

Министерство образования Российской Федерации
РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
(РГГМУ)

РГБ ОД
- 1.1.1. 1000

ОД 9 дк в 1000

На правах рукописи
УДК 556.536(282.247+282.256)

Захарченко Мария Юрьевна

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ РУСЛОВОГО И ПОЙМЕННОГО ПОТОКОВ

Специальность 11.00.07–гидрология суши, водные ресурсы, гидрохимия

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата географических наук

Санкт-Петербург
1999

Работа выполнена в Российском государственном гидрометеорологическом университете

Научный руководитель: доктор географических наук, профессор,
заслуженный деятель науки РФ
Н.Б. Барышников

Официальные оппоненты: доктор географических наук, профессор
А.М. Догановский,
кандидат технических наук,
Н.Р. Грачев

Ведущая организация: Московский государственный университет
им. М.В. Ломоносова,
географический факультет,
кафедра гидрологии суши

Защита диссертации состоится “17” апреля 2000 г. в 15³⁰ часов на заседании специализированного совета К.063.19.01 Российского государственного гидрометеорологического университета по адресу: 195196, г. Санкт-Петербург, Малохтинский проспект, 98.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Российского государственного гидрометеорологического университета.

Автореферат разослан “17” апреля 2000 г.

Ученый секретарь специализированного совета,
кандидат технических наук



А.В. Лубяно

D 225.4,0

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ.

Актуальность темы.

В последние годы, в связи с резким ухудшением экономической ситуации в стране, гидрометрические работы на гидрологических станциях и постах значительно сократились, в частности измерения расходов воды. В таких условиях особую актуальность приобретает задача определения гидравлических характеристик потока по имеющимся морфометрическим данным расчетного створа. Таких, например, как распределение скоростей по ширине потока при различных уровнях затопления русла и поймы, изменение пропускной способности пойменного русла за счет кинематического эффекта взаимодействия руслового и пойменного потоков и др.

Цель и задачи исследования:

- разработка методики расчетов пропускной способности русел с поймами с учетом кинематического эффекта при различных типах взаимодействия руслового и пойменного потоков, на основе имеющихся морфометрических данных расчетного участка;

- выявление основных закономерностей, определяющих трансформацию полей скоростей в различные фазы половодья;

- разработка методики расчетов параметров, определяющих пропускную способность пойменных русел, в частности угла между динамическими осями взаимодействующих потоков.

Научная новизна.

Разработана методика расчетов пропускной способности русел с поймами с учетом влияния эффекта взаимодействия потоков в них на основе законов сохранения количества движения и энергии. Вскрыты закономерности трансформации полей скоростей руслового и пойменного потоков. Предложена методика определения направления динамических осей руслового и пойменного потоков по морфометрическим характеристикам расчетного участка.

Практическая значимость.

Разработанные методики расчетов пропускной способности пойменных русел и трансформации полей скоростей руслопойменных потоков повышают точность расчетов максимальных расходов воды и соответственно эффективность проектирования различных гидротехнических сооружений.

Апробация работы.

Результаты исследования докладывались на десятом (г. Вологда, 26-2 сентября 1995 г.) пленарном совещании Межвузовского научного координационного Совета по проблеме эрозионных, русловых и устьевых процессов, итоговых сессиях Ученого Совета РГГМУ в 1996-1999 гг. и научных семинарах кафедры гидрометрии.

Структура и объем работы.

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, списка литературы и двух приложений. Работа изложена на 150 страницах текста, включая 2 рисунка и 9 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ.

Во введении обосновывается актуальность темы, цели и задачи исследования, научная новизна работы.

В первой главе рассматривается связь гидравлики и морфологии поймы условия формирования единого транзитного потока в периоды половодий и паводков и особенности их прохождения по затопленным поймам. В связи с отсутствием общей модели гидравлики потоков в пойменных руслах, а также сложности процесса прохождения паводков по затопленным поймам, обосновывается необходимость решения таких задач, как влияние рельефа, растительности и эффекта взаимодействия руслового и пойменного потоков на пропускную способность русел с поймами.

