

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение

высшего образования

«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра гидрометрии

## ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА

(магистерская диссертация)

На тему: «Методика расчетов средних и средних на  
вертикалях скоростей русловых потоков, находящихся под  
воздействием пойменных потоков»

Исполнитель:

Панов А. А.

(фамилия, имя, отчество)

Руководитель:

доктор географических наук, профессор

(учёная степень, учёное звание)

Барышников Н. Б.

(фамилия, имя, отчество)

«К защите допускаю»

Заведующий кафедрой

(подпись)

кандидат географических наук, доцент

(учёная степень, учёное звание)

Исаев Д. И.

(фамилия, имя, отчество)

«09» июля 2017.

Санкт – Петербург

2017

## Сокращения

БАМ – Байка́ло - Аму́рская магистраль

## Введение

Установлено, что основной методикой расчётов средних на вертикалях скоростей русловых потоков является методика, основанная на теории равномерного движения, т.е. по формуле Шези-Маннинга. Доказано, что при её применении к русловым составляющим потоков при их взаимодействии с пойменными, погрешности расчётов могут достигать нескольких сотен процентов. Рекомендована корректировка этой методики на основе учёта влияния эффекта взаимодействия потоков, в частности в виде зависимости погрешностей расчётов от угла  $\alpha$ .

Средняя на вертикали скорость, эффект взаимодействия потоков, методика, формула Шези, угол  $\alpha$ , русловая составляющая, погрешность расчётов.

Сведения о средних на вертикалях скоростях речных потоков являются востребованными при проектировании и строительстве различных гидротехнических сооружений. В частности, они особенно необходимы при проектировании мостовых переходов для расчётов заглубления мостовых опор. От точности и надёжности расчётных значений средних на вертикалях скоростей, особенно в русловых частях руслопойменных потоков, напрямую зависит надёжность и стоимость строительства мостовых переходов.

Для беспойменных створов расчёт средних на вертикалях скоростей русловых потоков рекомендуется осуществлять по методике, разработанной А.В. Караушевым[13], основанной на применении формулы Шези-Маннинга или любой другой близкой к ней формулы степенного вида (Павловского, Форгеймера и др.). Эта методика довольно простая и основана на допущении о равномерном движении воды русловых потоков.

Значительно сложнее проблема расчётов средних на вертикалях скоростей русловых потоков, являющихся составной частью руслопойменных потоков, находящихся под интенсивным воздействием

пойменных потоков. В этом случае необходимо учитывать, возникающий при этом эффект взаимодействия русловых и пойменных потоков, который, в зависимости от особенностей морфологического строения расчётного участка, на котором расположен расчётный створ, определяет характер изменения скоростей руслового потока при увеличении уровней воды.

На основе анализа натурной информации в РГГМУ [6] была разработана типизация процессов взаимодействия русловых и пойменных потоков. В её основу положено взаимное расположение динамических осей взаимодействующих потоков.

Не останавливаясь на детальном анализе этой типизации, отметим лишь, что она разработана для стационарных условий. Натурные руслопойменные потоки в периоды пропусков паводков и половодий по затопленным поймам, являются нестационарными, более того с переменным по длине расходом воды. Однако данная типизация вполне может быть применена и к натурным русловым потокам при их взаимодействии с потоками поймы. Так при подъёме уровней, когда по меткому выражению М.А. Великанова "вода по руслу бежит быстрее чем по пойме", массы жидкости руслового потока поступают на пойму, процесс взаимодействия таких потоков аналогичен второму типу. При этом значительно увеличиваются уклоны водной поверхности и скорости русловой составляющей потоков, а также пропускная способность русел.

На спаде паводков и половодий наблюдается противоположный процесс, а именно массы пойменного потока, вторгаясь в русловый поток, создают подпор, что приводит к уменьшению скоростей последнего и, как следствие, к уменьшению пропускной способности русла, т.е. процесс аналогичный третьему типу взаимодействия потоков. Таким образом, эти процессы полностью соответствуют двум типам взаимодействия потоков. Действительно, процессы, происходящие в периоды подъёма уровней,

соответствуют второму типу взаимодействия потоков, а спад уровней третьему типу.

Исходя из этого, на основе натурной информации о максимальных расходах воды на реках РФ были отобраны данные измерений по 14 рекам, на восьми из которых процесс взаимодействия русловых и пойменных потоков осуществлялся по третьему типу. На двух - по пятому и на пяти по второму.

# 1. Происхождение, классификация, и морфометрические характеристики речных пойм

## 1.1 Происхождение пойм

Поймы являются результатом эрозионно-аккумулятивной активности реки и образуются, когда русло смещается вдоль дна долины. Из-за этого у них сложная двухслойная структура. Нижняя часть состоит из слоистых отложений, образованных канальными фациями, а верхняя часть состоит из горизонтально расположенных мелкозернистых слоев - пойменных отложений (фаций).

Проблемы возникновения и развития пойм особенно важны в последние годы из-за увеличения интенсивности их экономического использования и внедрения новых, более сложных методов исследования (аэрофотосъемка, стереотрофные и космические методы, которые охватывают обширные районы, занимаемые поймами и изучение их процесса развития). Это позволило нам проводить одновременные наблюдения за изменением рельефа, динамикой их затопления и разгрузки и другими процессами на поймах в районах большой протяженности.

Проведение аэродинамических, космических работ и аэрофотосъемки в сочетании с наземными измерениями также дало толчок созданию научно обоснованной теории канальных процессов и на ее основе созданию теории образования пойм.

Материалы полномасштабных измерений и наблюдений показали, что процесс формирования различных типов пойм неоднороден и привел к выводу, что необходимо подробно остановиться на этом вопросе. Если взгляды почти всех исследователей не расходятся в вопросе эрозионно-аккумулятивного происхождения пойм, то расхождения очень значительны при оценке степени влияния отдельных факторов (эоловые, эрозионные,

климатические и т. д.). В качестве примера мы можем привести дискуссии о влиянии эолового фактора на процесс формирования современных пойм. Таким образом, В. Р. Уильямс [3] и Н. И. Маккавеев [4] придают ему большое значение, в то же время И. В. Попов [5] считает его вторичным. По-видимому, роль эолового фактора значительно изменяется, увеличиваясь с севера на юг.

Важными вопросами являются формирование канальной и пойменной фаций аллювия на пойме. Практически все исследователи полагают, что процесс формирования канальной фации на разных типах пойм значительно отличается. Так, Попов отмечает: «Рост поймы в плане реализуется в результате формирования прибрежных стволов. Основа береговой линии, ее основания, является частью гребня большого хребта в русле реки и создающих пляж на выпуклом берегу "[5, с. 166]. Дальнейший процесс увеличения гребня вала в высоту обусловлен растительностью, что способствует накоплению осадков.

Р.С.Чалов считает: «Образование поймы связано с развитием скоплений скопления в русле реки (бок о бок, осредки), которые являются формой их перемещения. При изменении горизонтов воды из высокой воды ( Наводнение) на луг, некоторые части речных отмелей выходят из воды и могут быть закреплены растительностью. Самые высокие из них, образованные в годы высокой воды, не затопляются в последующем низком потоке, что увеличивает вероятность их Фиксация растительностью. Дальнейший процесс роста гребня обусловлен накоплением отложений растительностью »[6, с. 146].

Эти точки зрения близки друг к другу. Однако Попов на базе прибрежной шахты берет ряд на пляже, а Чалов - бок о бок или осседок. В то же время обе стороны и осередок - это разные формы, точнее,

разновидности ленточных гребней, но не соединяются с берегами и не образуют поймы.

Особенности формирования поймы также обусловлены особенностями канального процесса на этом участке реки.

Фауны наводнения из аллювия являются результатом осаждения мелкозернистых, взвешенных осадков на пойменные поверхности. Роль этой фации заключается в том, чтобы выровнять, часто гризли, поверхность пойм. Толщина слоя зависит от концентрации этих отложений и скорости потока пойменных потоков, глубин затопления пойм, а также расстояния от мест их прибытия (через перерывы или долины рек) до мест осаждения, Продолжительность наводнения и другие факторы. Он варьируется от долей миллиметров до десятков сантиметров за пределами высокой воды.

В послевоенный период работа И. В. Попова [5, 7], Н. И. Маккавеева [4, 8] и Р. С. Чалова [6,9], теория происхождения и образования пойм была доведена до настоящего уровня , Подробные описания процесса формирования поймы с различными типами канального процесса приведены именно в работах этих исследователей.

Для развития вычисленных зависимостей вопрос о толщине аллювиальной свиты имеет большое значение. Таким образом, Шанзер отмечает: «Нормальная толщина аллювиальной свиты, осажженной на дне эрозионной долины реки, подверженной неизменному климату и неподвижности земной коры, должна быть близка к разнице в отметках высоты двух уровней: Среднее дно реки в этом участке долины и средняя отметка уровня воды время высокой воды (рис. 1.1) [2, с. 212]. Как видно на рисунке, толщина аллювиальной свиты зависит от средних уровней периода прохождения паводков. Расчеты, проведенные рядом

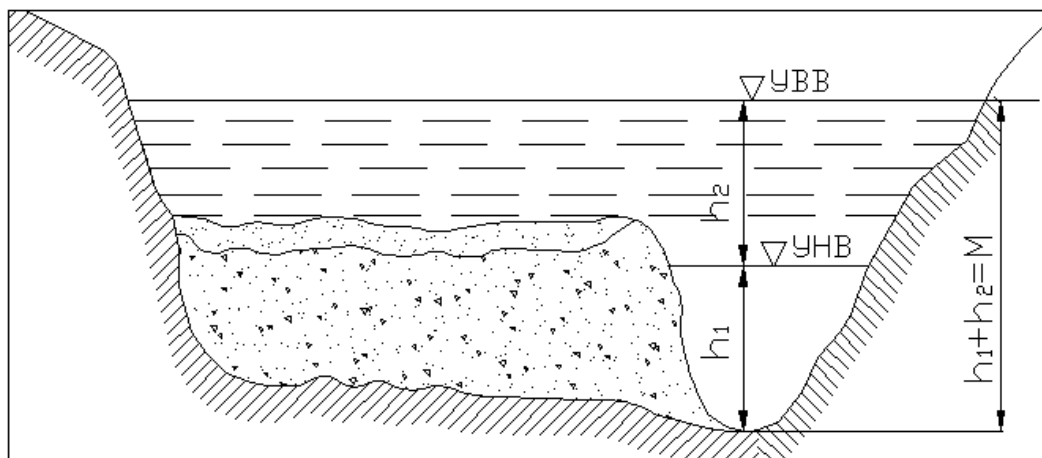


исследователей [2, 4, 5], показывают, что в большинстве рек толщина аллювия обычно не достигает максимального значения. Это связано с тем, что в течение периодов, измеренных в течение нескольких тысячелетий, река, двигаясь вдоль дна долины, несколько раз осаждаёт ее отложения во время плановых деформаций слоя. Действительно, расчеты, выполненные для блока Самара-Камышин на реке. Волга (до строительства гидроэлектростанций), показывают, что ежегодное увеличение отметок поймы из-за осадения пупка составляет 1 -1,5 мм. Таким образом, в течение 10 000 лет пойма должна достигать высоты 10-15 м, а на самом деле ее высота составляет всего 6-8 м.

Большое влияние на толщину аллювиальной свиты также оказывает ряд дополнительных факторов (изменение климата, ледовые заносы, ветер и т. Д.). В частности, Шанзер отмечает работу плавающего льда в высокой воде, которая, похоже, вспахивает аллювий на глубину 0,2-0,3 м и несет валуны и гальку на большие расстояния.

Наиболее противоречивыми являются мнения о влиянии изменения климата, которые происходят двумя способами:

- 1) климат определяет водный режим реки, ее средние и экстремальные характеристики, что приводит к изменению амплитуды колебаний затрат и, следовательно, уровням воды и глубинам реки, т. Е. Величинам, определяющим Толщина аллювия;



$m$  — действительная мощность аллювия,  $M$  — максимально возможная (нормальная) мощность аллювия,  $h_1$  — глубина реки в межень на плёсе,  $h_2$  — высота паводка.

Рис. 1.1. Схема определения нормальной мощности аллювиальной свиты по Е.В. Шанцеру.

2) климат определяет ход процессов выветривания и характер растительного покрова, определяя тем самым эрозию почв и приток осадков в реки, что также непосредственно влияет на толщину аллювия. Оценив оба этих фактора на основе сопоставления данных о реках ЭТП, происходящих в разных климатических условиях, а также на основе анализа обширной гидрологической литературы, Шансер пришел к выводу, что роль климата в четвертичный период обычно сильно преувеличены. Нормальные отклонения в толщине аллювиальной толщины от ее средних значений для равнинных рек под влиянием климата, по Шанцеру, не превышают 15-35%.

Кроме того, по мере увеличения маркировки поверхности поймы частота затопления и количество осадка, переносимого на его поверхность, уменьшаются. Данные о толщине аллювиальных люксов указывают на то, что в некоторых случаях она превышает нормальную. Наибольший

интерес представляет открытие причин этого явления. Основными из них являются региональные движения земной коры, по последним данным, достигающие нескольких, а иногда и десяти сантиметров в год, и повышение общей основы эрозии речной системы.

В последние годы влияние антропогенного фактора увеличилось, в частности, на формирование нормальной толщины аллювиальной свиты. Особенно велика влияние регулирования в-дохранилищах, резко поднимая основы эрозии реки в ее отдельных участках.

В 1950 году В. В. Ламакин [10] предложил классификацию речных месторождений на основе сортировки аллювия по размеру и длине реки. Он выдвинул гипотезу о связи между аллювиальными отложениями и характером движения земной коры в определенных областях.

Суть гипотезы заключается в том, что в долинах рек происходит регулярное чередование поднимающихся и падающих областей из-за движения земной коры. Согласно Ламакину, между ними расположены участки, иногда большие длины, в равновесном состоянии. На восходящих участках происходит интенсивное сокращение руслового русла. В период наводнения из-за высоких скоростей течения на поймах, как правило, небольшие размеры, осаждается большой аллювий (по сравнению с другими участками). Толщина слоя аллювия мала. Аллювий, по словам Ламакина, лежит внизу долины (нестационарная).

Нижние части долины характеризуются интенсивным осаждением аллювия, который, по словам Ламакина, покрывает дно долины. Отсюда и название - настил, или констративный, тип аллювия. Скорости на пойме малы, что приводит к осаждению относительно небольших частиц по сравнению с предыдущим типом.

Промежуточный (между первыми двумя) тип характеризуется отсутствием движений земной коры. Дно реки блуждает по долине и восстанавливает аллювий. Этот тип называется перестилаемый, или вечным. Каждый тип аллювиальных отложений соответствует своему типу поймы. Классификация Ламакина оригинальна, но нуждается в дальнейшем развитии и более полной увязке с процессами формирования поймы.

Принципиально другая точка зрения дана Г. С. Обидиентовой [11], которая утверждает, что речные террасы, включая пойму, являются результатом процесса канала, его неотъемлемым следствием. Она отрицает возможность террасы любым другим способом, например, в результате тектонических движений. Формирование пойм происходит в основном из-за изменения в периоды низкой и высокой воды. По этой причине ранее сформировавшаяся пойма может быть захоронена под осадком в начале высоководного цикла.

Э. В. Шанцер в более поздних работах разъясняет определение аллювия: «Аллювий включает отложения канальных водных течений, протекающих по дну эрозионных долин, созданных ими самим и на поверхности созданных ими аллювиальных накопительных равнин» [12, с. 174]. В этом определении идея Шанцера сосредоточена, состоящая в том, что аллювий является результатом одновременной эрозии и аккумулятивной работы реки. Принимая во внимание исследования Ламакина, Шанцер исследует динамику формирования и развития аллювиальной свиты с учетом влияния таких факторов, как активные движения земной коры и изменение климата. Развивая идеи, выраженные в работе 1951 года, он отмечает, что нормальная толщина аллювия крупных рек, варьирующаяся от 10 -15 до 30 м, обусловлена совместным эффектом сдвига бокового канала и периодически повторяющихся наводнений с

полным неизменным Ситуация, в которой накапливается аллювий. Изменение фаций аллювия снизу вверх никоим образом не указывает на изменение климата. Значительное влияние на формирование аллювия на нормальный рисунок обеспечивается режимом питания реки. Таким образом, реки с озерной пищей и степными реками выделяются наиболее остро. Реки с чисто озерной пищей относительно редки (Нева, Свирь, Св. Лаврентия), а степные реки довольно распространены. На реках с ледниковым типом питания накопление аллювия может перейти в констрикционную фазу.

