарировке. Например, для вертушки Ж-3 (свидетельство о тарировке № 33714 от 12 мая 1969 г.) эти коэффициенты равны $k = 0,257$ м; $k_r = 0,1803$ м; $\sqrt{b} = 0,0767$ м; $\sqrt{c} = 0,038$ м/сек.

2. Рассмотрим реакцию вертушки на ступенчатое изменение скорости потока ($U = \text{const}$).

Если $I_{ж}$ является функцией только U , то, разделив правую и левую части уравнения (1) на A и обозначив

$$2\pi \left(\frac{I_0 + I_{ж}}{A} \right) = \tilde{I},$$

получим

$$\tilde{I} \frac{d\omega}{dt} + b\omega^2 + U_0^2 = (U - k_r \omega)^2 \text{sign}(U - k_r \omega). \quad (3)$$

Пусть при $t \leq 0$, $U = 0$ и $\omega = 0$, а при $t > 0$, U — постоянная величина, больше нуля.

Тогда $U - k_r \omega > 0$, и решение имеет вид

$$\omega = n \frac{1 - e^{-\frac{t}{\tau}}}{1 - \eta e^{-\frac{t}{\tau}}},$$

где n — угловая скорость ротора вертушки в установившемся режиме, определяемая по формуле (2);

$$\eta = \frac{U k_r - \sqrt{b U^2 + (k_r^2 - b) U_0^2}}{U k_r + \sqrt{b U^2 + (k_r^2 - b) U_0^2}};$$

$$\tau = \frac{\tilde{I}}{2 \sqrt{b U^2 + (k_r^2 - b) U_0^2}}.$$

Величина τ , имеющая размерность времени, характеризует скорость изменения числа оборотов вертушки во времени и может быть условно названа ее постоянной времени. Поскольку постоянная времени вертушки зависит от скорости потока жидкости, причем с увеличением скорости потока постоянная времени уменьшается, то в пульсирующем потоке всегда будет иметь место завышение среднего значения скорости, измеряемого вертушкой, поскольку ротор ее раскручивается быстрее, чем замедляется.

На прямолинейной части характеристики вертушки

$$\tau = \frac{\bar{I}}{2\sqrt{b}U}, \quad \text{а } \eta = \frac{k_r - \sqrt{b}}{k_r + \sqrt{b}}.$$

Для вертушки Ж-3 величина \bar{I} определялась двумя различными способами: по моменту инерции ходовой части и по набору скорости в потоке воды. В первом случае было найдено $\bar{I} = 5,13 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$, а во втором — $6,6 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$.

Установить, какую часть в общем моменте инерции составляет $I_{\text{ж}}$ для вертушки Ж-3 не удалось. Возможно, величина $I_{\text{ж}}$ играет заметную роль у вертушек с малым собственным моментом инерции I_0 .

3. Для исследования частоты и амплитуды пульсации на поведение гидрометрической вертушки в турбулентном потоке, рассмотрим движение ее ротора в потоке, скорость которого изменяется по закону

$$U = U^0 + \Delta U \sin \Omega t, \quad (4)$$

где U^0 — среднее значение скорости потока; ΔU — амплитуда пульсации, причем $\frac{\Delta U}{U^0} < 1$; Ω — частота пульсации.

Так как уравнение (3) в этом случае не интегрируется, то линеаризуем его.

Перепишем уравнение (3) в виде

$$\bar{I} \frac{d\omega}{dt} = (U - k_r \omega)^2 \text{sign}(U - k_r \omega) - b\omega^2 - U_0^2. \quad (5)$$

Рассмотрим два первых члена правой части этого уравнения

$$y = (U - k_r \omega)^2 \text{sign}(U - k_r \omega) - b\omega^2.$$

Если $U - k_r \omega > 0$, то $y = (U - k_r \omega)^2 - b\omega^2$;

если $U - k_r \omega < 0$, то $y = -(U - k_r \omega)^2 - b\omega^2$.

Зависимость $y=f(\omega)$ представлена на рис. 1.

Поскольку в стационарном режиме угловая скорость ротора будет колебаться в окрестности точки M_2 , $\left(\frac{U}{k}; 0\right)$, то функция $y=f(\omega)$ может быть представлена в виде

$$y \approx \left(\omega - \frac{U}{k}\right) \frac{\partial y}{\partial \omega} \Big|_{\omega = \frac{U}{k}} \approx \frac{2\sqrt{b}}{k} U^2 \left(1 - \frac{k\omega}{U}\right).$$

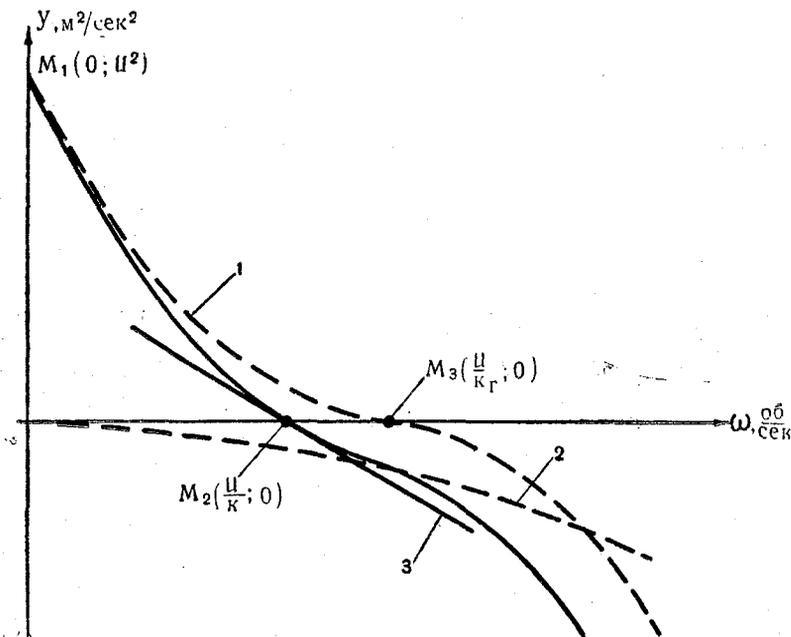


Рис. 1. Линейризация уравнения $y = (U - k_r \omega)^2 \text{sign}(U - k_r \omega) - b\omega^2$;
 1 - $(U - k_r \omega)^2 \text{sign}(U - k_r \omega)$; 2 - $b\omega^2$; 3 - $\frac{\partial y}{\partial \omega}(U - k\omega)$.

Подставляя это выражение в уравнение (5), получим

$$\dot{I} \frac{d\omega}{dt} = \frac{2\sqrt{b}}{k} U^2 \left(1 - \frac{k\omega}{U}\right) - U_0^2. \quad (6)$$

Это уравнение является более общим, чем уравнение предложенное Г. Х. Сабининым (5).

Будем искать решение уравнения (6) в виде ряда

$$\omega = \omega_{cp} + \alpha \sin \Omega t + \beta \cos \Omega t + \gamma \sin 2 \Omega t + \delta \cos 2 \Omega t + \dots \quad (7)$$

Ограничимся тремя первыми членами этого ряда, дающими первое приближение решения уравнения (6) при синусоидальном изменении пульсации скорости,

Подставляя решение (7) и его производную в уравнение (6), с учетом (4), методом неопределенных коэффициентов можно получить

$$\begin{aligned} \omega_{\text{cp}} &= \frac{U^\circ}{k} - \frac{U_0^2}{2\sqrt{b}U^\circ} + \frac{\Delta U^2}{2U^\circ k} \times \\ &\times \frac{\tilde{I}^2 \Omega^2 - 2k\sqrt{b}U_0^2}{\tilde{I}^2 \Omega^2 + 4bU^{\circ 2} \left[1 - \frac{1}{2} \left(\frac{\Delta U}{U^\circ} \right)^2 \right]}; \quad (8) \\ \alpha &= \frac{\Delta U}{k} \cdot \frac{4bU^{\circ 2} \left[1 - \frac{1}{2} \left(\frac{\Delta U}{U^\circ} \right)^2 \right] + 2k\sqrt{b}U_0^2}{\tilde{I}^2 \Omega^2 + 4bU^{\circ 2} \left[1 - \frac{1}{2} \left(\frac{\Delta U}{U^\circ} \right)^2 \right]}; \\ \beta &= -\frac{\Delta U}{k} \cdot \frac{\tilde{I} \Omega \left\{ 2\sqrt{b}U^\circ \left[1 - \frac{1}{2} \left(\frac{\Delta U}{U^\circ} \right)^2 \right] + k \frac{U_0^2}{U^\circ} \right\}}{\tilde{I}^2 \Omega^2 + 4bU^{\circ 2} \left[1 - \frac{1}{2} \left(\frac{\Delta U}{U^\circ} \right)^2 \right]}. \end{aligned}$$

Первые два слагаемые в правой части выражения (8) соответствуют угловой скорости ходовой части вертушки при отсутствии пульсации.

Обозначим

$$\omega^\circ = \frac{U^\circ}{k} - \frac{U_0^2}{2\sqrt{b}U^\circ}; \quad \Delta\omega = \sqrt{\alpha^2 + \beta^2}.$$

Рассмотрим величины $\frac{\omega_{\text{cp}} - \omega^\circ}{\omega^\circ}$ и $\frac{\Delta\omega}{\omega^\circ}$, представляющие особый интерес.