Вторая глава посвящена анализу процесса взаимодействия руслового пойменного потоков при прохождении половодий и паводков по затопленным

поймам. Как показывают результаты предыдущих исследований, кинематический эффект значительно изменяет пропускную способность пойменного русла. Величина этого эффекта зависит от направления динамических осей руслового и пойменного потоков.

Одной из задач, поставленных в данной работе, являлась количественная оценка величины кинематического эффекта с учетом типа взаимодействия руслового и пойменного потоков, на основе натурной информации об измеренных расходах воды на пойменных створах системы Госкомгидромета. С этой целью были использованы данные наблюдений на гидростворах по 15 рекам, расположенным в различных физико-географических зонах бывшего СССР : р. Емца – ст. Сельцо, р. Ить – д. Нестерово, р. Кеть – ст. Максимкин Яр, р. Кулунда – ст. Шимолино, р. Масляная – д. Семшино, р. Межа – д. Загатино, р. Обь – г. Барнаул, р. Пижма – ст. Худяки, р. Птичь – ст. Лучицы, р. Пьяна – с. Гагино, р. Сож – г. Славгород, р. Стежера – д. Шолохово, р. Удай – с. Куринька, р. Уж – ст. Полесское, р. Урюп – ст. Полуторник.

Для решения поставленной задачи использовалась следующая методика.

При равномерном движении воды, в соответствии с формулой Шези-Маннинга, средние скорости на вертикалях пропорциональны глубинам на этих вертикалях:

$$V_{\text{ш}} = C\sqrt{hI} \approx ah^{\frac{2}{3}}, \quad (1)$$

где C – коэффициент Шези, $\text{м}^{0.5}/\text{с}$;

h – глубина, м ;

I – уклон водной поверхности.

Таким образом, дополнительные факторы сопротивления, обусловленные эффектом взаимодействия потоков и вносящие изменения в структуру скоростного поля в (1) не учитываются. Эти факторы предлагается выявлять, сопоставляя эпюры скоростей построенные по данным измерений и рассчитанные по (1).

На основании анализа результатов расчетов можно сделать следующие выводы:

- отклонения расчетных скоростей, определенных по формуле Шези, о измеренных (ΔV), наблюдаются по всей ширине потока. Наибольшие значения этих отклонений расположены в зоне прируслового вала и в прибрежных отсеках потока;

- влияние руслового потока на пойменный, как правило, распространяется только на часть ширины поймы. Ширина зоны эффекта взаимодействия пойменной части потока в среднем составляет $0.5B_p$. На относительно узких поймах ширина этой зоны занимает практически всю ширину поймы;

- в прирусловом отсеке пойменного потока, как правило, наблюдается некоторое увеличение скоростей. Уменьшение же скоростей в прирусловом отсеке пойменного потока, наблюдавшееся только на двух гидростворах, обусловлено особенностями морфологического строения расчетного участка.

- влияние пойменного потока на русловой выявлено на всех исследованных реках. По нашим данным, ширина зоны этого влияния в русловой части потока составляет в среднем $0.3B_p$, достигая на некоторых реках всей ширины русла;

- в припойменном отсеке руслового потока наблюдается как уменьшение так и увеличение скоростей. При сходящихся динамических осях руслового пойменного потоков наблюдается уменьшение скоростей. При расходящихся как увеличение (за счет растекания руслового потока по пойме), так и уменьшение скоростей (при малых углах растекания руслового потока по пойме).

Как показали результаты исследования, значение ΔV_i на промерной вертикали для руслового потока зависит от следующих величин, характеризующих положение рассматриваемой промерной вертикали по ширине русла:

- расстояния (b) между рассматриваемой вертикалью и вертикалью с максимальной глубиной на створе;

- отношения глубины на рассматриваемой вертикали (h_i) к максимальной глубине потока ($h_{\text{макс}}$);

- отношения глубины на рассматриваемой вертикали к глубине на вертикали (h_i'), отстоящей от уреза противоположного берега на том же расстоянии "а" (рис.1).