Первые работы по происхождению и классификации пойм были проведены Б. В. Поляковым [13, 14] и М. А. Великановым [15]. М. А. Великанов отметил, что, поскольку значительная часть эрозии рек происходит большую часть года, когда на реках существует маловодный период, необходимо иметь небольшой или небольшой канал и большую кровать (канал с поймой), действуя кратко и пропуская затраты на наводнение и «по большей части, это мало влияет на форму канала низкого уровня».

Половая пойма принимает участие в канальном процессе », но краткость периода его перекрытия и, что самое важное, обычно покрывает его растительность, что создает повышенную устойчивость к паводковой воде, влечет за собой участие поймы в образовании рудника в большинстве случаев относительно слабо. Исключения - это разные случаи, когда потолочная равнина имеет направление, существенно отличающееся от низкого потока, и пересекает последнее ». М. А. Великанов рассмотрел вариант варианта одного из шести типов канальных образований рек низменности, которые ему назначены , Которые соответствуют специальным типам гидравлической структуры потока.

Таким образом, Великанов изложил оригинальное и принципиально правильное направление, которое заключается в разработке классификации канальных образований и пойм, основанных на гидравлике потока.

Вопросы формирования и происхождения пойменных полей изучались группами исследователей Московского государственного университета под руководством Р. С. Чалова и в ГГИ под руководством И. В. Попова.

Разработки ГГИ основаны на комплексном подходе к проблеме канальных процессов, в частности пойменных равнин, с точки зрения ряда наук (геоморфология, гидрология и гидравлика). Они осуществили очень важный переход к дискретным представлениям о канальных процессах, что позволило нам выделить четыре структурных уровня в потоке. Формирование пойм происходит на самом высоком (четвертом) структурном уровне, главным образом под влиянием потока канала, развивающего его долину, и тесно связано с типами канального процесса. В работах Попова [7] была развита концепция Шанцера по биномиальному характеру пойменной структуры. Отмечая, что обычная нормальная схема структуры пойм встречается условия возникновения крупного руслового аллювия на дне поймы с уменьшением размера частиц на поверхности, Попов анализирует возможные случаи отклонения от этой схемы. В качестве факторов, которые вызывают нарушения нормальной схемы, это приводит к климатическим и геологическим условиям. На основе анализа материалов выделяются реликтовые и остаточные образования.

Таким образом, при образовании рельефа пойменных каналов аллювий является основным аллювиальным, образуя рулоны канала, постепенно смещающиеся к вогнутому берегу. В связи с колебаниями содержания воды, отложения осадков и другими факторами формирование рулонов канала происходит в разные периоды времени и связано с эрозией

противоположного вогнутого берега. Именно деревья каналов определяют маниакальный рельеф пойменных полей (с соответствующими типами канального процесса - извилистыми и разветвленными). Время формирования рулонов канала сильно варьируется - от 1 -2 до нескольких десятков лет.

Фации пойменной равнины имеют диаметрально противоположную функцию при образовании рельефа поймы. Затопленный аллювий образуется из мелкозернистых взвешенных осадков, осажденных на пойме в виде песка, и разглаживает рельеф поймы. Учитывая, что толщина поймы аллювия достигает 3-5 м и более, он может в значительной степени сгладить первоначальный рельеф поймы.

Принципиальное значение имеют исследования, посвященные анализу факторов, которые нарушают нормальную структуру пойм и, в частности, пойменного аллювия. Одним из таких факторов является ветер, который в засушливых регионах может нести значительные количества песчаных отложений, изменяя рельеф поймы, создаваемой канальным процессом.

Второй фактор - эрозия поймы потоками воды, движущимися вдоль поймы с существенными скоростями во время ее глубокого затопления. Эрозия может быть особенно велика при необоснованной эксплуатации пойм, связанных с обезлесением пойменных лесов и удалением дерна. В этих случаях только во время одного мощного наводнения в пойме могут образовываться каналы, поперечные размеры которых близки к размеру канала.

В качестве основных факторов, нарушающих нормальную мощность аллювия, можно привести следующее:

1) интенсивность плановых деформаций русла реки, определяемая наклоном дна долины. При интенсивных плановых деформациях, которые цикличны по своему характеру, и нет никаких факторов, препятствующих развитию полного цикла изгибов, но ограничивающих длительное однонаправленное смещение канала, поток может многократно смывать настоящую пойму. Это приводит к резкому уменьшению продолжительности образования поймы, т. Е. К уменьшению времени накопления пупка и, как следствие, к общему уменьшению толщины поймы;

2) состав, размер и режим потока осадка, транспортируемого потоком;

3) наличие условий, которые ограничивают плановые деформации.

В качестве дополнительных факторов мы можем привести тектонические движения, климатические и болотные процессы, вечную мерзлоту, делювиальные абсорбции и другие.

Таким образом, концепция образования пойм основывается на концепции, разработанной Шанцером [2, 12] и разработанной Поповым [5, 7] на основе теории канального процесса, созданной в Государственном геологическом институте. Основной темой теории образования пойм является утверждение о том, что пойма является продуктом жизни реки, результат перемещения реки вдоль долины имеет двухчленную структуру и определяется типом канального процесса, присущего этому Река, точнее речная часть. Основными факторами, определяющими канал и, следовательно, пойменные процессы, являются особенности водного режима, потока осадков и предельных условий (геологическое строение долин и т. Д.).



Самые крупные исследования последних лет были проведены в МГУ [4, 16]. Таким образом, Н. И. Маккавеев отмечает, что пойма, морфологически похожая на террасу, значительно отличается от последней тем, что она находится в области случайного, но прямого воздействия речного стока; Поверхность поймы представляет собой либо арену накопления речных отложений, переносимых талой водой, либо те же самые воды размывают ее. Поляна образуется почти на всех реках, которые имеют значительные колебания уровня воды. Он отсутствует только в районах с порогами и водопадами, в узких ущельях, где скалы и осыпи приближаются к кровати, а также на регулируемых реках с высокой степенью регулирования. Н. И. Маккавеев отмечает, что ширина поймы колеблется по длине реки, а большие долины дна долины чередуются с ущельями. План поймы обычно хорошо заметен. Существует выраженная связь между амплитудой флуктуации уровня и относительной шириной поймы, при прочих равных условиях.

Между кроватью и поймой происходит непрерывный обмен осадками: с одной стороны, эрозия пойм и эрозия пойменной поверхности происходит, с другой стороны, большое количество осадков, главным образом в виде песка, Оседают на пойме в период наводнения. Количество осадка, участвующего в этом обмене, обычно превышает количество транзитного стока осадков.

В ряде своих работ Маккавей [4], такие как Уильямс, подразделяют пойму в русло реки, центральную и местную. Для плоских рек умеренного пояса, согласно гидрологическому режиму, он выделяет пять фаз влияния наводнения на пойму.

Идеальная пойма равнинной реки (по Маккавееву), начиная с поверхности и от русла реки, имеет следующую структуру, выраженную лицевыми видами пойменных отложений:

А) фации придонной поймы - большие пески толщиной до 2-3 м;

Б) фации центральной поймы - тонкие пески, супеси, легкие горизонтально-слоистые суглинки; Толщина слоев от 1 -2 до 2 -3 см, общая толщина от 1 -2 до 10 -15 м;

С) фации ручьев и предгорная пойма являются преимущественно тонкослойными илами. Часто встречаются включения растительных отложений;

Д) фации канального аллювия;

Е) спорадические отложения старой фации.

Дальнейшее развитие идей Шанцера, а также Ламакина было получено в работах И.П. Карташев [17], утверждающий, что поймы состоят из аллювия, обычно образующегося на разных этапах развития реки, и отличаются особенностями их развития и структуры лица. Таким образом, не весь аллювий, составляющий пойму на соответствующих стадиях развития реки, а только тот, который образуется на этих этапах, относится к перстрастическим и констрикционным фазам.

Таким образом, большинство пойменных равнин очень сложны по своей структуре. Их верхние горизонты состоят из аллювия этой фазы развития, а нижние - впереди. Нижние горизонты аллювия нормальной толщины, сохранившиеся от эрозии, называются донным аллювием (аллювием коренных пород реки). Карташев [17] приписал этот аллювий еще одной динамической фазе развития реки - субстрата.

Карташев устанавливает взаимосвязь типов и характера канального процесса со стадиями развития реки. Этапы ввода (присущие) присущи относительно прямым линиям, которые в некоторых районах из-за разного удельного сопротивления почв могут меандрить. Это можно объяснить

следующим образом. В нижней части, где наблюдаются обнажения твердых пород, глубина резания замедляется, что приводит к переходу от глубоких к плановым деформациям в верхних секциях, то есть извилистому.

Таким образом, в настоящее время четко определены три направления в изучении и объяснении образования и происхождения пойм. Одно из направлений разрабатывается в Институте геологии Академии наук СССР. Учредителями этого должны считаться Шанцера и Ламакин. Развитие их идей в последующие годы было выполнено Ю.В. А. Лаврушин, И. П. Карташев и А. Б. Басаликас, которые рассматривают процесс формирования поймы в своей динамике и охватывают не только равнинные, но и горные реки. Основные положения этого направления состоят в том, что пойма рассматривается как сложный комплекс, сформированный под эрозионно-аккумулятивным воздействием реки и как бы неотъемлемая часть канального процесса. Особенностью этой тенденции является анализ динамики развития поймы в ее неразрывной связи с геологическими и тектоническими процессами. Основным в этом направлении является объяснение причин образования различных типов канальных процессов, а следовательно, поймы вдоль длины реки в зависимости от геологических и тектонических факторов на основе теоретических разработок Ламакина.

Направление, развитое в GGI в работах И. В. Попова, Н. Е. Кондратьева и их учеников, также основано на концепциях Е. С. Шанцера. Но здесь четко обоснована позиция о дискретности канального процесса, о взаимосвязи типов пойм с типами канального процесса. Основным в этом направлении является теоретическое обоснование взаимосвязи между типами пойм и типами канальных процессов.

Направление, разработанное в Московском государственном университете под руководством Н.И. Маккавеева и Р. С. Чалова, является

оригинальной, основанной не только на теории канальных процессов, но и на обширных полевых данных и охватывает как равнинные, так и горные реки.

В этих трех основных направлениях есть много общих, правильно отмеченных и проанализированных закономерностей, которые позволяют нам теперь рассмотреть, что заложены основы научной теории происхождения и формирования пойм. Расхождения во всех трех областях связаны главным образом с частными проблемами, такими как воздействие климата и, в частности, ветра, а также влияние геологических, тектонических и ряда других факторов.

## 1.2 Типы речных пойм

Главной особенностью типизации поймы, рассмотренной ниже, является, как уже упоминалось, установление связи между типами пойменных рек (пойменных массивов) и типами канального процесса, идентифицированными Государственной гидрометеорологической службой. Связь между типами пойменных рек и канальных процессов была предложена И. В. Поповым в 1969 г. и включена в ряд нормативных документов. Речные поймы можно разделить на две основные группы: современные и унаследованные. Современные поймы характеризуются наиболее активными пойменными процессами (наличие пойменных потоков), эрозионно-аккумулятивными явлениями и тесной связью с типами канальных процессов, которые в настоящее время наблюдаются. Унаследованные поймы - реликвия, могут иметь как речное, так и озеро, не очень активны. Они были сформированы в условиях различного содержания воды, чем текущие. Однако в этом случае существует также тесная связь между этими поймами и типом процесса канала, который произошел, когда эти поймы были сформированы. Так, например, на унаследованных поймах системы прибрежных валов (вентиляторы русла

реки) находятся, как правило, по своему составу, отличные от тех, которые встречаются в современных пойменных массивах.

Современные поймы подразделяются, в свою очередь, на два основных класса - поймы извилистых рек и островных пойм.

Поляны извилистых рек подразделяются по типам российского процесса в поймы ограниченных, свободных и неполных извилистых, тогда как поймы в незавершенном извилистости, благодаря каналам выпрямления, занимают положение, переход к островным поймам.

Островные поймы формируются в условиях незавершенных извилистых, пойменных и канальных многорукавностей. Структура островных пойм характеризуется значительной фрагментацией, прежде всего потому, что речные каналы, существующие в условиях многорукавости, могут развиваться по разным схемам деформации (типы речных каналов). В этих условиях часть массива имеет обратный наклон поверхности (вверх по течению) и, следовательно, обратное затопление по сравнению с наблюдаемыми в извилистых условиях. В то же время, когда канал, образующий островную пойму, меандр, могут быть случаи, когда острова соединяются с берегами канала и образованием полос, представленных этими сочлененными островами вдоль реки. Они хорошо известны по образцу вентиляторов движения канала (системы прибрежных валов), где концы вала соответствуют реке.

Можно также выделить в особую группу пойм, иногда образующихся при развитии канализационного процесса бокового типа с рядами прямолинейных прибрежных валов, называемых: Р. А. Еленевский, искаженный, так как прямые гривы тянулись вдоль Река оказывает минимальное влияние на развитие течений в пойме. Иногда на горных реках обширные галечные перепады, образовавшиеся во время

катастрофических наводнений и существующие в течение многих лет без значительных деформаций в плане, могут развиваться в отдельные пойменные массивы. На поверхности гальки осаждаются мелкие частицы осадка, вплоть до глинистых, появляется почвенный слой, развивается травянистая, кустарниковая и даже древесная растительность. При прохождении другого катастрофического наводнения верхний слой такой поймы разрушается, и снова образуется галька. Это наблюдается на реке. Псевдоускания в Лазаревской области (40 км к северу от города Сочи). Такой способ формирования поймы встречается только на одной реке и поэтому заранее рассматривает ее как тип поймы. В целом поймы горных рек изучены слабо, но, вероятно, в последующем можно найти многочисленные примеры формирования пойменных массивов на гравии бок о бок в катастрофических наводнениях.

Таким образом, шесть типов канального процесса, которые имеют определенные типы деформации канала в плане, соответствуют их типам резных пойм. Следовательно, основные факторы формирования пойм - это то же самое, что и канальный процесс - водный режим и поток осадков.

Таким образом, поймы рек можно рассматривать как особую форму переноса осадков, которая называлась условно необратимыми деформациями. Существуют вторичные факторы, которые оказывают значительное влияние на особенности структуры пойменных массивов.

Большое влияние на формирование пойм - это отношение объемов взвешенных и донных наносов, переносимых потоком. Небольшой объем взвешенных отложений приводит к образованию небольших пойменных почв, больших - повышенных. Эти типы пойм наиболее четко выражены с ограниченным и свободным извилением. Согласно классификации Р. А. Еленевского, помимо этих двух подтипов выделяются песчаные и грязные

поймы, наиболее развитые под свободными извилинами, по этой же признаке (баланс взвешенных и донных отложений).

Такие вторичные факторы, как удаление делювиального оврага, наиболее выражены в узких долинах, т. е. с ограниченным извилистом. Эти абсорбции могут даже привести к появлению склона поверхности поймы от склонов долины до русла реки. Тот же эффект может быть получен в процессе образования болота (пойманные болотные поймы). Термокарст может вызывать появление ловушек и озер на поверхности пойм. Песчаные поймы со свободными извилинами в случае, если один извилистый пояс расположен в дне долины с так называемыми песчаными поймами; При наличии следов прежнего положения извилистых поясов образуются степно-гривенные поймы, а при наличии остатков они остаточные желоба. Глинистые поймы с свободным извилистом с высоким содержанием подвешенных осадков образуют возвышенную глинистую пойму и с небольшим количеством стоков, когда образуется только тонкий слой, а высота поймы замедляется, пониженное суглинисто-грибковое разнообразие.

В незавершенном извилистости и частом затоплении пойм, а также в условиях низких зарядов взвешенных осадков образуется крупнозернистая песчаная пойма, а с еще большим затоплением и более высоким стоком взвешенных наносов появляется пойменная пойма, В этом случае массив может быть разбит не одним, а несколькими каналами.