Первая из них определяет относительное изменение среднего значения угловой скорости ротора вертушки в пульсирующем потоке, а вторая — относительную амплитуду колебания ротора относительно среднего значения

$$\frac{\omega_{\text{cp}} - \omega^\circ}{\omega^\circ} = \frac{\sqrt{b}\Delta U^2}{(2\sqrt{b}U^{\circ 2} - kU_0^2)} \cdot \frac{\tilde{I}^2 \Omega^2 - 2k\sqrt{b}U_0^2}{\tilde{I}^2 \Omega^2 + 4bU^{\circ 2} \left[1 - \frac{1}{2} \left(\frac{\Delta U}{U^\circ} \right)^2 \right]}; \quad (9)$$

$$\frac{\Delta\omega}{\omega^\circ} = \Delta U \frac{\left\{ 4bU^{\circ 2} \left[1 - \frac{1}{2} \left(\frac{\Delta U}{U^\circ} \right)^2 \right] + 2k\sqrt{b}U_0^2 \right\} \sqrt{\tilde{I}^2 \Omega^2 + 4bU^{\circ 2}}}{(2\sqrt{b}U^{\circ 2} - kU_0^2) \left\{ \tilde{I}^2 \Omega^2 + 4bU^{\circ 2} \left[1 - \frac{1}{2} \left(\frac{\Delta U}{U^\circ} \right)^2 \right] \right\}}. \quad (10)$$

Исследуем эти величины.

$$\text{При } \Omega \rightarrow \infty \quad \frac{\omega_{\text{ср}} - \omega^{\circ}}{\omega^{\circ}} \rightarrow \frac{\sqrt{b} \Delta U^2}{2 \sqrt{b} U^{\circ 2} - k U_0^2},$$

$$\text{а } \frac{\Delta \omega}{\omega^{\circ}} \rightarrow 0.$$

Следовательно, с ростом частоты пульсации (и момента инерции ротора) среднее значение угловой скорости увеличивается (рис. 2 и 3).

Амплитуда колебаний ротора стремится к нулю (рис. 4 и 5).

Заметим, что завышение показаний слабо зависит от гидравлического шага вертушки.

При $\Omega \rightarrow 0$

$$\frac{\omega_{\text{ср}} - \omega^{\circ}}{\omega^{\circ}} = \frac{\Delta U^2}{2 U^{\circ 2}} \cdot \frac{k U_0^2}{(2 \sqrt{b} U^{\circ 2} - k U_0^2) \left[1 - \frac{1}{2} \left(\frac{\Delta U}{U^{\circ}} \right)^2 \right]},$$

а

$$\frac{\Delta \omega}{\omega^{\circ}} = \frac{\Delta U}{U^{\circ}} \cdot \frac{2 \sqrt{b} U^{\circ 2} \left[1 - \frac{1}{2} \left(\frac{\Delta U}{U^{\circ}} \right)^2 \right] + k U_0^2}{(2 \sqrt{b} U^{\circ 2} - k U_0^2) \left[1 - \frac{1}{2} \left(\frac{\Delta U}{U^{\circ}} \right)^2 \right]}.$$

Следовательно, с уменьшением частоты пульсации вертушка может даже занижать показания средней скорости пульсирующего потока. Если на линейной части характеристики ($U^{\circ} \gg U_0$) это занижение ничтожно, то на криволинейном участке при $U^{\circ} = 4 U_0$ и $\Delta U = U_0$ для вертушки Ж-3 занижение равно 0,4%. На криволинейном участке и амплитуда колебаний ротора не соответствует амплитуде пульсации скорости. При $U^{\circ} = 4 U_0$ и $\Delta U = U_0$ величина $\frac{\Delta \omega}{\omega^{\circ}}$ больше $\frac{\Delta U}{U^{\circ}}$ в 1,4 раза.

Таким образом, и на линейной части характеристики вертушки с ростом частоты пульсации и момента инерции ходовой части вертушки имеет место завышение показаний среднего значения скорости потока.

Этот вывод несколько отличается от вывода, сделанного в работах [2, 3, 4].

Для проверки приближенного решения линеаризованного уравнения (3), было проведено математическое моделирование уравнения (3) на электронной модели МН-7. На рис. 2, 3, 4 и 5 точками изображены результаты, полученные на модели МН-7.

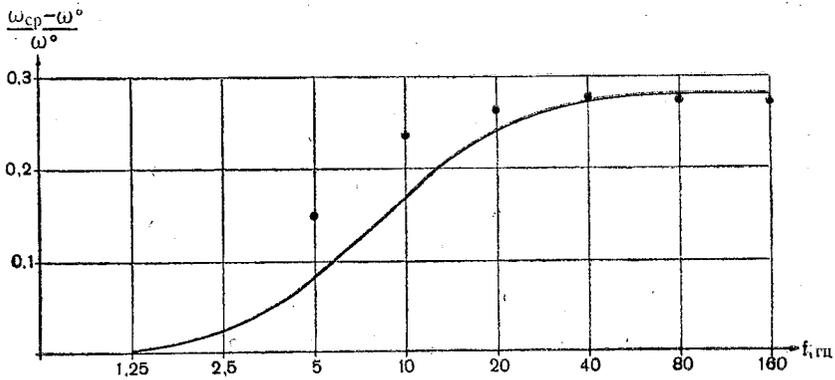


Рис. 2. Завышение среднего значения угловой скорости ротора вертушки в функции частоты пульсации на прямолинейной части характеристики вертушки при $U^0 = 2 \text{ м/сек}$, $\Delta U = 1,5 \text{ м/сек}$

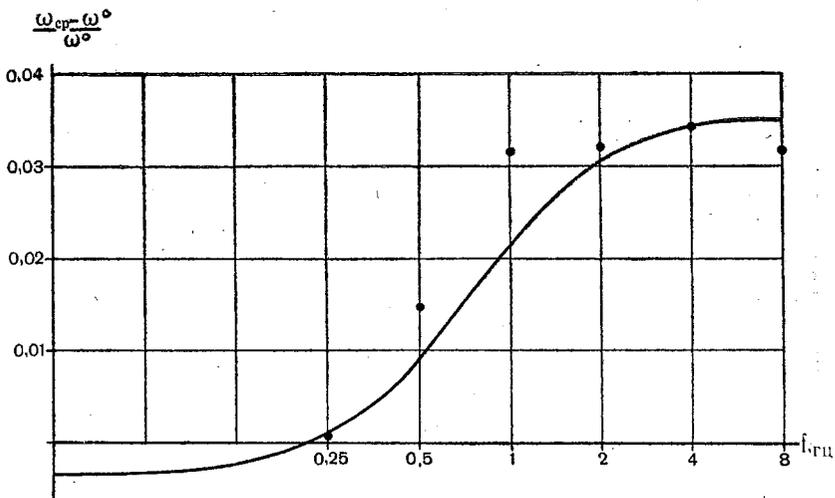


Рис. 3. Завышение среднего значения угловой скорости ротора вертушки в функции частоты пульсации на криволинейной части характеристики вертушки при $U^0 = 0,152 \text{ м/сек}$, $\Delta U = 0,038 \text{ м/сек}$

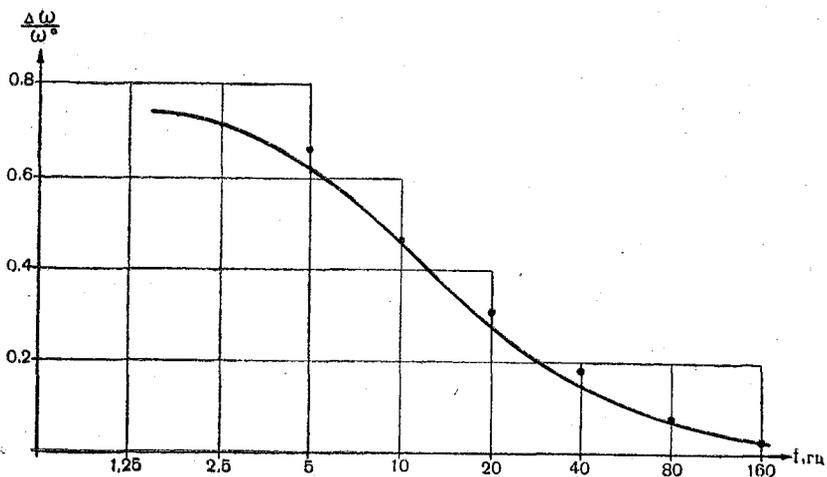


Рис. 4. Сглаживание амплитуды колебаний угловой скорости ротора вертушки в функции частоты пульсации на прямолинейной части характеристики вертушки при $U^\circ = 2$ м/сек, $\Delta U = 1,5$ м/сек

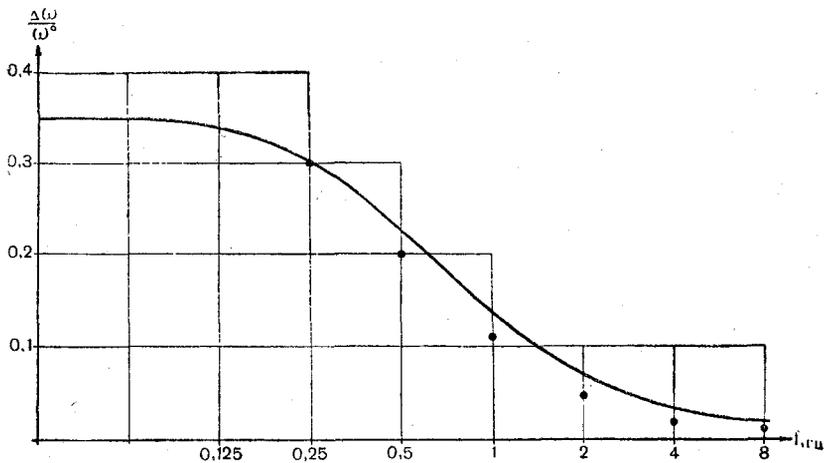


Рис. 5. Сглаживание амплитуды колебаний угловой скорости ротора вертушки в функции частоты пульсации на криволинейной части характеристики вертушки при $U^\circ = 0,152$ м/сек, $\Delta U = 0,038$ м/сек

Проведенные исследования поведения гидрометрической вертушки в пульсирующем потоке позволяют сделать следующие выводы:

1. Свойство гидрометрических вертушек завышать показания средней скорости пульсирующего потока присуще всем существующим в настоящее время вертушкам, независимо от их размеров и конфигурации.