Схема нахождения равноотстоящих глубин и выделения центрального отсека на гидростворе.

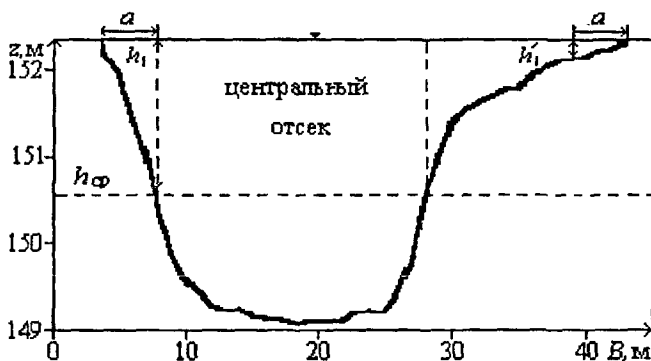


Рис. 1.

Зависимость величины отклонения ΔV_i на рассматриваемой вертикали от перечисленных характеристик выглядит следующим образом:

$$\Delta V_i = \frac{V_{изі} - V_{ші}}{V_{ші}} = f \left[\frac{2b}{B} \left(\frac{h_i}{h_{\max}} - \frac{h_i'}{h_i'} - 1 \right) \right] \quad (2)$$

Зависимость (2) была получена для 13 рассматриваемых рек. Для 10 из них зависимость (2) линейная, с коэффициентом корреляции $r > 0.75$.

Таким образом, величина ΔV_i зависит от формы сечения русла.

Для выявления влияния фазы половодья на трансформацию скоростного поля по данным наблюдений были построены эпюры средних на вертикалях скоростей по ширине руслопойменных потоков за периоды подъема и спада половодья. В результате их анализа были получены следующие выводы:

- существенное влияние на положение максимальных скоростей в потоке оказывает фаза половодья. Как правило, при подъеме уровня воды, максимальные скорости смещаются в сторону поймы, а при спаде половодья в сторону противоположную ей;

- при наличии ярко выраженного максимума глубин на расчетном створе максимальные скорости, как правило, приурочены к ним;

- при больших углах между динамическими осями руслового и пойменного потоков, а также при наличии многоступенчатой двухсторонней поймы на расчетном участке на смещение максимума скоростей существенное влияние оказывает тип взаимодействия между русловым и пойменным потоками.

В работе была предпринята попытка получить зависимость величин смещения максимума скоростей от морфометрических характеристик расчетного створа.

В качестве характеристики, определяющей положение максимальной скорости в потоке было принято положение середины центрального отсека потока. Под центральным отсеком, подразумевалась часть гидроствора, заключенная между двумя глубинами равными h_{cp} , расположенными у противоположных берегов (рис. 1).

Между характеристиками положения максимальной скорости и положения середины центрального отсека на основе данных натурных измерений были установлены графические зависимости. Для оценки надежности этих зависимостей были определены коэффициенты корреляции. Последние также были определены для зависимости между величиной, характеризующей положение максимальной скорости на гидростворе, и характеристикой положения максимальной глубины. Анализ результатов расчетов по данным наблюдений на 15 реках показал, что наибольшее значение коэффициента корреляции (0.87) получено для зависимости между характеристиками положения максимальной скорости и середины центрального отсека потока.

Аналогичные расчеты были проведены для руслового и пойменного отсеков потока. Анализ результатов расчетов показал, что наибольшие значения ко

коэффициентов корреляции (0.87-0.96) получены для той же зависимости, что и для потока в целом.

Таким образом, для практических расчетов можно рекомендовать зависимости между характеристиками положения максимальных русловых и пойменных скоростей и характеристиками положения середины центральных отсеков русла и поймы.