На пойме, образованной в условиях пойменной мнорукавности, большое влияние оказывает близость дельты реки. Основными разновидностями поймы являются дельта, стареоделиты (возвышенные острова), слива и подводная (прилегающая к устью моря) пойма.

Разновидности пойменных зон с канальным зефиром могут представлять собой оросистую пойму (острова не заросшие, возвышенные части осредки) и островную пойму, представленную растительными островами с развитой пойменной фацией аллювия. Интересны разновидности островных пойм в условиях больших амплитудных колебаний уровня воды, например, на реке. Тунгуска, где самые высокие уровни наводнения поднимаются над низиной на несколько десятков метров, образуются высотные (до 20 м и более) осажженные острова. В зависимости от размера осадков острова, образованные в основании валунами, галькой и более мелкими частицами, могут возникать до глинистых отложений вблизи поверхности слоев, образующих остров. Иногда есть поймы, образованные оторванными от побережья галькой побочными продуктами.

Таковы разновидности пойм, развивающихся в условиях совместного временного процесса. Среди унаследованных (древних) пойм различают несколько типов. Прежде всего, это надземные и подводные поймы, названные так потому, что русло реки в этих случаях разрезается на морену и коренные породы, соответственно, лежащие под дном долины, соответственно. Сама пойма - это либо часть дна долины, либо обширные равнины (невывраженные долины). Образование таких пойм не связано с запланированными деформациями современной реки. Процесс наводнения в современных условиях проявляется только в виде взвешенных отложений вдоль берегов канала. Поэтому образуется широкий прибрежный вал. Два других разновидности унаследованных пойм, названных озером-плавневым Р. А. Еленевским и древним озерно-плавневой поймы, имеют озерное происхождение. Они представляют собой случаи, когда современный поток пересекает озерную пойму. В случае древней озерной поймы значительное влияние оказывает влияние процесса формирования торфа (образование выпуклого мха).



Р. А. Еленевский также определил низменные равнины и пойменные равнины. Оба этих типа поймы встречаются, соответственно, в удлинениях и долинах долин в условиях неандерриториальных типов речных каналов. В первом случае осаждение взвешенных осадков приводит к образованию высокого и широкого берегового берега, перекрывающего дно долины древнего происхождения, во втором случае этот вал является низким и сильно разнесенным. Существует также так называемая лиманная пойма, оставшаяся от кочевых разливов вдоль степи в период таяния снега, так называемых лиманов. В этих условиях обычно образуются три высотных берега пойм, которые, по-видимому, связаны с особенностями гидрографа временного течения. Очевидно, что листовенные и озерные поймы были сформированы в условиях русла реки, проходящей через долину, которая прекратилась только в современную климатическую эпоху.

## 2. Взаимодействие руслового и пойменного потоков

### 2.1. Общие положения

Русла с поймами - особый случай составных пород, отличительной особенностью которых является наличие двух или более потоков, движущихся с разными скоростями параллельно или под разными углами друг к другу. При взаимодействии с такими потоками возникают дополнительные сопротивления, которые существенно изменяют пропускную способность таких каналов. Настоящая глава посвящена изучению этой проблемы.

Следует отметить, что подобные явления могут возникать, когда поток течет непосредственно вдоль поймы, глубина и шероховатость которых обычно резко изменяются по ширине. Возможные случаи резкого изменения шероховатости слоя и поймы без заметного изменения глубины.

Последние случаи также подлежат рассмотрению, поскольку разница в скоростях потока, которая является основной причиной влияния их взаимодействия, изменения сопротивлений и пропускной способности, может быть весьма значительной.

Первая информация об особенностях пропускной способности реки с поймами приведена Ф. Форххаймером [1], которая указывает, что расчетное значение расхода воды, определяемое выражением (1.1), будет больше фактического значения:

$$Q = Q_p + Q_n = \omega_p C_p \sqrt{h_p I_p} + \omega_n C_n \sqrt{h_n I_n}, \quad (1.1)$$

где  $Q$  – совокупный расход воды в русле и пойме, м<sup>3</sup>/с;

$Q_p$  – расход воды в русле, м<sup>3</sup>/с;

$Q_n$  – расход воды на пойме, м<sup>3</sup>/с;

$\omega_p$  – площадь живого сечения русла, м<sup>2</sup>;

$\omega_n$  – площадь живого сечения поймы, м<sup>2</sup>;

$C_p$  – коэффициент Шези русловой части потока, м/с<sup>1/2</sup>;

$C_n$  – коэффициент Шези пойменной части потока, м/с<sup>1/2</sup>;

$h_p$  – глубина русла, м;

$h_n$  – глубина поймы, м;

$I_p$  – уклон свободной поверхности руслового потока, в долях единиц;

$I_n$  – уклон свободной поверхности пойменного потока, в долях единиц.

Он объясняет уменьшение пропускной способности канала из поймы, ссылаясь на работу Гранца (1926), формирование вихрей с вертикальной осью вращения, возникающей на границе между каналом и потоками поймы.

Несколько позже М. Эгли [15] провел обширные исследования взаимодействующих потоков на крупномасштабной модели канала Эльзы в Меце. Длина канала в масштабе 1:20 составляла 209,2 м, а участок был трапециевидным каналом с дном шириной 1,65 м с односторонней, а также трапецеидальной поймой. Однако подробные эксперименты Эгли не выявили особенностей поведения течений в составных породах. М. Эгли как один из основных выводов приводит к следующему: «Распределение общего течения между различными сечениями сечения пропорционально глубине течений и шероховатости стен каждой части». Хотя Эгли установил наличие поперечных токов, он объяснил их неравномерным режимом потока в составном канале.

Примерно в то же время Б. В. Поляков в своей монографии [12] привел ряд кривых для потока воды для канальной части реки. Дон, на которых их перегиб и значительное отклонение влево четко прослеживаются на уровнях, превышающих уровни воды, поступающей в пойму. Однако Поляков также не дал объяснений этому факту.

И только в 1947-1950 годах. Г. В. Железняков [18], который провел анализ экспериментальных данных о канальных и пойменных потоках, полученных на модели прямолинейного канала с двухсторонней поймой, обнаружил значительное снижение средних и поверхностных скоростей потока канала под влиянием Из поймы, впоследствии называемой кинематикой. Взаимодействие канала без давления и потоковых потоков. Исследования Железнякова инициировали широкое изучение различных аспектов этой сложной и очень важной проблемы для решения ряда практических задач.

## 2.2. Лабораторные исследования

Первоначально исследования проводились на моделях различной длины, где был сформирован канал с одной или двумя поймами с параллелизмом их геометрических осей.

Несколько позже Н.Б. Барышников [6, 17] и А. Л. Радук [8] провели экспериментальные исследования взаимодействия потоков, протекающих по поверхности с резко различной шероховатостью и примерно равной глубине по ширине

На модели в лаборатории LGMI (RSHU) была сформирована кровать, на которой по всей длине установки были размещены две разные полосы (1,8 и 4,5 см) на двух полосах шириной 0,75 м, а нижняя часть нижней части была покрыта Толщина стекла 7 мм.

Таким образом, были сформированы три отсека с разной шириной оболочки по ширине. Изучение процессов взаимодействия потоков в этих отсеках проводилось по методике, разработанной ранее в РГГМУ [3], т. Е. Измерения проводились в режиме, близком к однородному как в изолированном, так и в взаимодействующем потоках.

Особенность экспериментов, проведенных под руководством Н.Б. Барышников, как на модели канала с поймами [16], так и на моделях слоя с нерегулярной шероховатостью по ширине [6], был изучен эффект взаимодействия, возникающий, когда динамические оси канального и пойменного потоков не параллельны.

Из анализа полученных результатов следует, что при движении потоков с разными скоростями на границе раздела их разделения (при малых скоростях) появляется вертикально расположенная волновая поверхность. По мере увеличения скоростей от него отделяются вихри с

вертикальной осью вращения, которые, согласно закону Кутта-Жуковского, переходят в поток, движущийся с большими скоростями. Следовательно, эти вихри, захватывающие массы жидкости затопленного потока, переносят их в поток канала, тем самым осуществляя массовый обмен между потоками в слое и пойме. В результате этого происходит подавление потока канала потоком.

В. Н. Гончаров [3] провел теоретический анализ взаимодействия канальных и пойменных потоков [3], а наличие вихрей на границе взаимодействующих каналов и пойменных потоков впервые было установлено экспериментально И. П. Спицыным и позже подтверждено Р. Х. Селлиным (рис. 2.1).

Интересные результаты были получены А. Л. Радюком при измерениях на реке. Великий Енисей на участке длиной 300 м с каменистой односторонней поймой. «С очень большой разницей в скоростях канала (5 м / с) и пойменной равнине (0,4 м / с) вихревая дорожка была хорошо видна вдоль всей контактной линии потоков поймы в канале». Зона вихрей захватила несущественную часть поймы и большую часть ширины канала. Вихри с вертикальной осью вращения генерируются сразу после слияния поймы, а канал течет и вращается против часовой стрелки, увеличиваясь в диаметре до определенной степени. Диаметр вихрей варьировался от 15 до 150 см. Затем вихревые структуры начинают смещаться в сторону потока канала, угловая скорость их вращения уменьшается, и происходит распад вихрей на меньшие локальные массы, рассеивающиеся в окружающей среде. Продолжительность «жизни» отдельных вихрей составляла 2-6 с [8]. "

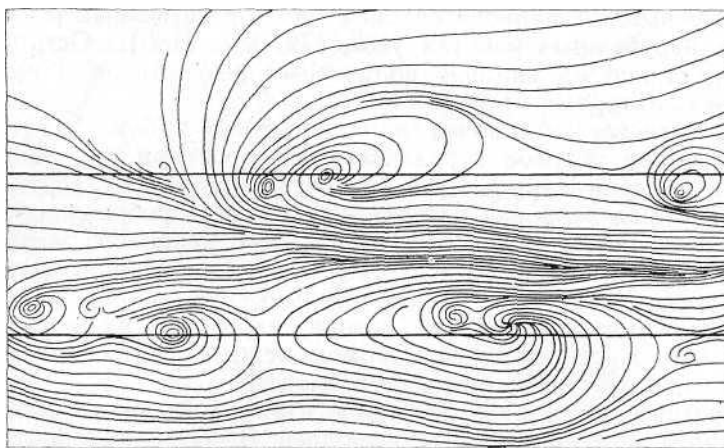


Рисунок 2.1 – Вихри, образующиеся на границе раздела руслового и пойменного потоков. Опыты Селлина

Значительное количество энергии расходуется на процесс образования, движения и потока вихрей вдоль потока канала, а также на замещение токов, что приводит к уменьшению емкости канального отсека и деформации поля его скоростей. Величину дополнительного сопротивления в этом случае можно оценить по формуле  $\tau = A_B(\partial V / \partial b)$ , где  $A_B$  - коэффициент турбулентного обмена между взаимодействующими потоками;  $\partial V / \partial b$  — градиент осредненных по вертикали скоростей в зоне взаимодействия потоков.

Таким образом, сопротивление пропорционально разности, точнее, к градиенту скорости взаимодействующих потоков.

Поэтому аналогичная картина сопротивлений наблюдается и при взаимодействии потоков, протекающих по поверхности с резко различной шероховатостью по ширине, где градиент скорости на их границе обусловлен не разностью глубин, а разницей в Шероховатость дна.

Для экспериментального изучения таких сопротивлений был разработан и применен первоначальный метод в РГГУ, основанный на выделении взаимодействующего канала и потоках пойменной тонкой (5-7 мм) продольной стеклянной разделительной стенки [3]. Согласно этой методике, увеличение сопротивления определяется на основе данных

измерений параметров потока как во время их изоляции, так и во время их взаимодействия.

Результаты работ раннего периода, обобщенные В.Н. Гончаров, сводится к следующему: для небольших наводнений в пойме идет поток канала, влияние на него невелико. Это влияет на уменьшение пропускной способности канала в результате потока жидких масс из канала в пойму и наоборот, от поймы к каналу, уменьшая интенсивность циркуляционных токов и выравнивая диаграммы распределения скоростей вдоль Глубина потока. На глубинах  $h_{\text{поймы}} > 0.2 h_{\text{русла}}$  по словам В. Н. Гончарова [4], ведущим потоком является пойменная равнина. Отмечены следующие отличия:

- массовый поток в канале, залитый поймой, уменьшает скорость до нормальных значений для пойменной равнины на гораздо большей длине, чем при низкой пойме;

- выравнивание скоростей по ширине канала при выравнивании изгиба;

- из-за увеличения потока жидкости из постели и поймы, еще больше торможение потоковой поймы увеличивается. Поэтому, несмотря на значительную разницу в глубинах потоков и потоков поймы, скорости по ширине потоков каналов и потоковых равнин выравниваются.

В следующий период резко возросло количество экспериментальных исследований схематизированных моделей канала, изогнутых по каналу и прямолинейной пойме. Все эти исследования можно разделить на три группы.

Первая группа - канал прямоугольного сечения имел один или два изгиба и плоское дно без поперечного уклона.

Вторая группа - слой русла в плане представляет собой чередующиеся изгибы, как правило, с разными углами вращения и плоскими без поперечной уклона.

Третья группа - это канал, который аналогичен предыдущему случаю: на пойме есть речные долины и другие образования, присущие полномасштабным объектам.

Следует отметить, что большинство экспериментов были направлены на выяснение основных закономерностей и физической картины взаимодействия канальных и пойменных потоков. Поэтому авторы выбрали произвольные модели без учета критериев моделирования, и только в работах В. Г. Саликова, моделировавших конкретные участки рек Байкало-Амурской магистрали, модель была рассчитана на основе критериев подобия. Основные выводы, полученные в результате этих работ, можно резюмировать следующим образом:

- Основные закономерности взаимодействия канальных и пойменных потоков и течений с различной шероховатостью по ширине обнаруживаются с непараллелизмом их осей;
- С помощью разработанной типизации идентифицируются четыре типа взаимодействия между канальным и пойменным потоками на основе взаимного расположения их динамических осей;
- Установлен характер преобразования полей скоростей потока канала под влиянием потока поймы и поймы под влиянием потока канала;
- Разработаны различные рекомендации для учета влияния взаимодействия потоков каналов и поймы при расчете мощности составных пород.

В то же время модельные тесты не имеют недостатков, основными из которых являются:

- Недооценка влияния морфологии и поймы речного русла и изменений их морфометрических характеристик по длине водотока. Действительно, все основные экспериментальные работы были выполнены только на моделях, в которых берега поймы, имитирующие склоны долины, были строго



параллельны друг другу, а общая ширина слоя и поймы на моделях оставалась неизменной вдоль Длина потока;

- наличие прорывов в прирусловых валах в сочетании с многочисленными гривами, старожилами, пойменными озерами и другими морфологическими образованиями приводит к резкой разнице в природе процесса от модели, особенно на поймах. Эти особенности рельефа пойм на моделях не были воспроизведены;

На реках обычно наблюдаются альтернативные поймы, и в лаборатории большинство исследователей изучали поймы, которые имеют одинаковые следы. Исключением, пожалуй, является работа Саликова и Барышникова [7];

- несогласованность наклонов свободной поверхности (продольной и поперечной) на моделях с полномасштабными данными о поймах. Как следует из анализа ограниченных наблюдательных данных о склонах свободной поверхности пойменных полей, процесс их образования очень сложный и в основном определяется типом и морфологией пойм;

- зависимости, полученные на основе модельных тестов, имеют локальное значение; Они ограничены диапазоном вариаций параметров модели.

### 2.3. Натурные исследования процесса взаимодействия руслового и пойменного потоков

В период с 1962 по 1963 и 1966 годы ГГИ проводил специальные обследования наводнений на семи реках ЕТС. Результаты этих исследований обобщены Д.Е. Скородумов [5] и др. В 1970 году Государственный гидрометеорологический институт совместно с Институтом водных проблем Белоруссии на изгибе реки. Исследования также проводились в процессах взаимодействия канальных и пойменных потоков, когда они пересекали свои оси под углом  $135^\circ$ . Результаты этих исследований обобщены И.Ф. Карасев [14]. В дополнение к этим специальным исследованиям работа Московского гидромелиоративного института по изучению течений в пойме р. Оки, работа Селлина на реке. Ванна, исследование персонала ГГИ на реках Поломет и Обь [10].