2. Относительное завышение средней скорости пульсирующего потока зависит от частоты и квадрата относительной амплитуды пульсации.

3. При малых частотах пульсации (или малом моменте инерции ротора) на прямолинейном участке характеристики вертушка способна измерять скорость пульсирующего потока без искажений.

4. На криволинейном участке характеристики при малых частотах пульсации возможно даже занижение показаний. На этом участке неверно измеряется и амплитуда пульсации.

5. Для каждой гидрометрической вертушки в зависимости от величины ее момента инерции для прямолинейной части ее характеристики может быть установлена максимальная частота пульсации, ниже которой ее динамическая погрешность не превосходит статическую при любой амплитуде пульсации, не превышающей, разумеется, средней скорости.

6. Если для вертушки Ж-3 принять ее статическую точность 2%, то согласно формуле (9)

$$f_{\max} \approx \frac{\sqrt{b} U^0}{\pi I \sqrt{48}} \approx 0,7 U^0 \text{ (гц)},$$

где U^0 — скорость в м/сек.

ЛИТЕРАТУРА

1. Алтай Н. Н. Вопросы теории вращающихся анемометров. Башкирский гос. университет, вып. 20, серия матем. наук, 2, Уфа, 1965.
2. Бурцев П. Н. Влияние момента инерции лопастного винта на показания гидрометрической вертушки. Труды ГГИ, вып. 70, 1958.
3. Бурцев П. Н., Голубев В. С. К вопросу о влиянии момента инерции на показания гидрометрической вертушки и анемометра. Труды ГГИ, вып. 96, 1962.
4. Бурцев П. Н., Барышникова М. М. Анализ возможности использования гидрометрической вертушки в турбулентных потоках. Труды ГГИ, вып. 172, 1969.
5. Сабинин Г. Х. Зависимость показаний анемометров от структуры потока. Журнал геофизики, т. 7, вып. 2—3, 1937.

ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ МЕТОД АНАЛИЗА КРУПНОСТИ НАНОСОВ И ИЗМЕРЕНИЯ МУТНОСТИ

Существующие методы измерения мутности и анализа фракционного состава наносов являются весьма трудоемкими и требуют большого количества разнообразных приборов для фильтрования суспензии, высушивания фильтров, взвешивания наносов и, при необходимости, разделения их на фракции. Такие измерения, как правило, могут производиться лишь в специальных лабораториях или хорошо оснащенных экспедициях.

Одновременно с этим непрерывно велись поиски более совершенных методов измерения мутности [1, 2, 3]. Во всех этих методах используется зависимость коэффициента затухания от размеров и числа частиц в единице объема смеси.

Исследованиями [2] установлено, что радиоактивный метод имеет низкий порог чувствительности. Кроме того, этот метод нельзя рассматривать как общедоступный. Ультразвуковой метод измерения мутности неприемлем до тех пор, пока гидроакустические методы измерения параметров водных объектов не займут прочного положения в гидрометрии. Фотоэлектрический метод, пожалуй, является в настоящее время наиболее предпочтительным, однако реализовать его на практике можно лишь после всестороннего анализа методических и инструментальных погрешностей.

Хотя в литературе и имеется большое количество работ, посвященных фотоэлектрическому методу измерения мутности, однако теоретически этот метод обоснован недостаточно.

Настоящая статья ставит своей целью частично восполнить этот пробел.

По определению, мутностью ρ взвешенных наносов называется количество наносов в единице объема воды. Найдем выражение для мутности при произвольном фракционном составе наносов. Если все твердые частицы, число которых в единице объема равно N_0 , имеют один и тот же удельный вес γ_n , форму близкую к сферической, а крупность их распределена по некоторому закону $N(r)$, где $N(r)$ — число частиц в единице объема смеси, радиус которых не превышает r , то мутность наносов с радиусом частиц от r до $r + dr$ равна

$$d\rho = \frac{4}{3} \pi r^3 \gamma_n dN(r). \quad (1)$$

Если ввести в рассмотрение плотность распределения крупности наночастиц $n(r)$, причем

$$\int_0^r n(r) dr = N(r), \quad (2)$$

и, следовательно,

$$\int_0^{\infty} n(r) dr = N_0, \quad (3)$$

то

$$d\rho = \frac{4}{3} \pi r^3 \gamma_n n(r) dr. \quad (4)$$

Мутность всех фракций наночастиц равна

$$\rho = \frac{4}{3} \pi \gamma_n \int_0^{\infty} r^3 n(r) dr. \quad (5)$$

Рассмотрим возможность измерения мутности фотоэлектрическим методом.

Известно [4], что ослабление плоского монохроматического светового потока изменяется по закону

$$I = I_0 e^{-A\pi r^2 N L}, \quad (6)$$

где I_0 — величина светового потока, падающего на суспензию; I — световой поток, прошедший через слой суспензии толщиной L ; A — коэффициент, зависящий от размеров и расположения фотоэлектрического приемника; r — радиус частиц; N — число частиц радиуса r в единице объема.

Исследованиями [4] установлено также, что для n -компонентной смеси ослабление потока может быть представлено в виде

$$I = I_0 e^{-A\pi L \sum_{i=1}^n r_i^2 N_i}, \quad (7)$$

где r_i — радиус частиц i -ой фракции; N_i — число частиц радиуса r_i .

Очевидно в общем случае

$$I = I_0 e^{-A\pi L \int_0^{\infty} r^2 n(r) dr}. \quad (8)$$

Логарифмируя это выражение, можно получить

$$\ln \frac{I_0}{I} = A\pi L \int_0^{\infty} r^2 n(r) dr. \quad (9)$$

Таким образом, фотоэлектрический прибор может быть градуирован в значении

$$\int_0^{\infty} r^2 n(r) dr. \quad (10)$$

Сравнивая это выражение с выражением (5), видно, что такой прибор в общем случае при неизвестном фракционном составе нельзя градуировать в значении мутности ρ . Такая градуировка может быть сделана лишь для известного закона распределения частиц по крупности $n(r)$ или $N(r)$.

Поскольку фракционный состав наносов в потоке изменяется даже в пределах одной вертикали, то совершенно очевидно, что создать абсолютный фотоэлектрический мутномер невозможно.

Исследуем один частный случай, когда имеется однокомпонентная смесь. В этом случае

$$\rho = \frac{4}{3} \pi \gamma_n \int_0^{\infty} r_0^3 n(r) dr = \frac{4}{3} \pi \gamma_n r_0^3 \int_0^{\infty} n(r) dr = \frac{4}{3} \pi \gamma_n r_0^3 N_0, \quad (11)$$

а

$$\ln \frac{I_0}{I} = A \pi L \int_0^{\infty} r_0^2 n(r) dr = A \pi L r_0^2 N_0. \quad (12)$$

Из (11) и (12) можно найти

$$\rho = \frac{4}{3} \frac{\gamma_n}{AL} r_0 \ln \frac{I_0}{I}. \quad (13)$$

Из формулы (13), в частности, видно, что:

а) при одном и том же ослаблении светового потока $\left(\frac{I_0}{I}\right)$ мутность пропорциональна радиусу частиц;

б) если мутность наносов одинаковой крупности изменяется в m раз, то ослабление светового потока изменяется в e^m раз;

в) при одной и той же мутности изменение радиуса частиц в k раз изменяет ослабление светового потока в e^k раз.

Поскольку измерение мутности фотоэлектрическим методом невозможно, рассмотрим измерение мутности на фракциометре. Такая задача, по-видимому, впервые была поставлена Г. И. Швобсом [5]. В его работе было дано решение для определения мутности и фракционного состава наносов, осаждаемых на фракциометре, причем эти величины выражались через ослабление светового потока, радиус частиц, гидравлическую крупность частиц и время от начала осаждения.

Вычисление мутности и фракционного состава может быть существенно упрощено, поскольку между радиусом частиц и их гидравлической крупностью имеется однозначная функциональная зависимость.

В работе [6] даны следующие выражения, связывающие радиус частиц r с гидравлической крупностью ω :

а) ламинарный режим (радиус частиц от 0,0015 до 0,15 мм)

$$\omega = B r^2; \quad (14)$$

б) переходная область (радиус частиц от 0,15 до 1,5 мм)

$$\omega = C r; \quad (15)$$

в) турбулентный режим (радиус частиц свыше 1,5 мм)

$$\omega = D \sqrt{r}; \quad (16)$$

где B , C и D — коэффициенты, зависящие от вязкости воды и удельных весов воды и наносов.

Если в начальный момент в результате тщательного перемешивания все частицы равномерно распределены по некоторому объему воды, то к моменту времени t после начала осаждения на расстоянии H от поверхности будут находиться только те частицы, гидравлическая крупность которых будет меньше или равна

$$\omega = \frac{H}{t} \quad (17)$$

или, согласно, например, соотношению (16),

$$\frac{H}{t} = D \sqrt{r}. \quad (18)$$

Если вести непрерывные во времени измерения ослабления светового потока I от начала осаждения, то может быть получена зависимость $I(t)$. Покажем, что эта величина, ее производная $\frac{dI(t)}{dt}$ и время t могут быть использованы для измерения мутности как отдельных фракций, так и всех наносов.

Дифференцируя уравнения (5) и (8) по времени как сложные функции t и решая совместно, можно получить

$$\begin{aligned} \frac{d\rho}{dt} = -\frac{4}{3} \frac{\gamma_n}{AL} r \frac{1}{I(t)} \cdot \frac{dI(t)}{dt} = -\frac{4}{3} \frac{\gamma_n}{AL} \left(\frac{H}{D}\right)^2 \times \\ \times \frac{1}{t^2} \cdot \frac{1}{I(t)} \cdot \frac{dI(t)}{dt}, \end{aligned} \quad (19)$$

или

$$d\rho = P \cdot \frac{1}{t^2} \cdot \frac{1}{I(t)} \cdot \frac{dI(t)}{dt} \cdot dt, \quad (20)$$

где

$$P = -\frac{4}{3} \frac{\gamma_n}{AL} \left(\frac{H}{D} \right)^2.$$

Мутность наносов, радиус которых более 1,5 мм, равна

$$\rho = P \int_0^{t_1} \frac{1}{t^2 I(t)} \frac{dI(t)}{dt} dt,$$

где t_1 — время осаждения частицы радиуса 1,5 мм.