Методика определения расположения максимальной скорости в русловой и пойменной частях потока была использована для определения угла α между динамическими осями взаимодействующих потоков для пойменных створов. С этой целью на плане участка в горизонталях назначалось два гидроствора. На каждом из них определялись середины центральных отсеков соответственно руслового и пойменного потоков. Точки их расположения, как это показано на рис.2, соединялись прямыми линиями, положение которых принималось соответствующим положению динамических осей взаимодействующих потоков.

Данная методика позволяет определять значение угла α при различных уровнях воды и в различные фазы половодья с точностью до 3° .

Схема определения направления динамических осей
руслового и пойменного потоков.

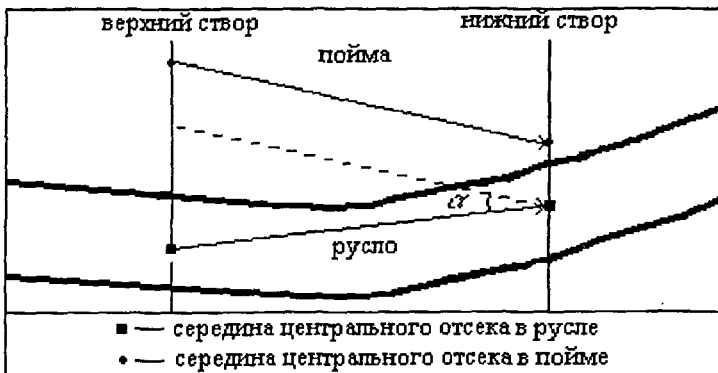


Рис. 2

Для определения угла α по предложенной методике были проведены контрольные расчеты по данным наблюдений на четырех реках, расположенных на территории бывшего СССР (р. Емца – ст. Сельцо, р. Обь – г. Барнаул, р. Стежера – д. Шолохово, р. Уж – ст. Полесское). Ограниченное число рек обусловлено недостаточным количеством необходимой исходной информации.

Анализ результатов расчетов показывает, что величина угла α на некоторых реках изменяется при изменении уровня воды, в зависимости от особенностей морфологического строения расчетного участка. При сложном многоступенчатом строении пойменного массива параметр α даже может изменить свой знак на противоположный, т.е. тип взаимодействия руслового и пойменного потоков во время половодья может измениться на противоположный.

В третьей главе выполнен анализ существующих методов расчета пропускной способности русел с поймами. Эти методы можно условно разделить на три группы. К первой – относятся методы, основанные на формулах равномерного движения. Ко второй – основанные на численном решении дифференциальных уравнений неразрывности и движения. К третьей – эмпирические, основанные на анализе натурного материала и эмпирических зависимостях.

Все существующие методы расчетов пропускной способности русел с поймами дают большие погрешности расчетов и требуют большого количества исходной информации.

Наставление рекомендует для расчета пропускной способности русел и пойм, метод, основанный на уравнении равномерного движения. При этом рекомендуется деление сложносоставных русел на отсеки, в местах резкого перелома профиля или изменения шероховатости по ширине потока. Пропускная способность в этом случае рассчитывается как сумма расходов воды в отсеках русла и поймы:

$$Q = Q_p + \sum Q_{pi} , \quad (3)$$

где Q_p – расход воды в главном русле, $\text{м}^3/\text{с}$;

Q_{pi} – сумма частных расходов на поймах и рукавах, $\text{м}^3/\text{с}$.

При расчетах по (3) не учитываются дополнительные сопротивления, возникающие при взаимодействии руслового и пойменного потоков.

В данной работе была разработана методика расчетов пропускной способности пойменных русел с учетом этих дополнительных сопротивлений, а также с учетом направлений динамических осей руслового и пойменного потоков.

При применении данного метода рассматривалось прохождение единого транзитного потока по затопленным русле и пойме. К системе единого транзитного потока был применен закон сохранения количества движения при взаимодействии двух тел с различными массовыми и скоростными характеристиками и теорема об изменении кинетической энергии.