Другое направление в изучении процессов взаимодействия канальных и пойменных потоков на основе полевых данных основано на анализе обширных материалов измерений вспашки, проводимых в сети Росгидромета и в различных проектных организациях. Такой анализ был проведен Н.В. Барышников по измерениям в 27 реках СССР [7] и Г. В. Железнякова [17] по материалам реки Оки.

Наиболее ценными и полными являются: исследования ГГИ 1962-1963, 1966 и 1970 гг. Как по широте охвата, так и по глубине анализа, обобщенным Скородумовым [5], Карасевым [14] и Барышниковым [9], На основе данных Росгидромета. В результате анализа полевых материалов были получены интересные результаты, которые в основном подтвердили выводы лабораторных экспериментов.

В то же время полномасштабные исследования позволили установить в качестве фактора, определяющего значение сопротивления и характера взаимодействия между канальными и пойменными потоками, особенности

морфологического строения слоя и поймы в измерении Площадь и изменение морфометрических характеристик вдоль длины реки и с ростом глубин в русле реки и на пойме. Действительно, именно характер изменения ширины долины и, следовательно, ширины поймы определяет положение динамической оси пойменной равнины. Барышников [9] по данным р. Крыловка рядом с. Крыловка; R. Вложение в рзд. Таловый и р. Друть с. Городище установлен факт изменения во взаимном расположении динамических осей канала и потоков поймы с увеличением глубины в канале.

Естественные данные также позволяют установить наиболее частые случаи взаимного расположения геометрических осей слоя и поймы, динамических осей канальных и пойменных потоков и других особенностей полноводных водотоков и выработать рекомендации для их последующих лабораторных исследований.

Совместный анализ полномасштабных и лабораторных данных позволил разработать типизацию процессов взаимодействия канальных и пойменных потоков на основе учета особенностей морфологии слоя и поймы в районе поселения.

## 2.4. Трансформация поля скоростей при взаимодействии руслового и пойменного потоков.

### 2.4.1. Трансформация поля скоростей руслового потока под воздействием пойменного.

Характер трансформации полей скорости потока канала под влиянием поймы напрямую зависит от типа их взаимодействия. Рассмотрим преобразование полей скоростей для наиболее часто встречающихся второго и третьего типов взаимодействия потоков. Во втором типе, характеризующемся расходимостью динамических осей потоков, происходит поток массы потока канала вдоль поймы. Этот процесс сопровождается значительным увеличением наклонов водной поверхности потока канала на уровнях, превышающих уровень затопления пойменных равнин и, особенно, заклопов речных долин. Как следствие, наблюдается увеличение как средней, так и максимальной скоростей потока канала. Величина этого увеличения прямо пропорциональна углу  $\alpha$  между динамическими осями взаимодействующих потоков.

Первым, кто установил этот факт, был Н.В. Барышников [27], представивший график зависимости  $v_p/v_{p0}=f(h_p/h_{p0}, \alpha)$ . Анализ этого графика, приведенный в следующей главе, позволяет сделать вывод о том, что средние скорости существенно возрастают как с увеличением глубины, так и с уменьшением угла  $\alpha$ . Действительно, на той же самой глубине относительная средняя скорость равна  $v_p/v_{p0}=0.65$  ( $\alpha = 45^\circ$ ), при  $\alpha = -45^\circ$  (второй тип)  $v_p/v_{p0}=2.0$ , т.е. эти скорости различаются примерно в 3 раза.

Однако изменяются не только средние скорости потока, но и все поле скоростей потока канала под влиянием поймы. В качестве примера рассмотрим данные на стр. Пьяный у деревни Камкино, где динамическая

ось потоков расходится под углом  $\alpha = 45^\circ$ . Как можно видеть на рис. 2.2, диаграмма распределения средних по вертикалям скоростей по ширине канала, полученная по данным полномасштабных измерений на самом высоком уровне 666 см, значительно выше аналогичной, но полученной на основе Расчета по формуле Шези-Маннинга. Отклонения вычисленных средних данных по вертикалям скоростей от реальных составляют в среднем 32% с максимальным значением 45%.

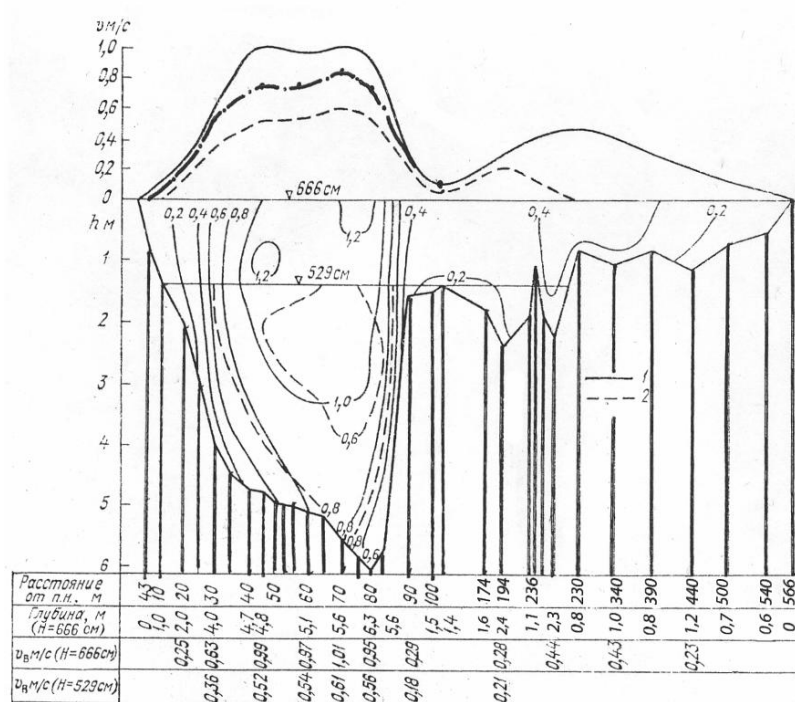


Рис. 2.2 - Профиль поперечного сечения с изотопами и кривыми распределения средних на вертикалях скоростей по ширине гидроствора р.Пьяны - д.Камкино. Данные измерений 1953г. при уровнях: 1 – 666 см; 2 – 529 см, 3- данные рассчитанные по формуле Шези - Маннинга.

Расчет средних значений по вертикалям скоростей проводился на основе следующих предположений:

- средняя скорость на вертикали определялась по формуле  $v = \frac{h^{2/3} I^{1/2}}{n}$
- поскольку имеются данные на уровне затопления уровня речных долин, расчетное значение средней скорости на более высоком уровне определялось на основе следующего предположения  $v_{ш} = v_{рб} \left( \frac{h_p}{h_{рб}} \right)^{2/3}$  те. Предполагалось, что значения коэффициентов шероховатости и наклонов поверхности воды не изменяются с увеличением уровней.

В качестве примера для третьего типа взаимодействия потоков рассмотрим р. Ветлуга около деревни Быстри, где динамическая ось потоков сходится под углом  $\alpha = 500$ . Как можно видеть на рис. 2.3, при затоплении поймы на 171 см (выше уровня края русла реки) наблюдается резкое (в 2-3 раза) уменьшение средних скоростей потока по вертикали. Действительно, при расчете этих скоростей с использованием формулы Шези-Маннинга мы получаем значительно (несколько раз) высокие значения средних по вертикали скоростей потока. Действительно, величины этих преувеличений достигают 356% при средней ошибке 211%.

Результаты расчётов приведены в таблице 2.2

Таблица 2.1 Результаты расчётов средних на вертикалях скоростей по формуле Шези-Маннинга р. Пьяна, д. Камкино  $\alpha = -45^0$

|                        |      |      |      |      |      |
|------------------------|------|------|------|------|------|
| $h_{рб}$ , м           | 2.6  | 3.4  | 3.7  | 4.2  | 4.9  |
| $h_p$ , м              | 4.0  | 4.8  | 5.1  | 5.6  | 6.3  |
| $v_{изм}$ , м/с        | 0.63 | 0.99 | 0.97 | 1.01 | 0.95 |
| $v_{ш}$ , м/с          | 0.48 | 0.66 | 0.67 | 0.74 | 0.66 |
| $\Delta v/v_{изм}$ , % | 24.0 | 33.5 | 44.8 | 26.7 | 30.5 |

Таблица 2.2 Результаты расчётов средних на вертикалях скоростей по формуле Шези-Маннинга р. Ветлуга, д. Быстри  $\alpha = 50^0$

|                        |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| $h_{рб}, м$            | 2.5  | 3.7  | 5.4  | 7.3  | 7.1  | 7.3  | 7.4  | 3.3  | 1.4  |
| $h_p, м$               | 4.2  | 5.4  | 7.1  | 9.0  | 8.8  | 9.0  | 9.1  | 5.0  | 3.1  |
| $v_{изм}, м/с$         | 0.46 | 0.45 | 0.30 | 0.44 | 0.38 | 0.23 | 0.21 | 0.1  | 0.1  |
| $v_{ш}, м/с$           | 0.93 | 1.02 | 0.90 | 10.1 | 1.15 | 1.29 | 1.15 | 0.91 | 0.27 |
| $\Delta v/v_{изм}, \%$ | 102  | 126  | 100  | 237  | 161  | 239  | 356  | 333  | 170  |

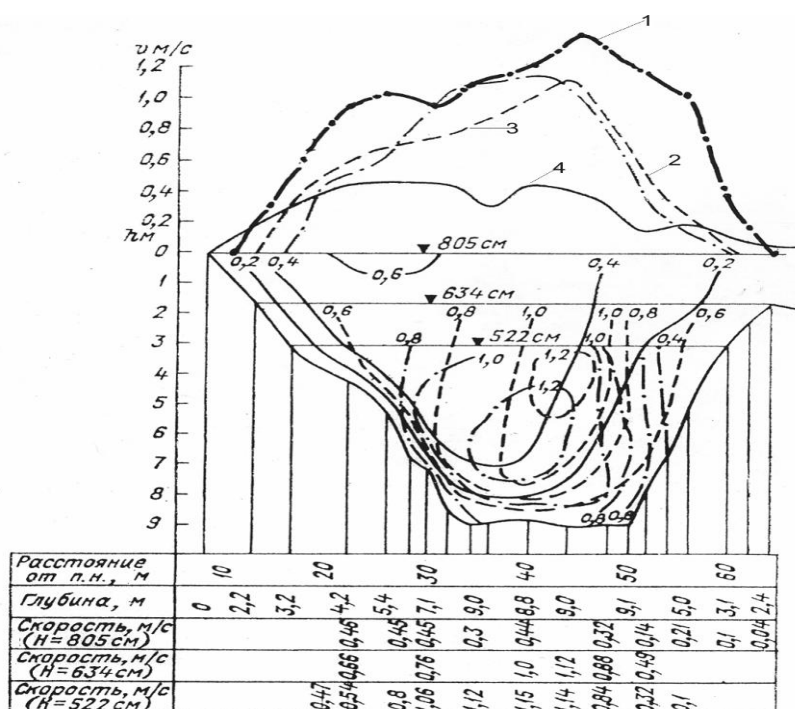


Рис. 2.3 - Профиль поперечного сечения с изотопами и кривыми распределения средних на вертикалях скоростей по ширине гидроствора р.Ветлуги-д.Быстри.

1-данные полученные по формуле Шези; данные измерений 1968г. при уровнях: 2 – 805 см, 3 – 634 см, 4 – 522 см

Конечно, крайние случаи рассматривались, когда углы сходимости и расходимости динамических осей потоков составляли соответственно 500 и 450, что на 15-200 больше, чем их максимально допустимые значения при выборе места расположения гидро- Решения, рекомендованные

Руководством [22]. Однако в реальных условиях такие варианты вполне возможны. Еще более значительные отклонения будут наблюдаться при более значительных углах  $\alpha$ , хотя эти случаи рассматриваются в специальных исследованиях, а не в основной сети Росгидромета.

В большинстве случаев, особенно при проектировании и строительстве мостовых переходов, необходимо иметь информацию не только о средних скоростях потоков каналов, но и о распределении средних по вертикалям скоростей по ширине канальных потоков. Известные методы (А. В. Караушева и др.) Позволяют решить эту проблему с достаточной точностью для практики, но только для условий, при которых не происходит влияния наводнений на русле реки, т. е. для аслоновых слоев. Поэтому необходимо не только в научном плане, но и для практических расчетов рекомендовать, как этот эффект учитывается при расчете распределения скорости по ширине потока. Первые исследования в этом направлении были выполнены N.B. Барышников [19, 27], в результате чего он установил, что величина этого влияния распространяется по всей ширине потока канала на малых и средних реках. В этом случае диаграмма распределения средних по вертикалям скоростей приобретает S-образную форму с точкой перегиба на уровне затопления заклопок речных долин. На более высоких уровнях диаграмма выпрямляется и приближается к соответствующей, но рассчитывается по формуле Шези.

Более сложная задача - выявить влияние этого эффекта на распределение средних по вертикали скоростей вдоль ширины потока на больших реках.

К сожалению, информация о них крайне скудна. Действительно, в дополнение к информации о реке. Амур [19, 27], любые другие данные неизвестны, т. е. данные для р. Купидон на самом деле уникальны. Рассмотрим их более подробно. В 1958 году экспедиция Ленгидап провела



измерения потока воды на реке. Купидон с. Кумара во время наводнения на затопленной пойме, близкой к 1% от предложения. Сечение р. Купидон на этой гидроструктуре характеризуется глубоким каналом, шириной 675 м и относительно узкой поймой (0,4 ширины канала). Взаимодействие потоков полностью согласуется с типом III по классификации Н. Б. Барышникова.

Анализ полевых данных, показанных на рис. 2.4, позволил установить, что воздействие потока поймы на канал ограничено частью, приблизительно равной 60% ширины потока канала (475 м). Действительно, как видно на рисунке, вблизи поймы наблюдается ярко выраженная S-образная форма кривых

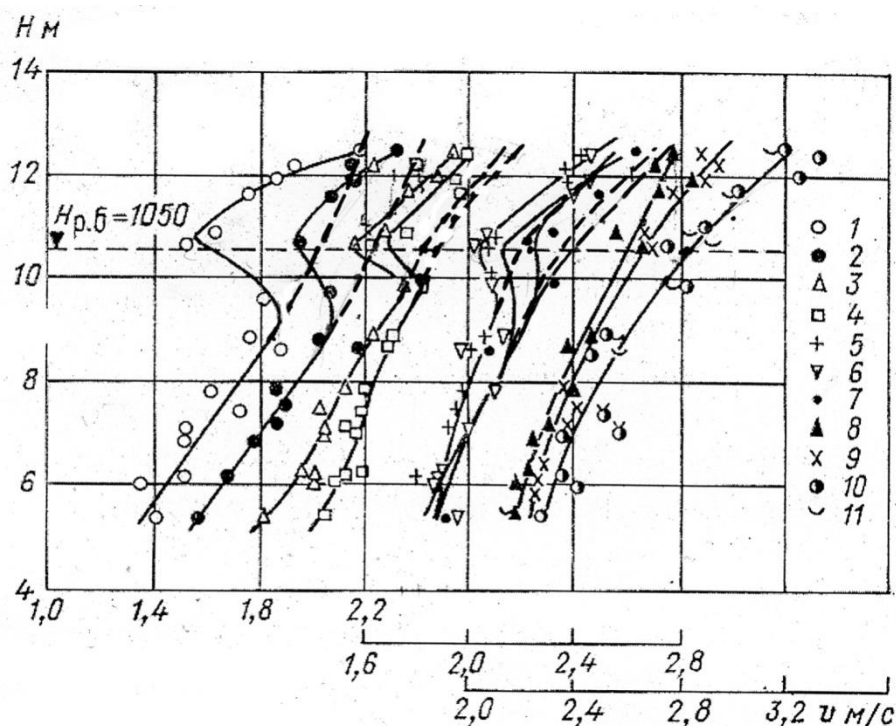
$$V_b = f(H).$$


Рис. 2.4 Кривые зависимости средних скоростей на вертикалях от глубины на р. Амур, 1958 г.

Когда они уходят от этого берега, кривые выпрямляются, а затем постепенно (между 8 и 9 вертикалями) приобретают форму параболы. Мы провели дополнительный расчет средних скоростей в вертикалях на уровнях выше уровней затопления поймы. Установлено, что расчетные значения по формуле Чезина-Мэннинга для второго типа отличаются от данных поля в

среднем на 24,2% при максимальном значении 34,6%. Как видно, эти величины весьма значительны, и их регистрация является обязательной.