Интегрирование может быть заменено суммированием

$$\rho = P \sum_{i=1}^n \frac{1}{t_i^2 I(t_i)} \frac{dI(t)}{dt} \Big|_i \Delta t_i$$

методами численного интегрирования и дифференцирования, изложенными, например, в [7, 8].

Заметим, что поскольку в числителе стоит величина $dI(t)$, а в знаменателе $I(t)$, то масштаб этих величин не имеет значения и расчет может вестись в относительных единицах. Аналогично могут быть найдены выражения для переходного и ламинарного режимов:

а) переходный режим

$$\rho = Q \int_{t_1}^{t_2} \frac{1}{t \cdot I(t)} \frac{dI(t)}{dt} dt,$$

где

$$Q = -\frac{4}{3} \gamma_n \frac{1}{AL} \frac{H}{C},$$

t_2 — время осаждения частицы радиуса 0,15 мм;

б) ламинарный режим

$$\rho = R \int_{t_2}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{t} \cdot I(t)} \cdot \frac{dI(t)}{dt} dt,$$

где

$$R = -\frac{4}{3} \gamma_n \frac{1}{AL} \sqrt{\frac{H}{B}}.$$

Коэффициенты P , Q и R могут быть определены предварительной тарировкой прибора.

На основании изложенного могут быть сделаны следующие выводы.

1. Создание абсолютного фотомутномера в общем случае невозможно.

2. Абсолютное измерение мутности фотоэлектрическим методом может быть произведено при использовании фракциометра.

3. Измерение мутности отдельных фракций может быть произведено фотоэлектрическим методом без извлечения наносов из суспензии путем непрерывного измерения изменения светового потока во времени от начала осаждения первоначально перемешанной пробы с наносами.

ЛИТЕРАТУРА

1. Калитин Н. Н. Новый метод измерения количества взвешенных в воде твердых частиц. Научно-мелиоративный ин-т, 1924.
2. Димакиян А. М. О радиоактивном методе измерения концентрации речных наносов. Труды ГГИ, вып. 77, 1960.
3. Гибабишев В. Н., Ульшин В. А. О возможности ультразвукового метода измерения концентраций составляющих в трехкомпонентных средах. Прикладная акустика и вибрационная техника, Киев, 1968.
4. Архангельский М. М., Бунина Л. А. Физические основы оптического метода измерения концентрации речных наносов. Изв. АН СССР, сер. геофиз., № 5, 1955.
5. Швевс Г. И. Применение фотоэлектрического принципа для измерения мутности и крупности наносов. Труды ГГИ, вып. 141, 1967.
6. Гончаров В. Н. Динамика русловых потоков. Гидрометеоиздат, Л., 1962.
7. Гутер Р. С., Овчинский Б. В. Элементы численного анализа и математической обработки результатов опыта. Изд-во «Наука», М., 1970.
8. Румшинский Л. З. Математическая обработка результатов эксперимента. Изд-во «Наука», М., 1971.

ВЛИЯНИЕ ВЫБОРА ПЛОСКОСТИ ОТСЧЕТА ГЛУБИН НА ВЕЛИЧИНУ КОЭФФИЦИЕНТА СОПРОТИВЛЕНИЯ

Непостоянство коэффициентов в эмпирических формулах, предложенных различными авторами для расчета гидравлических сопротивлений, в значительной степени обусловлено различиями в методике обработки опытных данных. В первую очередь следует отметить различия в назначении плоскости отсчета глубин и в оценке действующей высоты выступов шероховатости.

К сожалению, до сих пор нет единого мнения в вопросе о том, как следует выбирать эти параметры. Кроме того, сами они часто не связываются друг с другом, а рассматриваются совершенно изолированно. В то же время в литературе имеются указания на то, что эти параметры зависят, в основном, от одних и тех же факторов. Это — размер выступов, густота их размещения (плотность) и форма выступов.

Таким образом, логично предположить, что учет перечисленных выше факторов удобно было бы производить при определении одного из параметров, например при выборе плоскости отсчета глубин, а второй параметр (действующая высота выступов шероховатости) назначался бы однозначно в разных исследованиях в зависимости от величины первого. Однако вопрос этот изучен недостаточно. Отсутствуют какие-либо определенные рекомендации по выбору плоскости отсчета глубин даже для наиболее простого случая искусственной шероховатости из более или менее одинаковых зерен грунта. Тем не менее, каждому исследователю при обработке экспериментальных данных, полученных в результате исследования шероховатых поверхностей, так или иначе приходится решать этот вопрос.

Действительно, при обработке опытных данных, относящихся к равномерному движению, коэффициент сопротивления λ вычисляется по известной формуле

$$\lambda = \frac{2gRI}{v^3}, \quad (1)$$

где R — гидравлический радиус потока; I — гидравлический уклон; v — средняя скорость потока; g — ускорение свободного падения.

Гидравлический радиус, входящий в формулу (1), вычисляется исходя из расчетной глубины, при назначении которой необходимо учесть ту часть площади живого сечения потока, которая занята выступами шероховатости, т. е. выбрать плоскость отсчета глубин. Вопрос о назначении плоскости отсчета глубин имеет особенно важное значение при расчете потоков малого наполнения, с малыми величинами относительной «гладкости» $\frac{R}{\Delta}$ (где Δ — действующая высота выступов шероховатости).

До настоящего времени мало внимания уделялось специальному изучению этого вопроса. Здесь можно отметить известные нам исследования А. Я. Слободкина [8], М. М. Овчинникова [5] и А. Л. Радюк [7].

Анализ работ по гидравлическим сопротивлениям показывает, что некоторые авторы принимают за начало отсчета глубин вершины выступов шероховатости. Так поступали, например, при выводе расчетных зависимостей для коэффициента сопротивления А. П. Зегжда [2], С. А. Яхонтов [11], И. К. Никитин [4].

Ряд исследователей: В. Н. Гончаров [1], В. И. Ефремов [6], Л. Г. Москвина [3] и некоторые другие принимали положение плоскости отсчета глубин для выровненных в один слой однородных зерен на расстоянии, равном половине действующей высоты выступов или на половине высоты слоя шероховатости.

И наконец, в последнее время в литературе появились указания на то, что плоскость отсчета глубин надо назначать где-то между полной высотой выступов и серединой их высоты. Здесь необходимо, в первую очередь, отметить работу М. М. Овчинникова [5]. Выполнив специальные исследования, он пришел к выводу, что на данном этапе изученности вопроса в случае однородной шероховатости с достаточно плотным размещением зерен плоскость отсчета глубин надо назначать ниже вершин выступов шероховатости на величину $\delta = (0,20 \div 0,25) \Delta$ или на расстоянии $(0,75 \div 0,8) \Delta$ от дна потока.

В значительной степени такое несоответствие в выборе плоскости отсчета глубин связано с различным представлением об этой плоскости и способом ее определения. Из имеющихся в литературе предложений по этому вопросу нам представляются наиболее правильными соображения М. М. Овчинникова, которые заключаются в следующем: под гидравлическим дном (а именно, оно должно определять положение плоскости отсчета глубин) условимся понимать среднее дно потока, обтекающего элементы шероховатости, а под геометрическим дном — некоторую условную плоскость, положение которой устанавливается объемным способом.

При этом гидравлическое дно должно всегда располагаться выше геометрического, так как при определении второго учитываются и те области, заполненные водой, которые не участвуют в переносе масс воды. Точнее сказать, они принимают участие в фор-

мировании расхода, но с некоторой фазой запоздания. Связано это с тем, что обтекание потоком шероховатого дна сопровождается образованием вихревых зон между отдельными элементами шероховатости, в которых вода находится во вращательном движении без какого-либо существенного участия в поступательном движении потока.

В связи с изложенным выше понятно, что объемный способ определения плоскости отсчета глубин, который предполагает установление геометрического дна в покоящейся жидкости, не является вполне правильным, хотя он и позволяет найти четкий ответ и дает однозначное решение вопроса в исследованиях разных авторов.

На несовершенство этого способа С. А. Яхонтов прямо указывает в своей работе [11], отмечая, что при таком способе определения глубин к потоку над выступами искусственно присоединяется часть жидкости с иными, по мнению автора, условиями движения между выступами. При этом С. А. Яхонтов, как нам кажется, приходит к другой крайности, считая, что плоскость отсчета глубин следует проводить по вершинам выступов. Объясняет он это тем, что указанный способ отсчета глубин геометрически определен и должен рассматриваться как единственно правильный в случае плотно расположенных выступов шероховатости, когда доля неучтенного расхода между выступами оказывается минимальной.

В литературе встречается и прямо противоположное мнение. Так, например, Ю. К. Фогель в работе [10] отмечает, что отсчет глубины от вершин выступов, как это иногда делается в теоретических и лабораторных исследованиях (при шероховатости, составляющей значительную долю от глубины), является грубейшей ошибкой, так как «средняя скорость и расход принимаются равными нулю там, где течет целая река».

Учитывая сказанное выше, следует отметить, что решение М. М. Овчинникова представляется наиболее правильным: оно сочетает в себе мнение С. А. Яхонтова и Ю. К. Фогеля, но, в то же время, исходит из необходимости определения положения гидравлического дна.

Универсального способа для определения гидравлического дна в настоящее время не существует. Критерием правильности выбора плоскости отсчета глубин служит сопоставление величин расходов воды, измеренных в эксперименте на водосливе и полученных расчетным путем в соответствии с правилами гидрометрии с использованием эпюр распределения скоростей.