Руслопойменный поток был разделен вертикальной плоскостью, проходящей по бровке прируслового вала, на два потока с различными гидравлическими и морфометрическими характеристиками: русловой и пойменный.

Приняты следующие допущения. Вертикальная плоскость, разделяющая потоки, не вносит дополнительные сопротивления движению руслового и пойменного потоков. Процесс движения руслопойменного потока установившийся. Из-за отсутствия необходимой исходной информации уклоны руслового и пойменного потоков приняты равными. Считаем, что изменение количества движения единого транзитного руслопойменного потока происходит за счет сил сопротивления между русловым и пойменным потоками. Трение потока о берега учитывается при расчете скоростей руслового и пойменного потоков по формуле Шези.

Как показывают предыдущие исследования кинематического эффекта в природных условиях, ширина зоны взаимодействия руслового и пойменного потока сопоставима с размерами ширины русла и поймы. Исследования Н.Б. Барышникова показали, что на малых и средних реках влияние пойменного потока на русловую распространяется на всю ширину русла, а на больших реках на значительную его часть. На поймах, с шириной в несколько раз превышающей ширину русла, влияние руслового потока на пойменный может распространяться

на 5-6 ширии русла, а на поймах с шириной сопоставимой с шириной русла - на всю ширину поймы. Таким образом, можно сделать вывод о том, что в процессе взаимодействия потоков участвует вся масса руслового и пойменного потоков на малых и средних реках, а на больших - значительная их часть. Дальнейшие исследования были направлены на разработку методики расчета пропускной способности для русел с поймами малых и средних рек.

Закон сохранения количества движения и теорема об изменении кинетической энергии, в применении к взаимодействующим русловому и пойменному потоку при прохождении паводка по затопленной пойме, выглядит следующим образом:

$$M_p V_p + M_n V_n \cos \alpha - (M_p + M_n)V - \rho g J (\omega_p + \omega_n) l + S \mu_T \frac{(V_p - V_n \cos \alpha)}{b_{кз}} l = 0 \quad (4)$$

$$\frac{M_p V_p^2}{2} + \frac{M_n V_n^2}{2} - \frac{(M_p + M_n)V^2}{2} - \rho g J (l)^2 (\omega_p + \omega_n) + S \mu_T \frac{(V_p - V_n \cos \alpha)^2}{b_{кз}} l = 0$$

Где M_p и M_n - массы руслового (р) и пойменного (п) потоков;

V_p и V_n - соответствующие средние скорости руслового и пойменного потоков при отсутствии взаимодействия потоков;

μ_T - динамический коэффициент турбулентной вязкости;

$\frac{(V_p - V_n \cos \alpha)}{b_{кз}}$ - градиент продольной скорости в зоне взаимодействия руслового и пойменного потоков;

ρ - плотность жидкости;

g - ускорение свободного падения;

J - уклон потока;

ω_p и ω_n - площади сечения руслового и пойменного потока соответственно.

Массы руслового или пойменного потока рассчитываются по выражению:

$$M = Q\rho t \quad (5),$$

где $t=1$ с.

Решение системы уравнений (3) выглядит следующим образом:

$$V = (V_p - V_n \cos \alpha) + \sqrt{\frac{(Q_p + Q_n)^2 (V_p - V_n \cos \alpha)^2 - (Q_p + Q_n)(Q_p V_p^2 - 2V_p V_n (Q_p - Q_n) \cos \alpha - Q_n V_n^2 (2 \cos^2 \alpha + 1))}{(Q_p + Q_n)}} \quad (6)$$

Выражение (6) является основной расчетной формулой для определения значения средней скорости единого транзитного руслопойменного потока с учетом эффекта взаимодействия.

Значения скоростей руслового и пойменного потоков при отсутствии взаимодействия рекомендуется определять по формуле Шези –Маннинга (1).