#### 2.4.2 Трансформация полей скоростей пойменного потока под воздействием руслового потока

Следует отметить, что качество полномасштабной информации о гидравлических характеристиках пойменных потоков, как правило, очень невелико. Действительно, несмотря на более сложную морфологическую структуру пойм и их гораздо большую ширину, чем каналы, число высокоскоростных вертикалей на них намного меньше, чем в каналах. В качестве примера можно привести приведенное выше п. Ветлуга около деревни Быстри, соответственно, на рис. 2.4, где измерение максимального расхода воды в канале шириной около 60 м составляло 6 высокоскоростных вертикалей, а на пойме шириной более 700 м были только два. Конечно, это значительно усложняет анализ и требует участия лабораторных данных.

Исследование Г.В. Железнякова [28], Н.В. Барышников [18, 19] и другие авторы пришли к выводу, что ускоряющий эффект потока канала на пойме во время лабораторных экспериментов простирается на расстояние 5-6 каналов. Однако следует иметь в виду, что в лабораторных условиях, как правило, были выполнены гладкие, выполненные из бетона поймы с коэффициентами шероховатости 0,010-0,014. В то же время естественные поймы, как известно [3,4], напротив, имеют повышенную шероховатость, тогда как они могут достигать значений 0,10 -0,16 и даже 0,20. Поэтому, как показывает анализ данных полевых измерений, ускоряющий эффект потока канала на пойме в естественных условиях осуществляется на гораздо меньшей ширине, чем в лаборатории. Иногда на сильно заросших поймах зона этого влияния уменьшается до 1,5-2,5 ширины канала.

Анализ лабораторных данных показывает, что в приречной части поймы наблюдается значительное увеличение скоростей (иногда в 2 раза) поймы. Однако в естественных условиях долины рек обычно перерастают растительностью, включая кусты и даже леса. Это, в свою очередь, приводит к тому, что именно в приречной части пойменных потоков, как правило, скорости малы.

Рассмотрим пример р. Я пью в деревне Камкино, где имеются достоверные данные наблюдений. Как видно на рис. 2.2, в придонной части пойменного потока средние вертикали скорости уменьшаются до 0,10-0,12 м / с, а затем существенно возрастают до 0,43-0,44 м / с. Аналогичная картина наблюдается на реке. Луга в деревне. Толмачево (рис. 2.5, третий тип взаимодействия потоков), где, когда максимальный поток воды пропускается ( $H = 352$  см), средние скорости над призматическим валом по вертикали также значительно снижаются до 0,10 м / с, Затем увеличиваются до 0,42 м / с.

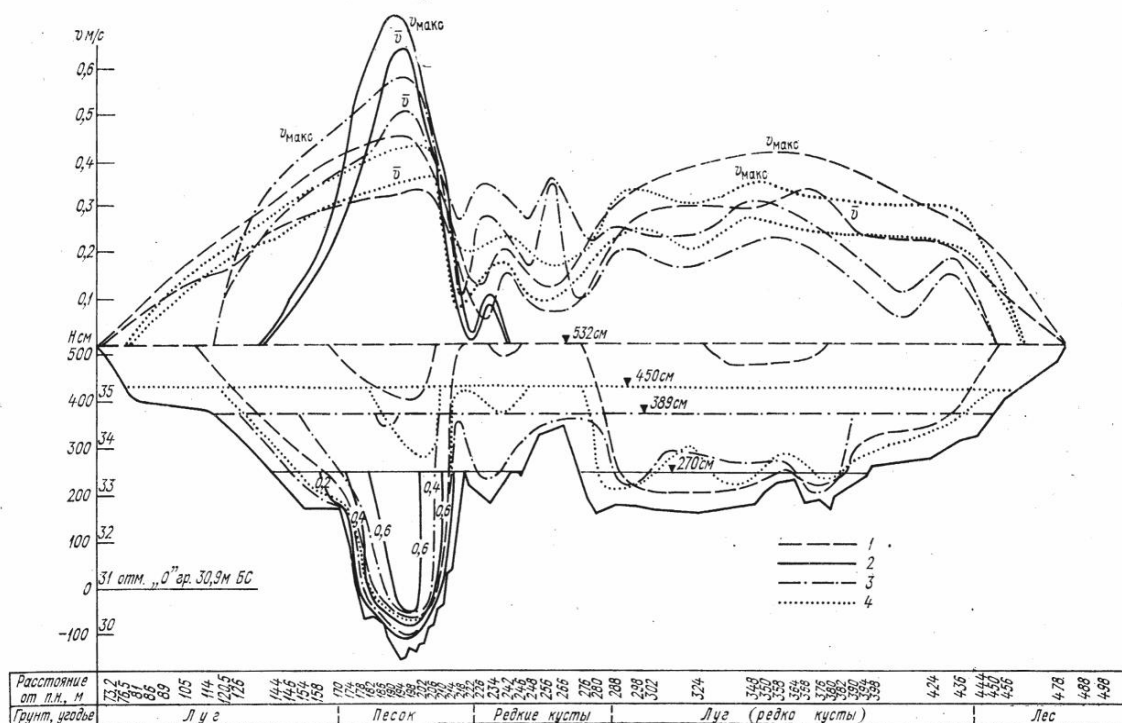


Рис. 2.5 Профиль поперечного сечения с изотопами и кривыми распределения средних на вертикалях скоростей по ширине гидроствора р. Луги – пос. Толмачёво.

Проведенный анализ позволяет сделать следующие выводы о преобразовании скоростных полей потоков пойменных:

- ширина зоны ускоряющего влияния потока канала на пойме изменяется от 1,5 до 6,0 ширины канала и обратно связана с шероховатостью поймы;
- ускоряющее влияние потока канала объясняется тем, что поверхностные слои проточной воды канала поступают в пойму из канала, имеющие скорости, намного превышающие скорости потоков поймы;
- ускоряющее влияние потока канала на пойму значительно больше при взаимодействии потоков II типа, чем с III типом;
- прирувывая древесина, обычно заросшая растительностью, в том числе кустарниками и деревьями, значительно снижает влияние взаимодействия течений и оказывает значительное ингибирующее действие на пойму.

## 2.5. Влияние эффекта взаимодействия руслового и пойменного потоков на их транспортирующую способность

### 2.5.1 Общие положения

Принимая во внимание, что основной сток осадков происходит в периоды наводнений и наводнений, необходимо оценить влияние влияния потоков течений на пропускную способность канала, что, к сожалению, является В настоящее время недостаточно оценены.

При различных типах канальных процессов наблюдаются периодические увеличения или уменьшение нижних маркеров русел реки, особенно резко выраженные на берегах, или движение каналов по дну долины, что приводит к эрозии или рекультивации различных частей поймы

И пойменные массивы. В то же время вопрос об изменении пропускной способности потока вдоль его длины остается неясным.

В низкие периоды пропускная способность потока низкая, но почвы и осадки практически не попадают в русло реки в течение этого периода, поэтому поток, разрушающий хребты рифтов или берегов пойменных полей, увеличивает потребление осадка, Он соответствует его пропускной способности.

В то же время проблема осаждения и промывки почв и осадков с различных участков пласта и поймы не изучена подробно. Современные гидроморфологические «теории» канальных процессов в основном носят описательный характер. Недостаточно разработали свое гидравлическое обоснование, в частности, нет расчетных зависимостей, даже приближенных, на основе уравнений гидромеханики или гидравлики.

Ведущие исследователи указали на необходимость гидравлического обоснования теории канальных процессов. Однако его развитие в значительной степени тормозится отсутствием теории турбулентности и ясных представлений о законах деформаций канала и соответствующих структур гидравлического течения. Кроме того, для проверки ряда понятий необходимо иметь надежные экспериментальные (лабораторные и полномасштабные) данные наблюдений для стока сточных вод, затраты на осадок, деформации каналов и пойм и транспортную способность потока в сечениях значительной длины рек, полученных одним методом.

Недавние достижения в проблеме взаимодействия между канальными и пойменными потоками позволяют сделать ряд интересных выводов уже сейчас, что подтверждается уникальными данными наблюдений Государственного гидрологического института на реке. Обь, река. Наводнение и реки Луга и Пян и Московский гидротехнический институт на реке. Оке.

Наиболее целесообразно рассмотреть эту проблему с учетом типизации канальных процессов и обширных экспериментальных данных, выполненных как на жестких, так и на эродированных моделях каналов с поймами, особенно при пересечении их геометрических осей.

Анализ экспериментальных данных позволяет сделать предварительный вывод о том, что в процессе пересечения его потока с поймой под большими углами обычно образуется вихревая зона, размеры которой зависят от отношения глубин и скоростей потока Взаимодействующих потоков. Вихревая зона является причиной осаждения осадка в канале и, как следствие, образования в этом месте прокатки. При длительных наводнениях и больших углах пересечения ( $= 90^\circ$ ) кровать может быть полностью заполнена отложениями, и они начинают течь в пойму.

При наиболее распространенном типе канального процесса - свободном извилистом - наблюдается чередование пойменных массивов по длине реки. Между ними канальный поток пересекает пойму под углами, близкими к и даже выше  $90^\circ$ . Таким образом, в каждом пойменном массиве в его верхних частях, при затоплении речных долин и наводнений, следует ожидать осаждения осадочных отложений. Это и приводит к тому, что метки верхних частей массивов намного больше, чем знаки нижних частей, поскольку эти «языки удаления осадка» не успевают распространиться в течение периода наводнения, но депонируются в Верхней части массива. По-видимому, велика роль высокоуровневых извержений в процессе осаждения осадков в пойменные массивы. Именно через них основное количество осадка поступает в массивы, что обусловлено большими склонами свободной поверхности и, следовательно, скоростями прорывов.

Имеются также случаи резких изменений шероховатости в слое и пойме, без заметных изменений в глубинах, что приводит к существенной разнице в скоростях потока и, как следствие, к появлению эффекта их

взаимодействия и Следовательно, к изменению сопротивления и пропускной способности кроватей и пойм.

Анализ опубликованных данных и состояние вопроса о взаимодействии потоков каналов и поймы позволяют определить следующие основные вопросы:

- Влияние потока поймы на транспортировку взвешенных и донных осадков в основной поток;
- Транспортировка осадка непосредственно потоками пойм при его полном затоплении, а также осаждение осадка на пойме;
- взаимосвязь между канальными и пойменными процессами.

Последующий анализ и исследования показали, что в дополнение к ним необходимо разработать вопрос о взаимосвязи между морфологическим строением слоев и пойм с транспортной способностью потоков в них.

### 3. Описание модели и методика проведения экспериментов

#### 3.1 Общие положения

Циклоническая активность, которая усилилась в последние годы, привела к значительному увеличению частоты и мощностей катастрофических наводнений как в Европе, так и в Азии и на других континентах. Достаточно привести в качестве примера катастрофические наводнения, которые произошли в период с 1997 года по настоящее время на большинстве европейских рек: в Англии, Германии, Швейцарии, Франции и особенно на реках Восточной Европы (Польша, Чехия, Румыния и т. Д.), А также на юге России.

В мае 2010 года через Краков прошла высокая волна высокой воды: уровень воды в реке. Висла, в районе города, к концу 1997 года превысила уровень наводнения на 80 см. Из-за угрозы наводнения мемориальный комплекс был закрыт на месте концентрационного лагеря Аушвиц.

Самая сложная ситуация в Чешской Республике, где ситуация в 1997 году может повториться, когда ущерб от наводнений составил 30 миллионов евро. Около 2 тысяч жителей одного из деревень Чешской Республики должны были срочно эвакуироваться. В Сербии и Венгрии более 2000 человек также были эвакуированы из-за наводнений, вызванных ливневыми дождями. Из-за разлива рек обширные районы Румынии и Болгарии были затоплены. В Норвегии резкое майское потепление привело к наводнениям и оползням в разных частях страны. Основной маршрут, соединяющий юг и север страны, оказался заблокирован в нескольких местах. Из-за краха произошел разрыв железнодорожного сообщения.

К сожалению, как правило, измерения максимального расхода воды для таких катастрофических наводнений не были сделаны по ряду причин. Это связано как с требованиями безопасности, так и с быстротой прохождения особо проливных наводнений. Дополнительным фактором является также тот факт, что поймы, которые не были затоплены на протяжении десятилетий, а иногда и сотни лет на ряде европейских рек, были созданы как жилыми зданиями, так и промышленными структурами, что приводит к увеличению глубин Их наводнения.

Многочисленные конструкции гидротехнических сооружений предъявляют высокие требования к гидрологической информации, совершенствование методов расчета которых возможно только на основе полномасштабной или лабораторной информации.

В свою очередь, анализ методов расчета пропускной способности каналов с поймами позволяет выделить два наиболее перспективных метода расчета пропускной способности пойменных пластов:

- эмпирический, основанный на данных натурных наблюдений, в основном системы Росгидромета, и графических зависимостях вида



$V_p/V_{p.б}=f(h_p/h_{p.б},\alpha)$  - для русловой и  $\frac{Q_n}{Q_n + Q_p} = f\left(\frac{F_n}{F_n + F_p}, \frac{n_n}{n_p}, \beta\right)$  - для пойменной составляющих потока.

На основе использования для расчета системы уравнений непрерывности и потока с переменным объемом потока воды.

К сожалению, оба этих метода имеют недостатки. Эмпирическая потребность в дальнейшем уточнении на основе большего объема информации о поле. Последнее, особенно в системе Росгидромета, в последние годы имеет низкое качество. Действительно, как правило, максимальное потребление воды, особенно в пойменных упаковках, не измеряется. Кроме того, часто только для компонент канала ограничиваются измерениями. К сожалению, стоимость информации в системе Росгидромета в настоящее время очень высока, что ограничивает возможности для улучшения этого направления метода расчета.

Основным недостатком второго направления является отсутствие метода расчета первого и второго инерциальных членов уравнения на основе информации о морфометрических и других характеристиках пойм и потоков.

Исходя из этого и наших возможностей, целесообразно провести экспериментальные исследования по более крупным установкам. Однако недостатком всех лабораторных исследований является то, что они проводятся в стационарных условиях, хотя в естественных условиях этот процесс намного сложнее. Несмотря на это, всегда приходится начинать с наличия возможностей, которые в основном определяются размером лаборатории, что в целом определяет размер создаваемых в них моделей.

Уместно отметить, что в исследовательской работе лабораторные эксперименты направлены на выявление физической сущности процесса, а не на решение конкретных проблем. Поэтому, когда они проводятся, нет необходимости соблюдать критерии моделирования (сходства).

### 3.2 Экспериментальная установка

Задачей моделирования на этом этапе является определение зависимости инерционных членов уравнения движения от переменного потока воды от определяющих морфометрических характеристик поймы и канала в расчетной секции и гидравлических характеристик потоков в них, В частности, из глубины потока, угла  $\alpha$ , шероховатости поймы и других факторов. Для реализации этой задачи была использована небольшая площадь канала с постоянным наклоном 1 ‰, 11,0 × 2,50 м в водной лаборатории RSHU.

При выборе модели мы исходили из следующих соображений:

- модель должна быть самой простой. Это, прежде всего, модели каналов с односторонней поймой;
- отражают наиболее распространенные комбинации каналов и пойм (сходящиеся, расходящиеся, параллельные или пересекающиеся динамические оси потока в них);
- скорости потока на модели должны превышать критические значения для осадка, использованного в экспериментах;
- можно изменить углы сходимости и расходимости динамических осей потока.

Исходя из этих соображений, на этом участке бетона была установлена прямоугольная канальная модель шириной 0,30 м с шириной поймы до 2,10 м (для обеспечения максимально возможного угла расхождения или сближения динамических осей взаимодействующего канала и Пойменные потоки  $\alpha_{max} = 20^\circ$ ). Глубина канала составляет 0,05 м (до отметки брови). Исследования проводились как с гладкой, так и с грубой, равной 2 см поймой, что связано с возможностями насосных установок лаборатории.

Эта модель послужила основой для последующих экспериментов. Схематическая диаграмма установки для первого типа взаимодействия между канальными и потоковыми потоками показана на рис. 3.1.