В экспериментах, проводимых в гидравлической лаборатории ЛГМИ в 1968—1971 гг. с целью изучения закономерностей гидравлических сопротивлений в потоках повышенной шероховатости, также был использован описанный выше способ для определения положения гидравлического дна. Кроме того, выполнены специальные опыты по визуализации потока с шероховатой поверхностью дна, выложенной из зерен керамзита размером $d_{cp} = 2$ см. На вы-

ступ шероховатости наносилась краска на различном расстоянии от дна и по интенсивности ее размыва устанавливалось местоположение зоны нулевых скоростей. Следует отметить, что способ этот давал только качественную картину подтверждения расчетов.

В результате анализа опытных данных было установлено, что для шероховатой поверхности, созданной из однородных зерен керамзита или гравия округлой формы, при плотном расположении выступов, когда расстояние между ними не превышает размеры самих выступов, плоскость отсчета глубин следует назначать на расстоянии $0,8 \Delta$ (где $\Delta = d_{cp}$) от дна. Таким образом, выводы М. М. Овчинникова подтвердились и в наших экспериментах.

Для того чтобы показать, как в количественном отношении сказывается выбор плоскости отсчета глубин на результатах вычисления коэффициента сопротивления λ и его связи с относительной «гладкостью» $\frac{R}{\Delta}$ на опытном материале, полученном в гидравлической лаборатории ЛГМИ, были выполнены специальные расчеты.

При этом использованы данные двух серий опытов, выполненных в лотке прямоугольного сечения шириной 0,8 м, длиной 4 м. Дно лотка имело переменный уклон от $i = 0$ до $i_{max} = 0,072$. Стенки лотка стеклянные, дно покрывалось слоем однородного гравия, размеры которого менялись для разных серий опытов. За действующую высоту выступов шероховатости Δ принимался средний диаметр частиц гравия.

Экспериментальные данные охватывали диапазон чисел Рейнольдса от 1 600 до 50 000, относительная «гладкость» изменялась от 1 до 10. Во всех опытах относительная ширина потока $\frac{B}{h}$ (где B — ширина лотка, h — расчетная глубина) была больше 10, что позволяло считать поток плоским. Следует отметить также, что все экспериментальные данные, использованные для анализа, можно отнести с некоторым приближением к области квадратичного сопротивления.

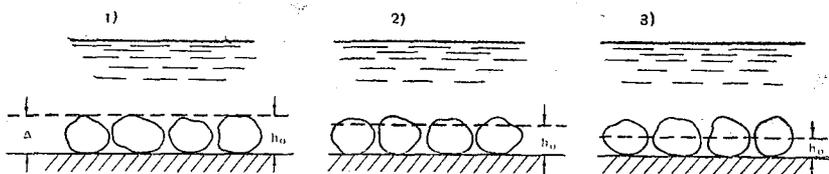


Рис. 1. Схемы потока при различных вариантах расположения плоскости отсчета глубин

С целью решения поставленной задачи обработка опытных данных проводилась в соответствии с тремя вариантами назначения плоскости отсчета глубин. На рис. 1 показано, как выбиралась эта плоскость в различных вариантах:

1) плоскость отсчета принималась на высоте вершин выступов шероховатости

$$h_0 = \Delta,$$

где h_0 — расстояние от дна лотка до плоскости отсчета глубин;

2) на расстоянии $0,8 \Delta$ от дна

$$h_0 = 0,8 \Delta;$$

3) на середине высоты выступов шероховатости

$$h_0 = 0,5 \Delta.$$

Пунктирной линией на рисунках показано положение плоскости отсчета глубин.

Результаты расчетов, выполненных по двум сериям опытов, представлены на рис. 2. Анализ графиков наглядно показывает, как в количественном отношении влияет выбор плоскости отсчета глубин на величину коэффициента сопротивления λ , кроме того, как вообще может отразиться этот выбор на связи коэффициента сопротивления с относительной «гладкостью» при различных вариантах назначения плоскости отсчета глубин.

Для того, чтобы оценить в количественном отношении различия в величине $\frac{1}{\sqrt{\lambda}}$ на рис. 3 в логарифмических координатах представлено распределение относительных отклонений этой величины с увеличением параметра $\frac{R}{\Delta}$. Отклонения вычислены в процентах от среднего варианта 2 и обозначены на графиках буквой σ . Результаты вычислений по обеим сериям дают хорошее совпадение.

Рассмотрение рис. 3 показывает, какие существенные расхождения (до 40%) могут возникнуть в расчетах величины $\frac{1}{\sqrt{\lambda}}$ при различном назначении плоскости отсчета глубин. Особенно велики расхождения для малых значений относительной «гладкости», при $\frac{R}{\Delta} < 5$, т. е. в потоках с очень большой шероховатостью. Такими же будут погрешности и при расчете пропускной способности в подобных руслах, так как расход воды прямо пропорционален величине $\frac{1}{\sqrt{\lambda}}$. Расхождения же в расчетах по двум крайним вариантам могут достигать 80—100% при вычислении расходов воды только за счет выбора плоскости отсчета глубин. Для значений $\frac{R}{\Delta} > 10$ отклонения не превышают 5%. При относительной

«гладкости» $\frac{R}{\Delta} = 30 \div 40$ влияние выбора плоскости отсчета глубин на величину $\frac{1}{\sqrt{\lambda}}$ становится мало заметным. Попутно отметим, что в литературе имеются указания на то, что выбор этого

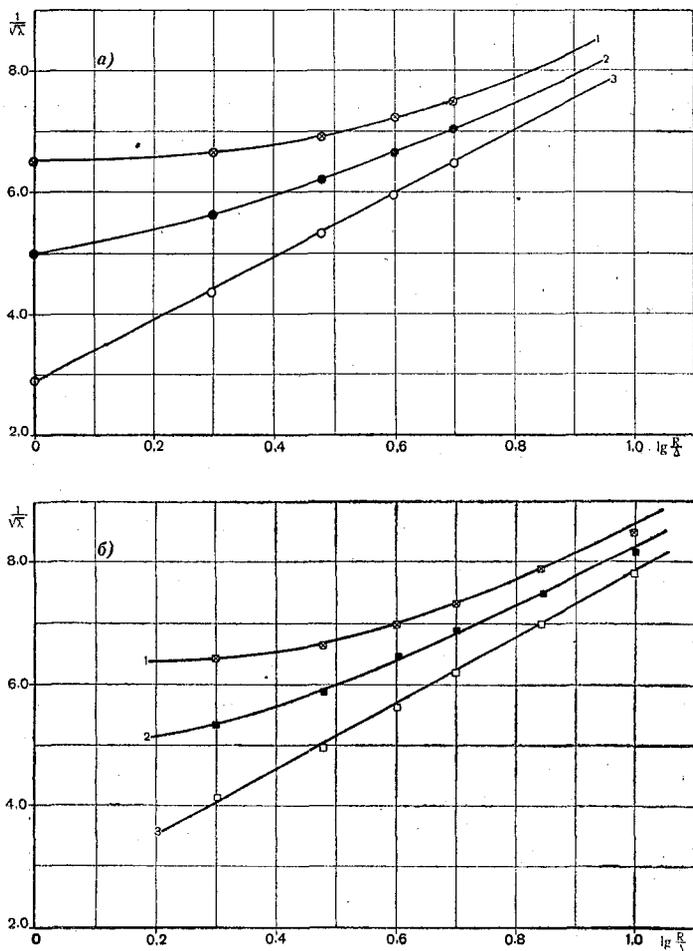


Рис. 2. График зависимости $\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = f\left(\lg \frac{R}{\Delta}\right)$ при трех вариантах назначения плоскости отсчета глубин:
 а - серия I (гравий $d_{cp} = 10$ мм); б - серия II (гравий $d_{cp} = 5$ мм); 1 - $h_0 = d_{cp}$;
 2 - $h_0 = 0,8 d_{cp}$; 3 - $h_0 = 0,5 d_{cp}$.

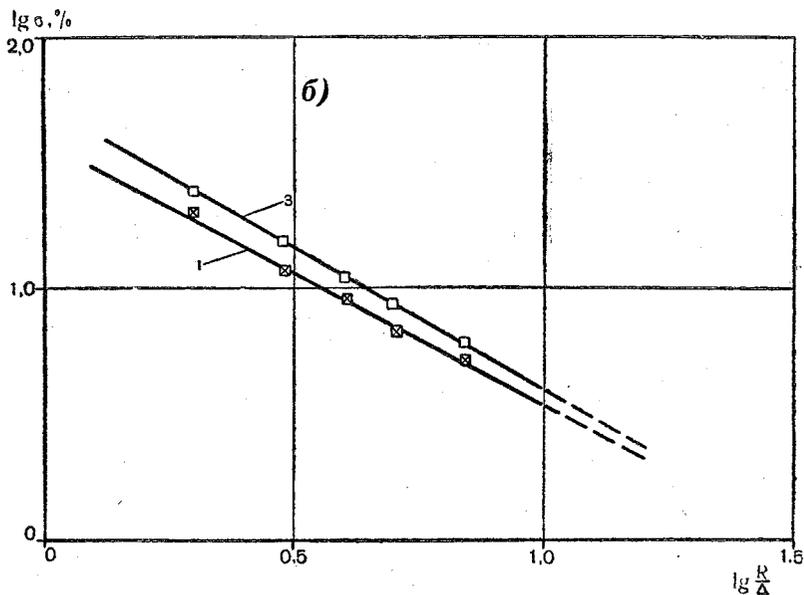
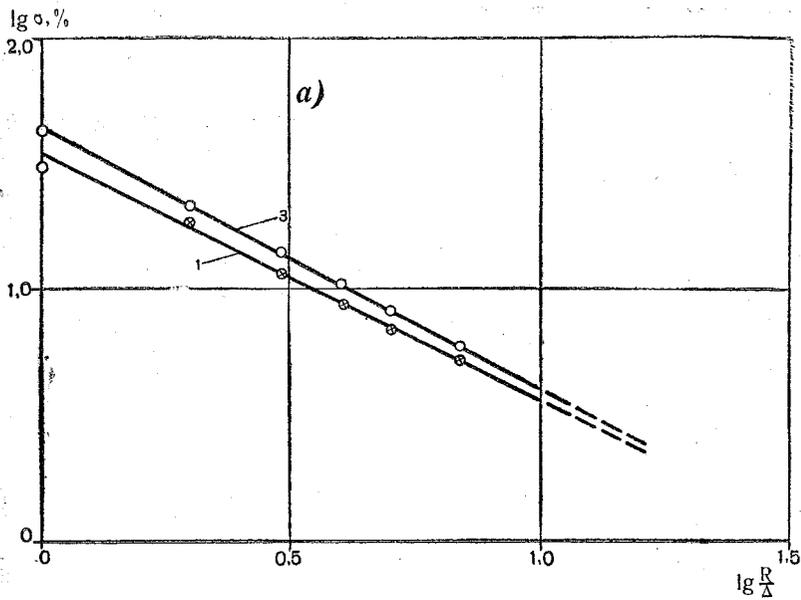


Рис. 3. Распределение относительных отклонений σ при двух различных вариантах назначения плоскости отсчета глубин:
 а — серия I; б — серия II; 1 — $h_0 = d_{\text{ср}}$; 3 — $h_0 = 0,5 d_{\text{ср}}$.