В системе уравнений (4) присутствуют три неизвестных: средняя скорость руслопойменного потока V , динамический коэффициент турбулентной вязкости μ_T и ширина зоны взаимодействия $b_{\text{вз}}$. Однако, при нахождении средней скорости руслопойменного потока, в процессе преобразования уравнений, составляющая $b_{\text{вз}}$ сокращается и в дальнейшем решении не используется.

Для расчетов по предложенной методике были использованы материалы по 15 гидрологическим постам, расположенных на территории бывшего СССР.

Для каждого уровня воды был рассчитан расход воды единого руслопойменного потока по формуле, рекомендуемой Наставлением:

$$Q_{\text{м}} = V_p B_p h_p + V_n B_n h_n \quad (7)$$

Также для каждого уровня воды был определен расход воды по разработанной методике:

$$Q = V(B_p h_p + B_n h_n) \quad (8)$$

Расчеты выполнялись на основе независимой информации. Расчетные значения расходов воды сравнивались с данными натурных измерений.

Анализ полученных результатов показывает, что величина средней квадратической погрешности расчетов по разработанной методике составила 39%, а по рекомендуемой Наставлением 62%.

В заключении сформулированы основные результаты исследований:

- за счет влияния эффекта взаимодействия потоков происходит трансформация полей скоростей, при этом средняя скорость потока, по нашим данным, изменяется от -15% до $+10\%$, от своей величины. Величина этого отклонения зависит от типа взаимодействия руслового и пойменного потоков и угла между динамическими осями этих потоков;

- разработан метод определения угла α между динамическими осями руслового и пойменного потоков в зависимости от уровня воды и особенностей морфологического строения расчетного участка. Данный метод позволил существенно уточнить получаемую величину угла α , по сравнению с ранее разработанными методами;

- положение максимума скорости в потоке не остается постоянным и также зависит от фазы половодья. Как правило, при подъеме уровня, когда водные массы руслового потока поступают на пойму, максимум скоростей смещается в сторону поймы. При спаде половодья, когда водные массы пойменного потока поступают в русловую, максимум скоростей смещается в сторону противоположную пойме;

- на трансформацию полей скоростей существенное влияние оказывают особенности морфологического строения расчетного участка и форма попереч

ного сечения гидроствора. В пойменных руслах расположение максимумов скоростей зависит от расположения середины центральных отсеков русла и поймы;

- разработана методика расчета пропускной способности пойменных русел с учетом эффекта взаимодействия руслового и пойменного потока, на основе законов сохранения количества движения и энергии. Контрольные расчеты показали, что величина погрешности по предложенной методике на 23% меньше, чем по стандартной, рекомендуемой Наставлением.

По теме диссертации опубликованы следующие работы:

1. Гидравлические сопротивления речных русел // Десятое межвузовское координационное совещание по проблеме эрозионных, русловых и устьевых процессов. Научные сообщения.–Вологда: Издание Вологодского политехнического института,1995.–С.27-28.– (в соавторстве с И.А. Волчковой).

2. Применение плановой модели для определения пропускной способности русел с поймами //Тезисы докладов Итоговой Сессии Ученого Совета. – С.-Пб., изд.РГГМИ,1996. –С.64

3. Антропогенное воздействие на процессы формирования пойм // Современная география и окружающая среда. Всероссийская научная конференция. Секция – исследование эрозионных и русловых процессов. Тезисы докладов.– Казань: Издание Казанского университета,1996.–С.14-15.– (в соавторстве с И.А. Артамоновым и Н.Б. Барышниковым).

4. Расчет пропускной способности пойменных русел //Тезисы докладов Итоговой Сессии Ученого Совета. – С.-Пб., изд.РГГМУ,1997. –С.61

5. Пропускная способность пойменных русел//Тезисы докладов Итоговой Сессии Ученого Совета. – С.-Пб., изд.РГГМУ,1999. –С.60