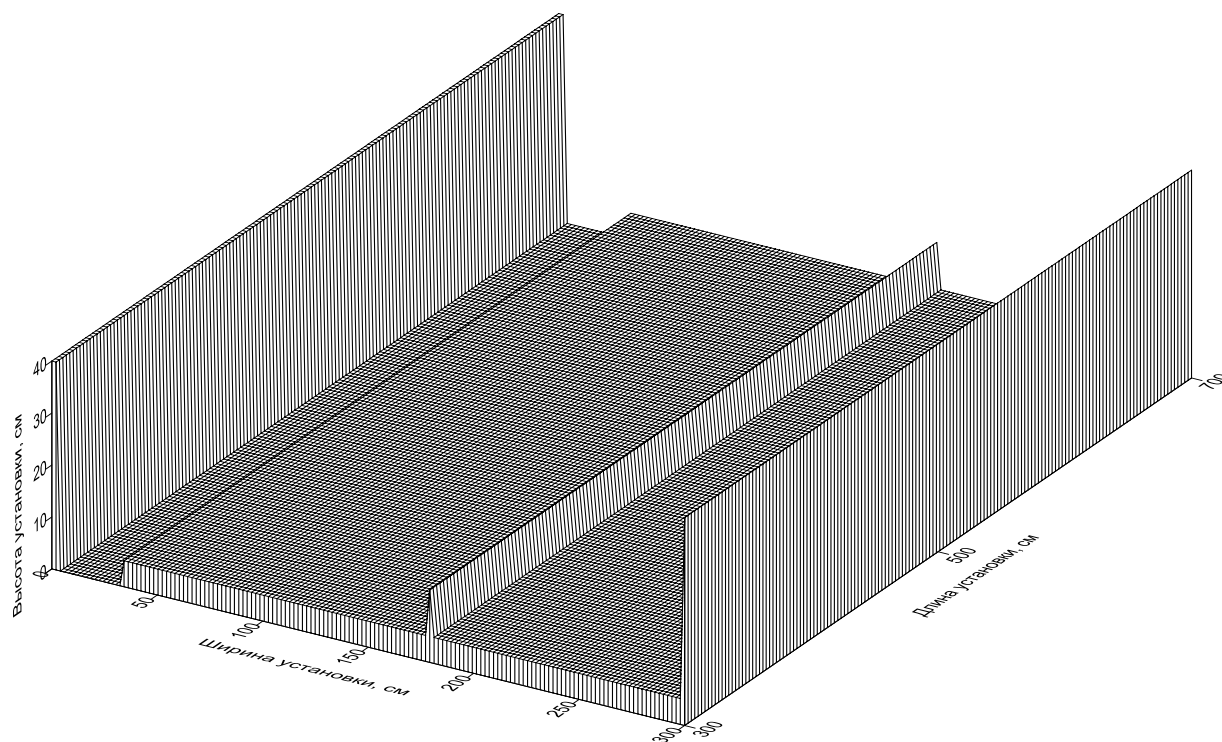


Рис. 3.1 - Принципиальная схема установки (первый тип взаимодействия потоков)

Экспериментальные исследования, проведенные ранее с целью выявления влияния эффекта взаимодействия на гидравлику пооточноподобных потоков, были дополнены исследованиями на 5, 10, 15 и 20 градусов (для второго и третьего типов взаимодействия и гладкой поймы). Таким образом, начальная информация была получена по параметрам основного потока на четырех углах расхожимости и сходимости канальных и пойменных геометрических осей (5, 10, 15 и 20 градусов), включая четыре серии экспериментов (количество экспериментов было выполнено Число углов сходимости) с 6 измерениями гидравлических характеристик потоков в каждой серии.

### 3.3 Методика проведения экспериментов, приборы и оборудование

Цель исследования состояла в том, чтобы выявить закономерности влияния взаимодействия между канальным и пойменным потоками на гидравлику потоков в каналах с поймами и получить информацию для расчета инерционных условий уравнения потока с переменным потоком воды вдоль длина.

Как указывалось, для экспериментов использовался небольшой участок канала длиной 11 м, в котором из бетона была установлена канальная модель шириной 0,3 м и глубиной 0,05 м с шириной поймы до 2,10 м (рис. 4.2). У кровати и поймы был нижний склон 1 0/00. В ходе боковых стенок были выложены стеклянные панели толщиной 4 мм, а днище выполнено из бетона.

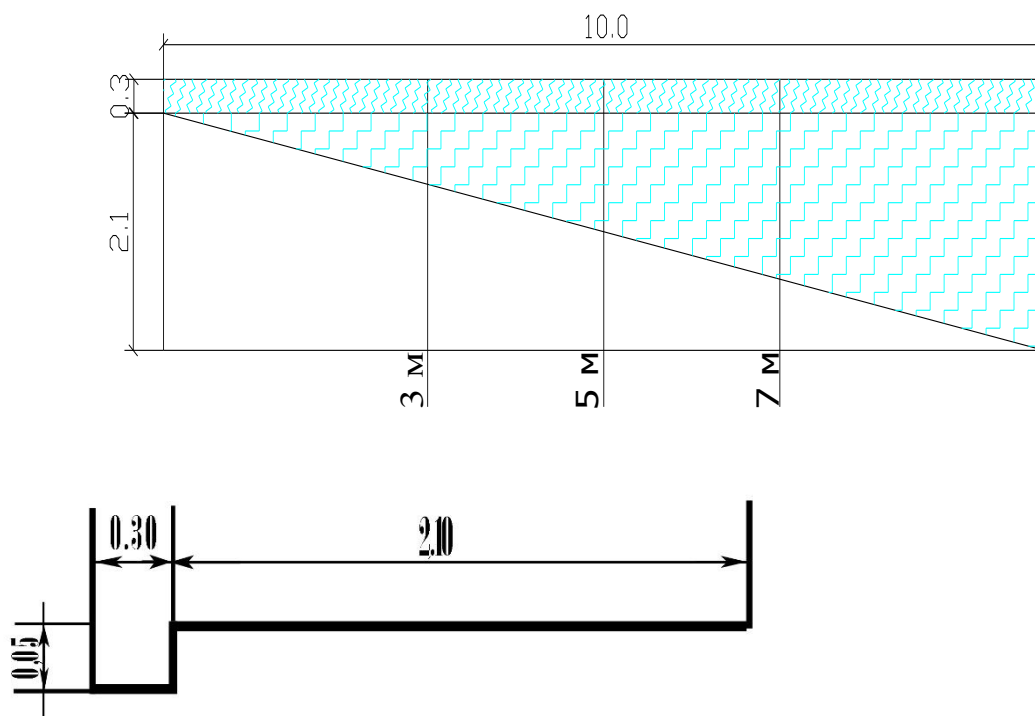


Рис. 3.2 План и поперечное сечение установки.

Входной бак был оснащен успокаивающим устройством в виде щита, который служит для тушения энергии входа. Выходное отверстие лотка было оборудовано жалюзи для регулирования режима гидравлического потока. На тележке, движущейся вдоль подноса, была установлена вторая тележка, перемещающаяся через лоток, с прикрепленным к ней штативом для микрооборота GMCM-1 и иглообразной формы шпиценмасштабом (рис. 4.3)

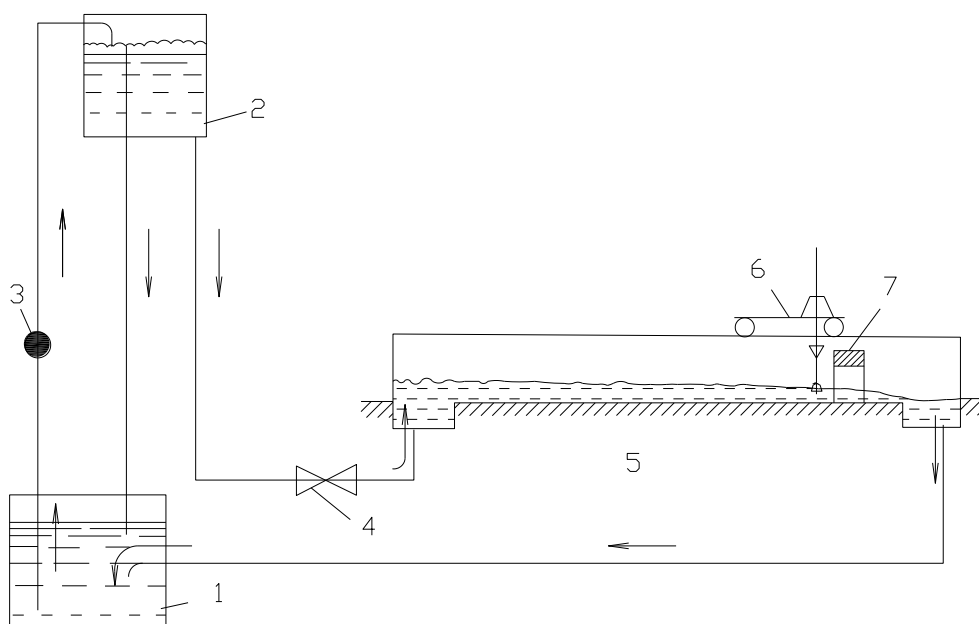


Рис. 3.3 Схема водооборота в лаборатории.

1 – водосборный резервуар; 2 – напорный резервуар; 3 – насос; 4 – задвижка; 5 – русловая площадка; 6 – тележка, перемещающаяся вдоль лотка с совмещенным шпиценмасштабом и установленной микровертушкой; 7 – жалюзи;

Для контроля за измерением потока воды в конце лотка была установлена треугольная плотина.

Как указывалось, в ходе экспериментов применялась методика, разработанная в РГГМУ. Суть методологии заключалась в следующем.

Ввиду того, что модель канала с поймой имела ограниченную длину (11 м), чтобы уменьшить влияние входных и выходных водных условий на установку, использовался так называемый метод сравнения, который состоял из Тот факт, что измерения сначала делались в русле реки, изолированной от поймы, затем разделительная перегородка была удалена и измерения повторялись во взаимодействии потоков каналов и пойм. Всего было проведено четыре серии экспериментов для шести измерений в каждой серии на разных уровнях воды в затопленной пойме. Рассчитанные поперечные сечения в этой статье представляют собой выравнивания, расположенные на расстоянии 3, 5 и 7 метров от входа. Каждому из них были присвоены высокоскоростные вертикали. Все измерения проводились на склонах дна установки при 1 0/00 и включали измерения скорости потока и скорости потока воды как по каналам, так и по пойменным потокам. В ходе экспериментов были проведены измерения уровней и глубин потока с помощью шкалы шпизена, скорости потока - микровертекс, потока воды по методу скоростной области и с использованием тонкостенного треугольного предварительно рифленого водослива С углом 900. Все измерения проводились по всей амплитуде уровней в один сантиметр, три секции. При каждом выравнивании в канальной части потока были назначены 3 вертикали и 3 в пойме, независимо от ширины поймы.

## 4. Типизация процесса взаимодействия руслового и пойменного потоков

### 4.1 Общие положения

Типизация процесса взаимодействия канального и пойменного потоков, как и любая типизация, является попыткой систематизировать сложный и разнообразный процесс, ряд признаков которого недостаточно изучен. В частности, в большинстве исследований изучалось взаимодействие канальных и пойменных потоков на идеализированных моделях русла рек с односторонней поймой, а потоки в каналах с двусторонними, гораздо менее многоподнятыми поймами недостаточно изучены ,

Особенно остро стоит проблема определения параметров, которые достаточно охарактеризуют эти особенности. В начале 70-х годов прошлого века Н.Барышникова [15] в качестве одного из них было предложено рассмотреть угол между динамическими осями канала и потоками пойм. Однако, как известно, определение этого параметра в естественных условиях требует специальных дорогостоящих измерений, не считая точности. Поэтому в будущем было рекомендовано приравнять этот угол к углу между геометрическими осями слоя и поймой.

Фактором, усложняющим процесс разработки типизации эффекта взаимодействия между каналами и потоками поймы, также является недостаточное количество надежной информации о поле и крайние ограничения параметров лабораторных данных.

Н. Б. Барышников [15] разработал типизацию процессов взаимодействия потоков на основе взаимного расположения динамических осей взаимодействующих потоков. В частности, Барышников определил пять типов (рис. 4.1) для сайта, расположенного ниже расчетной линии.

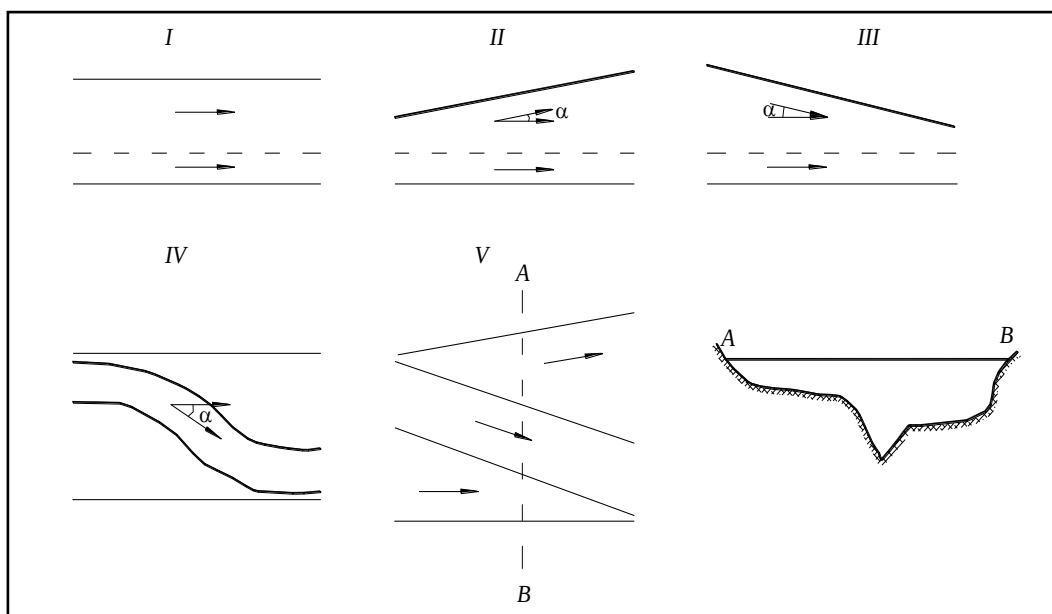


Рисунок 4.1 – Типы взаимодействия руслового и пойменных потоков

#### 4.1.1 Первый тип

Первый тип характеризуется параллельностью динамических осей канальных и пойменных потоков и, следовательно, параллелизма геометрических осей канала и поймы. Дополнительное сопротивление в этом типе взаимодействия потоков создается появлением вихрей с вертикальной осью вращения и их смещением в соответствии с законом Кутта-Жуковского в направлении потока, движущегося с большей скоростью, т. Е. Потока канала , Значительная часть энергии потока расходуется на его торможение и компенсационные токи. Это приводит к снижению пропускной способности канала в пределе, достигающему 15%.

Небольшое увеличение скоростей в приречной части поймы не компенсирует эти затраты энергии. Следовательно, пропускная способность в целом уменьшается на 7-10% по сравнению с аналогичной, которая находится в условиях изоляции потока от тонкостенной продольной перегородки пойменной поймы. Уместно отметить, что в ряде работ появились признаки значительного (20% или более) снижения пропускной способности канального участка потока под влиянием поймы в процессе



параллелизма их динамических осей. Эти данные маловероятны и, по-видимому, получены в моделях, где процесс потока жидкости из поймы в канал не исключается, т. Е. Если оси потоков не параллельны.

Следует отметить, что такой идеализированный тип взаимодействия потоков редко наблюдается в полномасштабных условиях, поскольку он обычно возникает, когда морфометрические характеристики слоя и поймы изменяются как по длине, так и с увеличением уровней. Однако, поскольку большая часть гидроресурсов расположена в относительно простых областях в системе Росгидромета, процессы взаимодействия между канальными и пойменными потоками возможны по своей природе, хотя и редки по схеме, описанной выше.

#### 4.1.2 Второй тип

Второй тип взаимодействия между канальным и пойменным потоками характеризуется расхождением их динамических осей. Это можно наблюдать, когда геометрические оси слоя и поймы не параллельны, а когда они параллельны, когда подача воды в пойму меньше, а в канале больше их пропускной способности.