параметра, очевидно, должен сказываться только для значений $\frac{\Delta}{R} < 10$, но никакими специальными расчетами это не подтверждается.

Важное значение имеет и тот факт, что в области малых величин $\frac{R}{\Delta}$ существенно изменяется сам характер связи коэффициента сопротивления с относительной «гладкостью» в зависимости от выбора плоскости отсчета глубин. Анализ рис. 2 позволяет внести некоторую ясность в характер таких связей, полученных разными авторами.

Так, становится ясно, почему в опытах С. А. Яхонтова [11] получилось, что для очень малых значений $\frac{R}{\Delta}$ (меньше 5) коэффициент сопротивления λ остается постоянным с изменением $\frac{R}{\Delta}$, а его величина зависит только от вида шероховатой поверхности. Действительно, при назначении плоскости отсчета глубин на уровне вершин выступов (вариант 1) в диапазоне относительной «гладкости» $\frac{R}{\Delta}$ от 1 до 5 величина $\frac{1}{\sqrt{\lambda}}$ изменяется очень незначительно и потому автор мог прийти к подобному выводу. Но такой вывод С. А. Яхонтова ставит потоки с руслами повышенной шероховатости в исключительное положение, не увязывая их с потоками большого наполнения. На самом деле, как показывает рассмотрение рис. 2, потоки с очень малыми $\frac{R}{\Delta}$ ложатся на единую кривую с потоками, в которых $\frac{R}{\Delta} > 5$; правда, характер связи коэффициента сопротивления с относительной «гладкостью» при этом не является логарифмическим, как правильно подметил С. А. Яхонтов в своих выводах.

Другой крайний вариант назначения плоскости отсчета (вариант 3), при котором глубины отсчитываются от середины выступов шероховатости, ближе всего соответствует положению геометрического дна, определяемого объемным способом. Здесь зависимость для коэффициента сопротивления получается логарифмического типа. Такая зависимость в общем виде записывается следующим образом:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = A + B \lg \frac{R}{\Delta}, \quad (2)$$

где A и B — постоянные коэффициенты, определяемые опытным путем.

И наконец, при втором варианте назначения плоскости отсчета глубин, соответствующем гидравлическому дну, зависимость для коэффициента сопротивления получается степенного вида. Результаты анализа такой зависимости, полученной по опытным данным серий I и II, изложены в статье [9], там же описаны преимущества степенной формулы по сравнению с логарифмическими, предложенными ранее.

Таким образом, выполненный расчет позволяет в значительной степени объяснить те противоречия, которые были получены в опытах различных авторов, наглядно показывает, к каким выводам может привести тот или иной вариант назначения плоскости отсчета глубин. Отсюда становится ясным, как важно при сопоставлении формул для коэффициента сопротивления, полученных различными авторами, учитывать методику обработки опытных данных, а при использовании той или иной расчетной зависимости на практике учитывать, при каких условиях она была получена.

В заключение необходимо отметить, что назначение плоскости отсчета глубин по положению гидравлического дна нам кажется наиболее целесообразным. Очевидно, оно должно зависеть, по крайней мере, от трех факторов: от размеров, густоты размещения и формы выступов. Выяснение влияния этих факторов для различного рода шероховатых поверхностей должно явиться предметом специальных исследований.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гончаров В. Н. Динамика русловых потоков. Гидрометеиздат, Л., 1962.
2. Зегжда А. П. Гидравлические потери на трение в каналах и трубопроводах. Госстройиздат, Л.—М., 1957.
3. Москвина Л. Г. Экспериментальные исследования гидравлических сопротивлений при равномерном движении спокойного и бурного потоков. Труды ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева, вып. 52, 1969.
4. Никитин И. К. Турбулентный русловой поток и процессы в придонной области. Изд. АН УССР, Киев, 1963.
5. Овчинников М. М. Оценка сопротивлений порожистых участков сплавных рек. Изв. высших учебных заведений, Лесной журнал, № 4, 1965.
6. Полтавцев В. И., Ефремов В. И. Об особенностях гидравлического сопротивления открытых потоков при большой шероховатости русла. Труды ЛГМИ, вып. 25, 1967.
7. Радюк А. Л. Оценка величины сопротивления порожистых русел движению воды. Труды Сибирского технологического ин-та, сб. 41, 1967.
8. Слободкин А. Я. Сопротивление русел порожистых участков сплавных рек и эффективность их расчистки. Автореферат диссертации. Изд. ЛТА им. Кирова, Л., 1952.
9. Соколова В. А. Формула средней скорости равномерного потока, полученная на основе критериальной зависимости. Метеорология и гидрология, № 11, 1971.
10. Фогель Ю. К. Исследование коэффициента шероховатости безнапорных туннелей. Изв. ТНИСГЭИ им. А. В. Винтера, т. 16, 1965.
11. Яхонтов С. А. К определению коэффициента гидравлического трения для потоков с высокой шероховатостью. Гидротехническое строительство, № 8, 1962.

СОДЕРЖАНИЕ

	Стр.
<i>Н. Б. Барышников.</i> Влияние поперечных перемещений масс жидкости на пропускную способность русел с поймами	3
<i>В. А. Розанов.</i> О динамике взаимодействующих потоков главного русла и поймы на прямолинейных участках	12
<i>Н. Б. Барышников, Г. В. Иванов.</i> Взаимодействие руслового и пойменного потоков при пересечении их осей	23
<i>А. А. Левашов, С. В. Шмидт.</i> К вопросу о деформациях русла и поймы реки Надым	32
<i>Е. С. Субботина, С. В. Шмидт.</i> Некоторые особенности деформаций речных русел и пойм в условиях многолетнемерзлых грунтов на примере рек Полуи и Надым	39
<i>Н. Б. Барышников, Г. В. Иванов, А. А. Левашов.</i> Оценка влияния русловых деформаций на основания опор линий электропередач	45
<i>Н. Б. Барышников, И. Б. Цитлис.</i> Методика расчета кривой дифференцированных глубин в условиях зарегулированного стока реки Волги	57
<i>А. К. Богданова, В. Н. Степанов.</i> Влияние спутных и встречных течений на поведение плотностного потока в пространстве (качественная оценка)	69
<i>В. Н. Степанов, Н. Б. Барышников.</i> Формирование физической границы раздела разнонаправленных стратифицированных потоков в режиме квазистационарного движения	76
<i>Н. Б. Барышников, А. А. Левашов.</i> Учет ледового режима при проектировании линий электропередач (на примере реки Томи)	84
<i>И. А. Арбузов.</i> Поведение гидрометрической вертушки в пульсирующем потоке	94
<i>И. А. Арбузов, А. А. Попова.</i> Фотоэлектрический метод анализа крупности наносов и измерения мутности	104
<i>В. И. Полтавец, В. А. Соколова.</i> Влияние выбора плоскости отсчета глубин на величину коэффициента сопротивления	110

УДК 551.482.215

Влияние поперечных перемещений масс жидкости на пропускную способность русел с поймами. Барышников Н. Б. Труды ЛГМИ, 1972, вып. 46, стр. 3—11.

Работа посвящена анализу данных экспериментов, выполнявшихся на модели русла и поймы при параллельности их осей. Экспериментальным путем изучены вопросы изменения пропускной способности русел с поймами при различных условиях взаимодействия: при отсутствии перетекания масс жидкости, при перетекании жидкости из пойм в русло и наоборот из русла на пойму. Установлено, что наибольшее уменьшение пропускной способности русла в пределе достигающее 35—40% по сравнению с изолированным, наблюдается при перетекании жидкости из пойм в русло и зависит от угла встречи потоков. При перетекании жидкости из русла на пойму изменение пропускной способности русла незначительно.

При значительных глубинах поймы роль эффекта взаимодействия руслового и пойменного потоков мала.

Илл. 3. Библ. 18.

УДК 551.482.215

О динамике взаимодействующих потоков главного русла и поймы на прямолинейных участках. Розанов В. А. Труды ЛГМИ, 1972, вып. 46, стр. 12—22.

Рассматривается динамика взаимодействующих потоков главного русла и поймы на прямолинейных участках. Работа выполнена на экспериментальном материале, полученном в лаборатории водных исследований Ленинградского гидрометеорологического института.

В предлагаемой работе автор выделяет, при сложном механизме движения потоков главного русла и поймы, три различных типа взаимодействия последних. Первый тип движения взаимодействующих потоков рассматривается при перетекании части пойменных масс воды в русловую часть, третий тип — при перетекании части русловых масс воды на пойму и второй тип, когда не наблюдается перетекания пойменных масс в русло или русловых на пойму.