При таком типе взаимодействия наблюдаются как увеличение, так и незначительное снижение пропускной способности слоя, а также определенное увеличение пропускной способности поймы по сравнению с аналогичными отсеками для потока, изолированными продольной стеклянной тонкостенной перегородкой. Это увеличение пропускной способности, по-видимому, связано с уменьшением затрат энергии на трение для этой перегородки и небольшим увеличением площади поперечного сечения потока в целом из-за удаления этой перегородки, а также резкого Увеличение наклонов поверхности воды, особенно потоков в канале.

Такой тип взаимодействия потоков часто встречается в полномасштабных условиях. Однако основной причиной потока массового потока в пойму является расширение долины вниз по течению.

#### 4.1.3 Третий тип

Третий тип взаимодействия характеризуется сходимостью динамических осей канала и потоков поймы. Подобно второму типу, геометрическая ось канала и пойма может быть параллельной или непараллельной. В третьем типе взаимодействия массы пойменного потока поступают в слой канала под разными углами, заставляя последний замедляться и тем самым уменьшать его пропускную способность. Это уменьшение напрямую связано с разностью скоростей и угла сходимости динамических осей взаимодействующих потоков. Расход энергии потока канала на процесс массообмена, смешение его масс с входящими массами пойменной массы и увеличение их скоростей очень значителен и может (согласно экспериментам) привести к уменьшению пропускной способности потока потока по 50% и более. В то же время скорости потока поймы незначительно возрастают, что приводит к значительному снижению пропускной способности в целом.

Анализ обширных природных материалов, выполненный Барышниковым [15], подтвердил выводы, сделанные выше, и показал, что основной причиной такого типа взаимодействия потоков является сужение долины и, следовательно, поймы вниз по течению. Такой тип взаимодействия потоков также широко распространен в полевых условиях.

#### 4.1.4 Четвертый тип

Взаимодействие, характеризующееся пересечением динамических осей канала и потоков пойм, является одним из наиболее распространенных. В

полномасштабных условиях он наблюдается в извилистых типах канального процесса, доля которого, согласно

И. В. Попов [19], преобладающее количество участков, обследованных им плоскими реками.

Такой тип взаимодействия потоков как бы обобщает три предыдущих. Действительно, для углов пересечения мы переходим к первому типу. При углах ( $0^\circ < \alpha < 50^\circ$ ), в зависимости от характера изменения ширины долины и поймы, указывается тип взаимодействия между каналом и потоком, аналогичный второму типу или третьему типу (сужение поймы).

В то же время при больших углах пересечения динамических осей потоков ( $> 90^\circ$ ) и в естественных условиях даже при углах менее  $90^\circ$  и принципиально новом характере взаимодействия канала и потока отмечено, когда поток энергии канала настолько велик. При углах  $90^\circ$  верх (по отношению к пойме) слоя корневого канала. Отношение скоростей и глубин номинального и канального течений.

#### 4.1.5 Пятый тип

Таким образом, четыре типа взаимодействий между каналами и потоками поймы, определенные из экспериментальных данных о схематизированных моделях, в основном подтверждены полномасштабными данными. В этом случае первые три типа, как правило, соответствуют потокам в каналах с односторонними поймами, а четвертый - в каналах с двухсторонними поймами.

Вышеприведенная типизация недооценивает изменения ширины слоя и поймы по длине реки и на разных уровнях воды, которые определяют гидравлику потоков в слое и пойме и тип их взаимодействия.

Следовательно, типизация не охватывает все разнообразие природных условий и требует соответствующего уточнения. Поэтому целесообразно дополнить его пятым типом, ссылаясь на него на самые сложные случаи

взаимодействия течений в каналах с двусторонними поймами и поймами, характер изменения ширины вдоль длины реки различен при Разные уровни воды.

Главной особенностью такого типа взаимодействия является изменение направления динамической оси пойменной поля относительно оси канала при изменении уровня воды.

Таким образом, вы можете произвольно описать типы взаимодействия между потоками, но в свою очередь эти, описанные выше типы, являются наиболее распространенными и берутся за основу.

#### 4.2. Лабораторные исследования влияния пойменного потока на расходы воды и средние скорости руслового потока

Многочисленные лабораторные исследования по этой проблеме [9,4] позволили выявить достаточно явное влияние потока поймы на поток воды и среднюю скорость русла реки в зависимости от типа их взаимодействия. Как указывалось ранее, наиболее подробные эксперименты были проведены для изучения взаимодействия потоков с параллелизмом их осей. Они установили снижение затрат и средних скоростей в секции канала потока. Величина этого уменьшения пропорциональна разности глубин и неровностей, а следовательно, скорости течения в слое и на пойме и в пределе не превышает 10% по сравнению с аналогичным течением, но изолированы от поймы.

На пойме наблюдается противоположное явление, то есть очень небольшое увеличение скоростей и потоков воды, главным образом из-за прируслового отсека поймы, что не компенсирует снижение скорости потока канала.

Таким образом, общий поток воды во взаимодействующих каналах и потоках поймы будет несколько меньше, чем общий поток воды в потоках, изолированных вертикальной разделительной стеклянной стенкой. Это

снижение темпов и издержек объясняется расходом энергии на формирование и движение вихрей с вертикальной осью вращения, сформированной на границе взаимодействующих потоков.

Следует отметить, что в лабораторных исследованиях предлагается несколько схем деления потока на канал и компоненты поймы. Простейшим из них является разделение сечения на вертикальную плоскость, проходящую по краю русла реки. Процесс взаимодействия при сходимости и расходимости динамических осей взаимодействующих потоков (типы II и III) гораздо менее изучен. Фактически, только NB изучил их. Барышников [9,6].

В результате анализа экспериментальных данных было установлено, что, когда динамические оси взаимодействующих потоков различаются, скорости и затраты близки по каналу и даже немного выше в пойме, чем в условиях их изоляции. Общее небольшое увеличение скоростей и скорости потока таких потоков объясняется как увеличением наклонов поверхности воды, так и уменьшением сопротивлений за счет удаления продольной, замедляющей разделительной стенки из стекла.

С III типом взаимодействия, когда сходятся динамические оси канала и поймы, происходит значительное снижение скоростей и скоростей потока воды в канале потоков каналов и небольшое увеличение, главным образом за счет части русла реки, в пойме. Общий поток воды в таком потоке уменьшается непосредственно пропорционально углу сходимости динамических осей потоков.

Несколько хуже, чем типы 2 и 3, изучался тип взаимодействия потоков, характеризующийся пересечением их динамических осей [2,14], он установил прямую зависимость между уменьшением скоростей и пропускной способностью канала и углом пересечения динамических осей канала и пения менного потока. Метод определения этого угла был разработан Г. В. Железняковым [18]. Однако это несовершенно.

Самый надежный угол определяется из измерений вектора скоростей и потока воды. Однако при нормальных условиях направление скорости не измеряется, и сами измерения на самых высоких уровнях, как правило, не производятся. Исходя из этого, был предложен метод определения угла, основанный на предположении равенства углов между динамическими осями канала и потоками поймы на углы между геометрическими осями канала и поймой.

Все эксперименты, за исключением работы Н. С. Знаменской [20], были выполнены на идеализированных моделях, где их структура резко отличалась в направлении упрощения от реальных пойм. В то же время наиболее полная информация может быть получена только из полевых данных. Как уже указывалось, специальные исследования природных объектов очень малы [5] из-за их высокой стоимости. Анализ материалов сетевых наблюдений Росгидромета был практически осуществлен только Барышниковым [7,9].

#### 4.3 Анализ влияния пойменного потока на характер изменения средних скоростей на вертикалях руслового потока при изменении уровней воды

В качестве исходной информации использовалась информация об измеренном сбросе воды в гидростворах поймы сети Росгидромета как на низком уровне, так и на уровне затопления в пойме.

Как отмечалось выше, при измерении расхода воды количество высокоскоростных вертикалей обычно уменьшается, и многие из них меняют свое местоположение. Поэтому недостающие скорости на вычисленных вертикалях должны определяться по диаграммам их распределения по ширине потока.

Для 2-5 типов взаимодействия между каналами и потоками поймы были построены кривые зависимости  $V_B = f(H)$  для характерных и наиболее полно освещенных высокоскоростных вертикалей в канальной части потока.

При двух типах взаимодействия канальных и пойменных потоков при малых значениях углов  $\alpha$  ( $\alpha \leq 25^\circ$ ) плавно, более или менее равномерное увеличение скоростей с увеличением уровня воды наблюдается практически на всех быстрораствующих вертикалях исследуемых рек,

Значительно различная картина изменения скоростей на вершинах наблюдается под большими углами. Итак, на реке. Пьяне около деревни Камкино (рис. 4.2а), хотя и связана с 4-мя видами взаимодействия потоков, из-за значительного расширения долины ниже диапазона измерения масса потока протекает по пойме под углом  $45^\circ$ , т. е. процесс взаимодействия. потоков происходят по 2 типу.

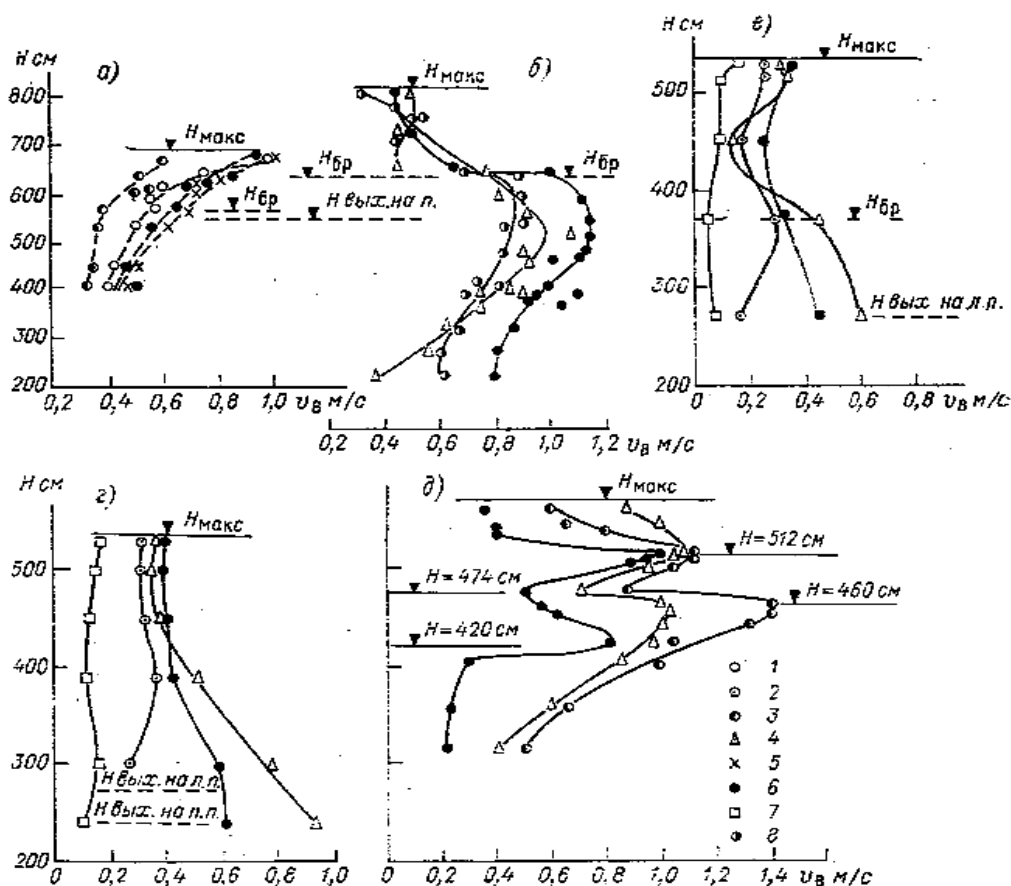


Рисунок 4.2 – Кривые  $V_B=f(H)$

а) р. Пьяна - д. Камкино, б) р. Ветлуга - д. Быстри, в), г) р. Луга — пос. Толмачева (в - подъем, г — спад уровней), д) р. Нестеровка — рзд. Таловый; 1—8 - номера скоростных вертикалей; л. п.—левая пойма, п. п.—правая.

Как можно видеть на рис. 4.2а, на уровнях, превышающих отметку уровня вала цистерны, наблюдается резкое увеличение скорости, т. Е. Увеличение их градиентов ( $dV_B / dH$ ). По-видимому, это можно объяснить двумя причинами: 1) на реке. Угол расходимости осей потоков ( $= 45^\circ$ ) резко превосходит аналогичные на других реках; 2) некоторая разница в характере взаимодействия потоков в типах 2 и 4, даже если она происходит по схеме типа 2.

Таким образом, с типом взаимодействия и малыми углами расходимости динамических осей потоков нет существенной разницы в характере изменения средних скоростей по вертикали в канале с



увеличением уровня воды и его Поймы по сравнению с прерванным периодом. При больших углах градиенты скорости резко возрастают при возвышениях над отметкой заклепок речных долин. Увеличение градиента скорости ( $dVB / dH$ ) пропорционально углу.

В третьем типе взаимодействия, как пример влияния потока поймы на средние скорости на вертикали потока канала, рассмотрим данные на стр. Амур недалеко от деревни. Кумара (рис. 4.3), где  $\alpha = 4^\circ$ , а для р. Ветлуги около деревни Быстри (рис. 4.2б), где  $\alpha = 50^\circ$ .

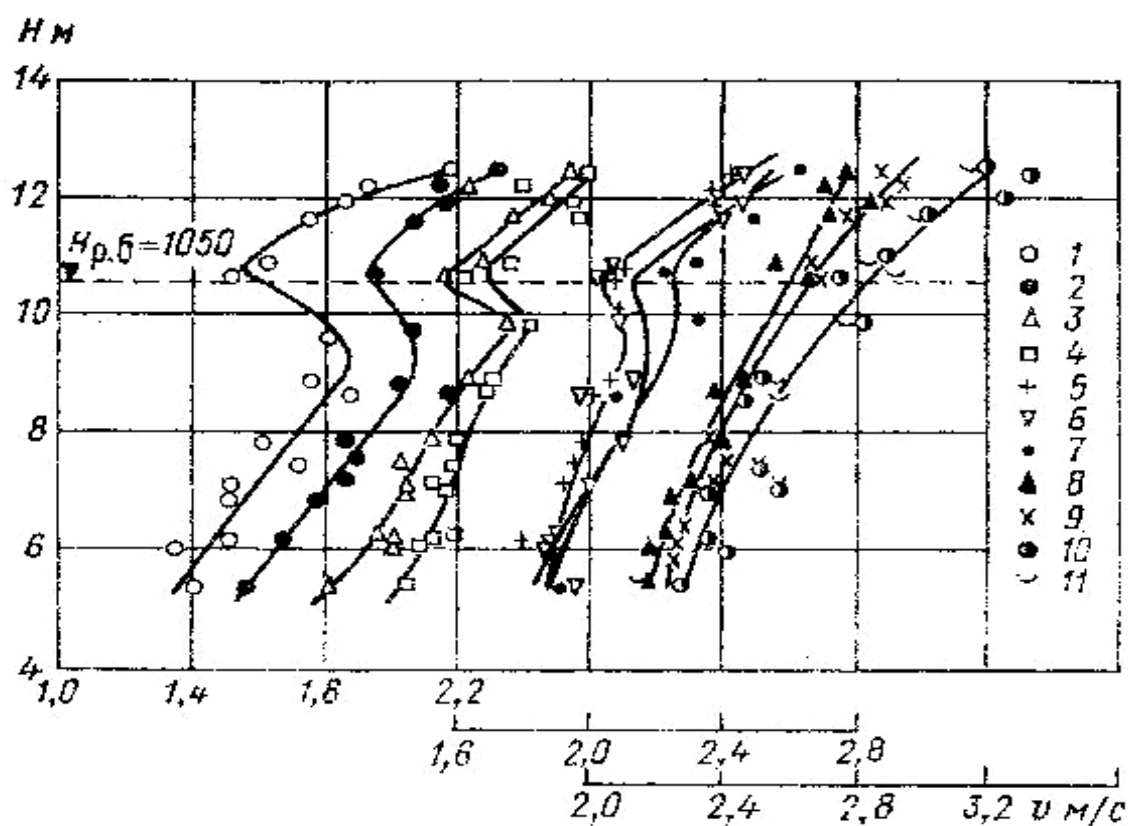


Рисунок 4.3 – Зависимости средних на вертикалях скоростей от уровня воды на р. Амур – пос. Кумара за 1958 г.