Для каждого типа взаимодействия потоков приводится анализ как качественный, так и количественный кинематической структуры и других гидравлических характеристик взаимодействующих потоков. В конце работы приводится ряд основных выводов по динамике взаимодействующих потоков.

Илл. 3. Библ. 14.

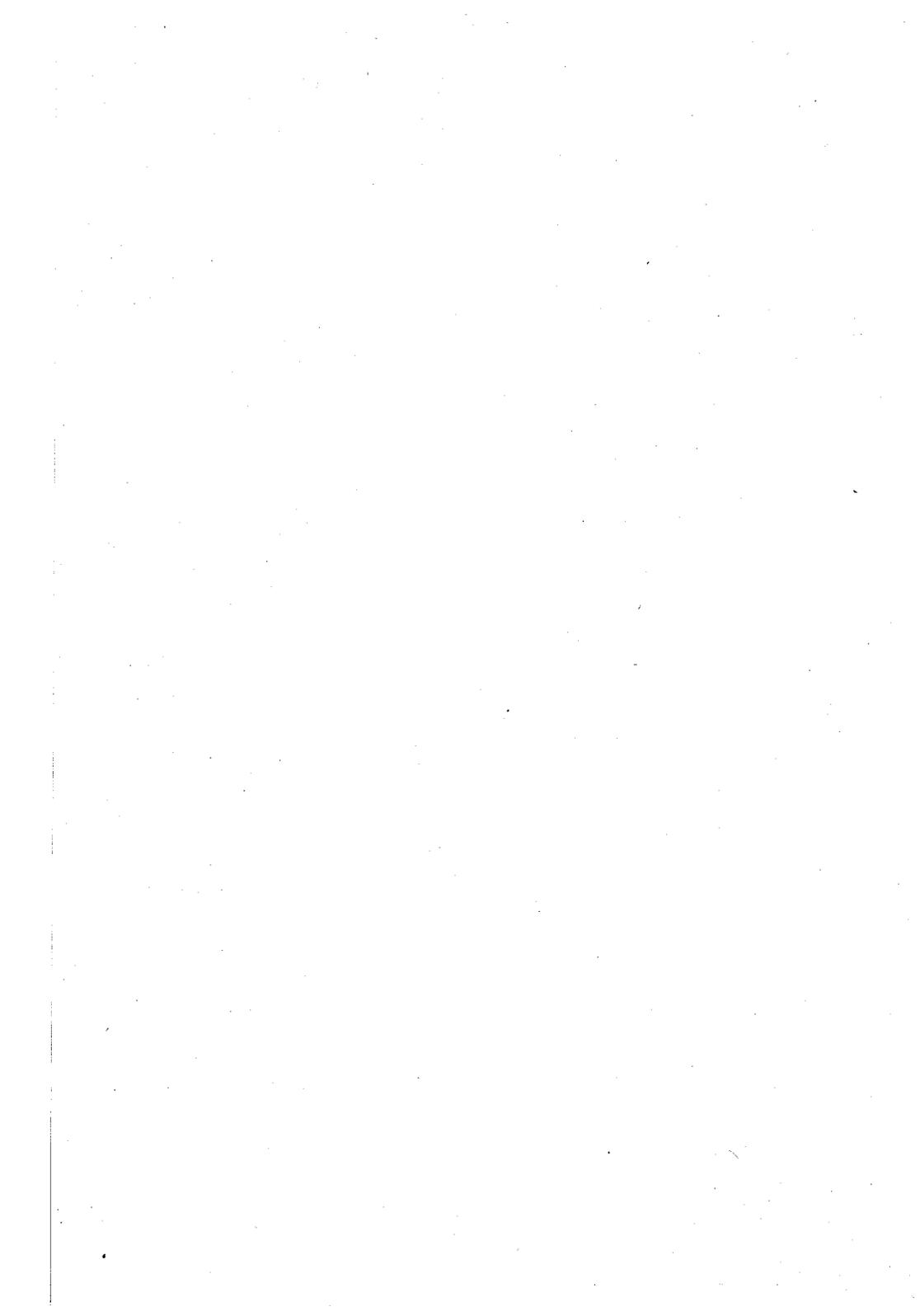
УДК 551.482.215

Взаимодействие руслового и пойменного потоков при пересечении их осей. Барышников Н. Б., Иванов Г. В. Труды ЛГМИ, 1972, вып. 46, стр. 23—31.

В статье излагаются основные результаты экспериментов по изучению взаимодействия руслового и пойменного потоков при пересечении их осей под углом 45°.

Установлено, что потери пропускной способности русла в районе пересечения осей пойменного и руслового потоков достигают 82,6% (VI створ). Пропускная же способность поймы в том же районе увеличивается на 50% и более.

Табл. 1. Илл. 5. Библ. 22.



УДК 551.482.215

К вопросу о деформациях русла и поймы реки Надым. Левашов А. А., Шмидт С. В. Труды ЛГМИ, 1972, вып. 46, стр. 32—38.

Приведены характеристики размеров и скоростей движения гряд. Дается методика ориентировочного учета стока наносов рек отдаленных районов по данным эпизодических измерений.

Табл. 2. Илл. 3. Библ. 5.

УДК 556.535.6

Некоторые особенности деформаций речных русел и пойм в условиях многолетнемерзлых грунтов на примере рек Полуй и Надым. Субботина Е. С., Шмидт С. В. Труды ЛГМИ, 1972, вып. 46, стр. 39—44.

В статье приводятся результаты натурных исследований руслового процесса на ряде рек северной части Западно-Сибирской низменности, протекающих в зоне многолетнемерзлых грунтов.

Особое внимание уделено влиянию многолетнемерзлых грунтов на характер и интенсивность русловых деформаций.

Илл. 2. Библ. 3.

УДК 556.535.6

Оценка влияния русловых деформаций на основания опор линий электропередач. Барышников Н. Б., Иванов Г. В., Левашов А. А. Труды ЛГМИ, 1972, вып. 46, стр. 45—56.

В 1967—1968 гг. в верховьях р. Томи были детально обследованы четыре участка, на которых были установлены характер и типы русловых процессов. Авторам удалось доказать, что гидроморфологический метод, разработанный для равнинных рек, в целом применим и к полугорным рекам. Помимо полевых обследований были выполнены модельные испытания на жестких и размываемых моделях. Результаты полевых и модельных исследований позволили разработать ряд рекомендаций по улучшению расположения и защиты оснований опор линий электропередач, проектируемых в условиях полугорных рек.

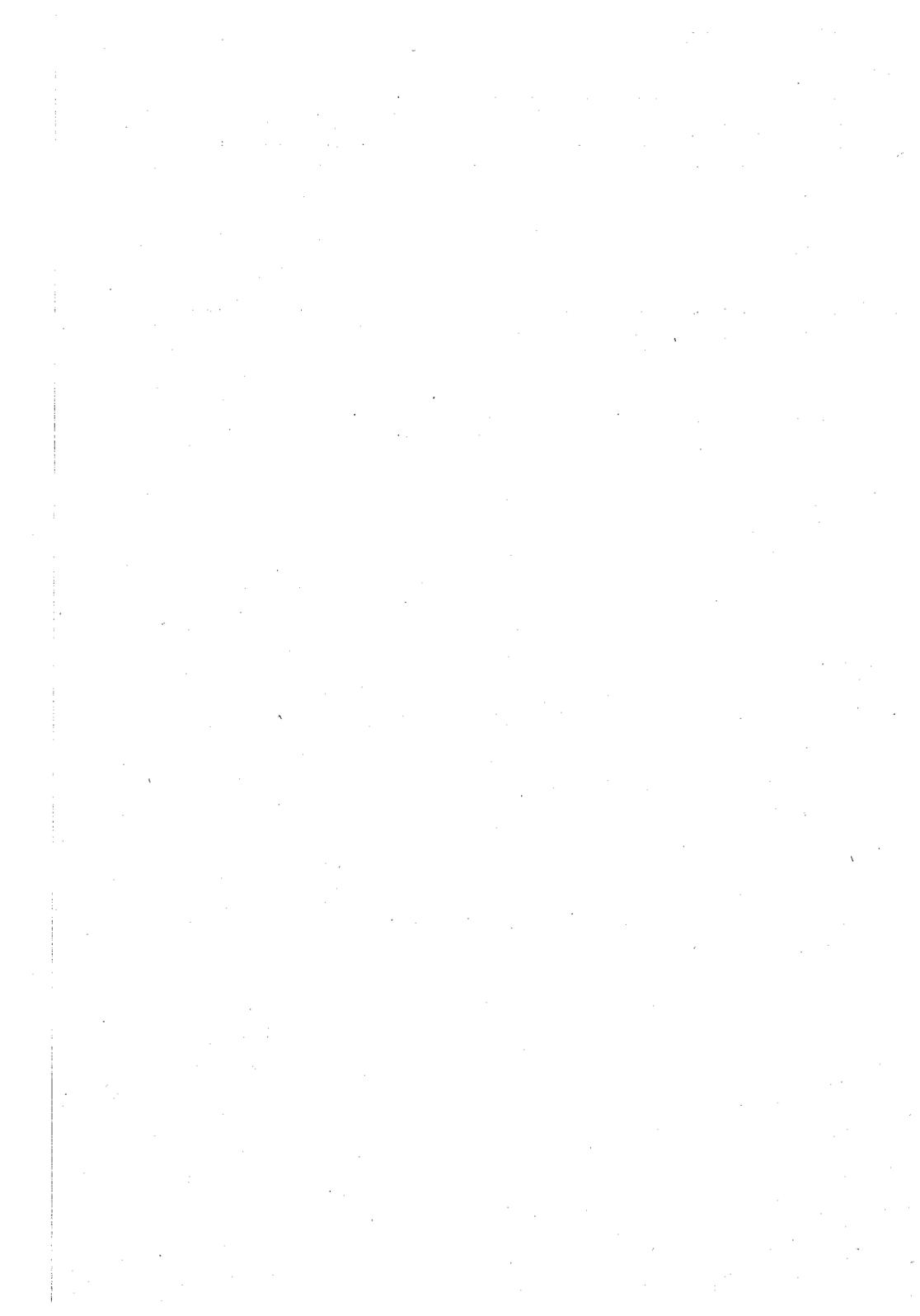
Табл. 2. Илл. 4. Библ. 5.

УДК 551.482.211.2

Методика расчета кривой дифференцированных глубин в условиях зарегулированного стока реки Волги. Барышников И. Б., Цитлис И. Б. Труды ЛГМИ, 1972, вып. 46, стр. 57—68.

Приведены результаты разработки новой методики проектирования кривой дифференцированных глубин на примере одного из плесов р. Волги. В данной методике произведена попытка количественного учета влияния объемов землечерпательных работ, намывов в период половодья, гидрографа спада и других характеристик на величину транзитных глубин. Сделана попытка оценки влияния пускового режима работы вышерасположенной ГЭС на характер изменения транзитных глубин на нижерасположенном плесе.

Табл. 3. Илл. 4. Библ. 8.



УДК 532

Влияние спутных и встречных течений на поведение плотностного потока в пространстве (качественная оценка). Богданова А. К., Степанов В. Н. Труды ЛГМИ, 1972, вып. 46, стр. 69—75.

Приводятся качественные данные по растеканию плотностного потока в условиях спутных и встречных течений, которые затем сравниваются с единичными наблюдениями плотностных потоков в природе. Полученные данные позволяют в какой-то мере познать механизм сложного процесса влияния течений на плотностные потоки.

Табл. 1. Илл. 4.

УДК. 556.536.2

Формирование физической границы раздела разнонаправленных стратифицированных потоков в режиме квазистационарного движения. Степанов В. Н., Барышников Н. Б. Труды ЛГМИ, 1972, вып. 46, стр. 76—83.

В статье рассмотрен вопрос формирования наклона физической границы раздела разнонаправленных потоков, отличающихся по плотности. Приводятся результаты моделирования на малом лотке для двух случаев: гладкого русла и шероховатого русла. Изменение наклона границы раздела рассмотрено при различных соотношениях мощности и плотности потоков, а также различных уклонов дна лотка.

По результатам моделирования в эмпирической форме получена функциональная связь наклона физической границы раздела разнонаправленных стратифицированных потоков при различных граничных условиях.

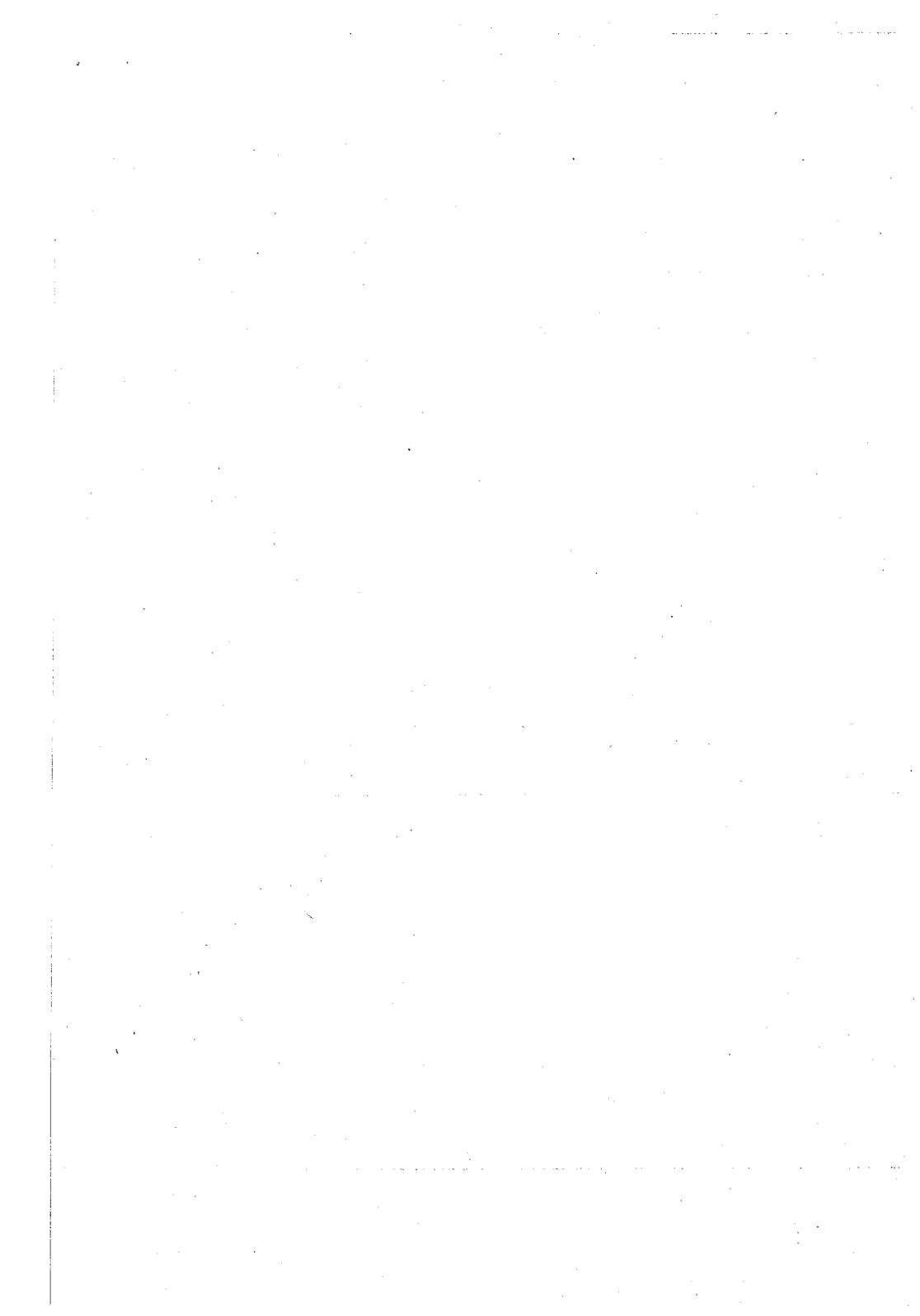
Табл. 1. Илл. 3. Библ. 8.

УДК 556.535.5

Учет ледового режима при проектировании линий электропередач (на примере реки Томи). Барышников Н. Б., Левашов А. А. Труды ЛГМИ, 1972, вып. 46, стр. 84—93.

По данным полевых обследований зимне-весеннего периода 1969 г. произведен анализ процесса воздействия льда на основания опор линий электропередач, установленных в руслах и на поймах верхнего участка р. Томи. Установлено, что наименее благоприятные условия работы сооружений наблюдаются при воздействии на них масс льда, движущихся при прорыве затора. Расчетами установлено, что на ряде оснований опор ледовые нагрузки превышают реакцию этих опор и необходимо дополнительное укрепление последних.

Табл. 4. Илл. 3. Библ. 1.



УДК 551.48.018

Поведение гидрометрической вертушки в пульсирующем потоке. Арбузов И. А. Труды ЛГМИ, 1972, вып. 46, стр. 94—103.

Выводится дифференциальное уравнение гидрометрической вертушки с учетом сухого и вязкого трения и исследуется поведение ее при постоянной скорости и ступенчатом изменении скорости. Поскольку поведение вертушки в потоке жидкости описывается нелинейным дифференциальным уравнением первого порядка с переменными коэффициентами, влияние пульсаций продольной скорости исследуется для линеаризованного уравнения и синусоидального изменения скорости потока.

Для этих условий определено завышение показаний вертушкой величины средней скорости, и даны рекомендации по уменьшению погрешности вертушек.

Илл. 5. Библ. 5.

УДК 551.48.018

Фотоэлектрический метод анализа крупности наносов и измерения мутности. Арбузов И. А., Попова А. А. Труды ЛГМИ, 1972, вып. 46, стр. 104—109.

Исследование ослабления светового потока, прошедшего через слой суспензии с произвольным фракционным составом, показывает, что для этого случая не может быть установлена однозначная зависимость между мутностью и ослаблением светового потока.

Измерение мутности может быть произведено после анализа фракционного состава наносов. В статье рассматривается возможность фотоэлектрического анализа крупности наносов без извлечения их из суспензии.

Библ. 8.

УДК 532.501.312

Влияние выбора плоскости отсчета глубин на величину коэффициента сопротивления. Полтавцев В. И., Соколова В. А. Труды ЛГМИ, 1972, вып. 46, стр. 110—118.

Непостоянство коэффициентов в эмпирических формулах для расчета гидравлических сопротивлений в значительной степени обусловлено различиями в методике обработки опытных данных.

В статье рассматривается, какое влияние на величину коэффициента сопротивления и характер его связи с относительной «гладкостью» $\frac{R}{\Delta}$ может оказать выбор плоскости отсчета глубин. Расчеты, выполненные на основе экспериментальных данных, полученных в гидравлической лаборатории ЛГМИ, показывают, что расхождения в расчете пропускной способности русел при малых значениях относительной «гладкости» $\left(\frac{R}{\Delta} < 5\right)$ могут достигать 80÷100% только за счет различного назначения плоскости отсчета, а заметное влияние выбора плоскости отсчета глубин сохраняется до $\frac{R}{\Delta} = 30 \div 40$. В зависимости от назначения плоскости отсчета можно получить логарифмический или степенной характер зависимости для коэффициента сопротивления.

Представляется наиболее целесообразным назначение плоскости отсчета глубин по положению гидравлического дна. Очевидно, оно должно зависеть, по крайней мере, от трех факторов: от размеров, густоты размещения (плотности) и формы выступов.

Илл. 3. Библ. 11.