На реке. Ветлуга на уровнях, превышающих уровни выхода воды в пойму, наблюдается значительное замедление роста скоростей и даже их стабилизация, а когда уровень русла реки снижается, скорости резко снижаются (примерно в 2 раза). Такой характер изменения скоростей

отмечается на всех высокоскоростных вершинах, расположенных в канальной части потока.

Изменение скоростей на р существенно отличается. Амуре недалеко от деревни. Кумар. Скорости для вертикальных от 1 до 4, расположенные в непосредственной близости от поймы, имеют четко выраженное S-образное изменение скорости, но хотя уменьшение скоростей значительно меньше, чем на р. Ветлуга, и в пределе достигает всего 15%. Как расстояние от поймы, скорости меняют свою форму, они, кажется, выпрямляются.

Подавляющее влияние потока поймы на поток канала, похоже, уходит от поймы, что, в частности, можно проследить при анализе распределения пружин по вертикали 8 и 9. Таким образом, зона влияния Пойменный поток на канале будет составлять 60% от ширины последнего  $B_p = 675$  м).

Это потому, что р. Амур - большая река с относительно узкой поймой; 98,6% от максимального потока воды, которая достигает поселка. Кумара  $22\ 300\ \text{м}^3 / \text{с}$ , проходит в русле реки и только 1,4% - вдоль узкой поймы ( $B_p / B_r = 0,2$ ). Остальные реки этой группы небольшие и средние, а доля их поймы намного больше и равна 30-40%.

Таким образом, во всех реках этой группы наблюдается резкое снижение темпов на уровнях затопления ручьев вдоль речных долин. Это уменьшение пропорционально углу сходимости или пересечению динамических осей канала и потоков поймы.

На рис. 4.2с и d показаны кривые  $VB = f(H)$  для подъема и падения уровней во время прохождения потока на р. Луга в деревне. Толмачево.

Характер изменения скоростей на вертикалях 1-6 относительно спада и подъема близок к тому, что рассматривается при взаимодействии потоков типа 3, хотя и менее четко выражено. Это связано, прежде всего, с сложностью профиля поперечного сечения относительно гидравлического решения и недостаточным количеством исходной информации.

Некоторое отклонение от общей картины - характер распределения скоростей по вертикали 7, расположенный на расстоянии 6 м от края прибрежного вала, при котором скорости изменения скорости практически не меняются при изменении уровня воды.

## 5. Учет влияния морфологии пойм и русел на средние скорости и сопротивления в русловой части потока

Большинство исследователей по морфологии пойм ограничиваются их описаниями без каких-либо количественных характеристик. В то же время для гидротехнического и водохозяйственного строительства необходимо иметь количественные показатели и расчетные зависимости, которые позволят им получить. Более того, последние исследования определили определяющее влияние морфологических особенностей пойменной структуры на гидравлику потоков в пойменных пластах и канальных процессах. Анализ системы уравнений гидромеханики, описывающей движение потока, установил, что практически в каждом члене этих уравнений неявно отражены особенности морфологии не только вычисленной линии, но и места в целом.

Эта проблема чрезвычайно сложна и недостаточно развита. Действительно, морфометрические характеристики каналов были определены давно и общепризнаны. Это в первую очередь, средние глубины и ширины каналов, их площади поперечного сечения и другие, которые вместе с гидравлическими характеристиками (средняя скорость, расход воды, наклон поверхности воды, коэффициент шероховатости и т. Д.) Позволили нескольким авторам Устанавливать надежные зависимости между ними и рекомендовать их для инженерных расчетов. Детальный анализ гидроморфометрических зависимостей был проведен в работах В.И. Антроповский [5], который установил, что значения «констант» в них изменяются для разных типов канального процесса.

Для поймы ситуация намного хуже. Это связано не только с существенной разницей в размерах пойменных полей от каналов, но в большей степени тем, что все их характеристики резко изменяются как по ширине, так и по длине и с увеличением уровня воды, то есть по высоте. Действительно, поймы, как правило, состоят из отдельных, часто по-разному поднятых пойменных массивов, ширина которых колеблется от нуля до нескольких десятков километров. Кроме того, большинство пойм представляет собой сложную, часто ступенчатую структуру. Поэтому, когда уровни, вызывающие наводнение следующего «шага» поймы, увеличиваются, ее морфометрические характеристики резко меняются.

Все это, а также низкая точность исходной информации, обычно из-за сложности полевых исследований в полномасштабных условиях, являются основными причинами недостаточного развития морфометрических характеристик пойм. Особенно остро вопрос о морфометрических характеристиках, отражающих особенности пойменной структуры не только в области расчета, либо в небольшой области, но и в разрезах в значительной степени, остается нерешенным. Именно эти характеристики определяют гидравлику пойменных и частично канализационных потоков в период прохождения наводнений через затопленные поймы.

Все исследованные характеристики пойм не полностью удовлетворяют требованиям гидравлических расчетов, поскольку они отражают морфологию пластов и пойм на участках ограниченной длины. В то же время, как показало исследование Российского государственного гидрометеорологического университета, гидравлика потоков в каналах с поймами на разных глубинах затопления последних определяется особенностями морфологии в районах большой протяженности. Например, в области между двумя резкими сужениями поймы. Длина таких участков, в зависимости от размера реки, по нашим данным, колеблется от нескольких километров до нескольких десятков километров.

В качестве одной из этих характеристик был предложен угол между геометрическими осями слоя и поймой () в разрезе, расположенном ниже расчетной линии.

Характер изменения этих углов вдоль длины реки в реальных условиях несколько отличается от характера, полученного на картах из-за некоторого сглаживающего эффекта. Особенно наглядно иллюстрируют картину изменений углов вдоль длины рек аэрофотоснимков.

Конечно, угол все еще не полностью отражает влияние морфологических особенностей структуры каналов и пойм на гидравлику потоков в них, особенно на ранних стадиях затопления. Более того, этот процесс очень сложный и зависит от типа поймы. В частности, на реках свободного и незавершенного извилистости при затоплении пойм большую роль играет низкая и высокая эрозия, которая недооценивается значением угла. Несмотря на эти недостатки, введение этой количественной характеристики в расчеты позволило в первом приближении решить ряд сложных проблем речной гидравлики.

## 6. Результаты оценки методики расчётов, основанной на концепции равномерного движения

Методики расчётов средних на вертикалях скоростей для русел с простыми формами сечения основаны на концепции равномерного движения, т.е. на формулах Шези-Маннинга или аналогичных им (Шези-Павловского и др.). Значительно сложнее расчёты средних скоростей на вертикалях в русловых потоках, находящихся под воздействием пойменных потоков. Сведения о них востребованы при проектировании и строительстве различных гидротехнических сооружений, в частности мостовых переходов, водозаборов и водовыпусков. Применяемая же методика, основанная на формуле Шези -Маннинга или других аналогичных формулах не учитывает

эффекта взаимодействия русловых и пойменных потоков, что может приводить к большим погрешностям расчётов.

Для оценки точности и надёжности применения этой методики к расчётам гидравлики русловых и пойменных потоков на кафедре гидрометрии были выполнены контрольные расчёты на основе данных измерений максимальных расходов воды на 7 реках, а именно: Пьяне –д. Камкино (II тип взаимодействия потоков), Ветлуги – д. Быстри и д. Дубники, р. Амур –пос. Кумара, а также р. Конде -д. Чантырья(III тип), р. Крыловки –д. Крыловка и р. Нестеровки – рзд. Таловый (V тип).

В качестве исходной была использована информация об измеренных максимальных расходах воды, площадях поперечного сечения и глубинах на скоростных вертикалях в русловой части потока. Средняя скорость потока была определена делением расхода воды на площадь поперечного сечения ( $F$ ), т.е.  $V=Q/F$ .

Затем выразим эту скорость по формуле Шези-Маннинга через среднюю глубину руслового потока, т.е.  $\bar{V} = C\sqrt{\bar{h}I} = \frac{\bar{h}^{2/3}I^{1/2}}{n}$ , где  $C$  и  $n$  – коэффициенты Шези и шероховатости.

Так как значения уклонов водной поверхности и коэффициенты шероховатости неизвестны, то обозначим величину  $I^{1/2}/n = \beta$ , тогда получим  $\bar{V} = \beta \bar{h}^{2/3}$ . Отсюда значения  $\beta = \frac{\bar{V}}{\bar{h}^{2/3}}$ . Допуская правомерность применения параметра  $\beta$  не только к расчёту средних скоростей русловых потоков, но и к расчётам средних на вертикалях скоростей, рассчитаем их значения по выражению  $v_i = \beta h_i^{2/3}$ .

Определённые таким образом значения  $v_i$  нуждаются в проверке, так как при их расчёте сделано несколько допущений. Поэтому выполним расчёт расхода воды  $Q_p$  на основе полученных расчётных значений средних на

вертикалях скоростей. С этой целью домножим их значения на глубины на этих же вертикалях и получим  $q_i = h_i v_i$  - значения удельных расходов воды.

Дальнейший расчёт можно выполнить либо графическим способом, либо аналитическим.

Графический способ основан на построении кривой распределения  $q_i$  по ширине руслового потока. Расчётное значение расхода воды  $Q_p$  может быть получено графическим способом на основе определения площади фигуры, заключённой между линией уровня воды и кривой  $q_i = f(b)$ , т.е. по формуле  $Q_p = \int_0^B q_i db$ .

Полученное значение расхода  $Q_p$  может существенно отличаться от заданного, т.е.  $Q_p = \alpha' Q$ , где  $\alpha' = \frac{Q_p}{Q}$ . Домножив, расчётные значения средних на вертикалях скоростей на этот коэффициент  $\alpha'$ , получим уточненные значения этих скоростей  $v_{pi}$ . Сравнивая их с соответствующими значениями скоростей на вертикалях, но полученных в результате измерений  $v_{изм.}$ , определяем погрешности их расчётов по выражению  $\Delta v / v_{изм} = \frac{v_p - v_{изм}}{v_{изм}} 100\%$ .

Учитывая, что на большинстве рек скоростные вертикали расположены по ширине потока, как правило, равномерно, через одинаковые расстояния, среднюю погрешность расчётов для каждой реки определяем простым суммированием т.е.  $\Delta V / V_{изм} = \frac{\sum (V_{изм} - V_p)}{m V_{изм}}$  где  $m$  – число скоростных вертикалей.

Для русел сложной формы сечения, в частности русел с поймами, в которых движение русловых потоков неравномерное и, более того, с переменным расходом воды, необходимо совершенствование расчётной методики. Поэтому представляется целесообразной не только оценка погрешностей таких расчётов по методике, основанной на концепции равномерного движения, т. е. на основе формулы Шези - Маннинга или

любой другой аналогичной ей формулы, но и совершенствование самой методики расчётов.

Таблица 6.1 - Сведения о расчётных значениях средних на вертикалях скоростей и погрешностях расчётов по методике, основанной на формулах Шези – Маннинга

| Река – пост                                                 | Данные измерений при уровнях, см |         |           |         | Расчетные          | Погрешности расчетов |      |
|-------------------------------------------------------------|----------------------------------|---------|-----------|---------|--------------------|----------------------|------|
|                                                             | глубин                           |         | скоростей |         |                    | скоростей            |      |
|                                                             | Н =529                           | Н = 666 | Н = 529   | Н = 666 | при уровне 666 см. | м/с                  | %    |
| Р.Пьяна- д.Камкино,<br>IV тип (по II-му)<br>$\alpha = 45^0$ | 2,73                             | 4       | 0,36      | 0,63    | 0,47               | 0,16                 | 25,4 |
|                                                             | 3,52                             | 4,8     | 0,52      | 0,99    | 0,64               | 0,35                 | 35,3 |
|                                                             | 3,7                              | 5,1     | 0,54      | 0,97    | 0,67               | 0,3                  | 30,9 |
|                                                             | 4,3                              | 5,6     | 0,61      | 1       | 0,73               | 0,28                 | 27,7 |
|                                                             | 5                                | 6,3     | 0,56      | 0,95    | 0,65               | 0,3                  | 31,6 |
| Р. Ветлуга- д. Быстри,<br>III тип<br>$\alpha = 50^0$        | Н =527                           | Н = 805 | Н = 527   | Н = 805 | при уровне 805 см. | м/с                  | %    |
|                                                             | 1,37                             | 4,2     | 0,54      | 0,46    | 0,66               | 0,2                  | 44   |
|                                                             | 2,57                             | 5,4     | 0,8       | 0,45    | 1,31               | 0,86                 | 191  |
|                                                             | 4,27                             | 7,1     | 1,06      | 0,45    | 1,47               | 1,02                 | 227  |
|                                                             | 6,17                             | 9       | 1,12      | 0,3     | 1,42               | 1,12                 | 373  |
|                                                             | 5,97                             | 8,8     | 1,15      | 0,44    | 1,46               | 1,02                 | 232  |
|                                                             | 6,17                             | 9       | 1,14      | 0,38    | 1,45               | 1,07                 | 282  |
|                                                             | 6,22                             | 9,05    | 0,84      | 0,32    | 1,08               | 0,76                 | 238  |
|                                                             | 5,07                             | 7,9     | 0,32      | 0,14    | 0,42               | 0,18                 | 128  |
| Р. Конда-д. Чантырья,<br>III тип<br>$\alpha \approx 30^0$   | Н =487                           | Н = 719 | Н = 487   | Н = 719 | при уровне 719 см. | м/с                  | %    |
|                                                             | 0,58                             | 2,9     | 0,26      | 0,5     | 0,75               | 0,25                 | 50   |
|                                                             | 1,13                             | 3,45    | 0,58      | 0,5     | 1,22               | 0,72                 | 144  |
|                                                             | 1,69                             | 4,01    | 0,62      | 0,47    | 1,1                | 0,63                 | 134  |
|                                                             | 2,78                             | 5,1     | 0,66      | 0,44    | 0,99               | 0,55                 | 125  |
|                                                             | 3,03                             | 5,35    | 0,66      | 0,44    | 0,96               | 0,52                 | 118  |
|                                                             | 2,68                             | 5       | 0,61      | 0,38    | 0,92               | 0,54                 | 142  |
|                                                             | 2,08                             | 4,4     | 0,54      | 0,31    | 0,88               | 0,57                 | 183  |
|                                                             | 1,33                             | 3,65    | 0,39      | 0,22    | 0,47               | 0,25                 | 114  |
| 0,75                                                        | 3,07                             | 0,27    | 0,18      | 0,39    | 0,21               | 117                  |      |
| Р. Крыловка-<br>–д. Крыловка<br>V тип<br>$\alpha = 9^0$     | Н=266                            | Н = 505 | Н = 266   | Н = 505 | при уровне 505 см. | м/с                  | %    |
|                                                             | 2,8                              | 5,19    | 0,9       | 0,97    | 1,78               | 0,81                 | 84   |
|                                                             | 3,02                             | 5,41    | 1,16      | 1       | 1,71               | 0,71                 | 71   |
|                                                             | 3,04                             | 5,43    | 1,18      | 1,02    | 1,74               | 0,72                 | 71   |
|                                                             | 2,95                             | 5,34    | 0,96      | 0,68    | 1,42               | 0,74                 | 109  |
|                                                             | 2,21                             | 4,6     | 0,32      | 0,28    | 0,52               | 0,24                 | 86   |
|                                                             | Н=738                            |         |           |         | при уровне 738     | м/с                  | %    |
| Р. Ветлуга –<br>д.Дубники<br>III тип                        | 6,23                             |         | 0,65      |         | 1,18               | 0,53                 | 81,5 |
|                                                             | 7,38                             |         | 1,12      |         | 1,32               | 0,2                  | 17,9 |
|                                                             | 7,31                             |         | 1         |         | 1,31               | 0,21                 | 19,1 |



|                |      |  |      |  |      |      |      |
|----------------|------|--|------|--|------|------|------|
| $\alpha = 3^0$ | 7,2  |  | 1,1  |  | 1,3  | 0,2  | 18,2 |
|                | 6,95 |  | 1,12 |  | 1,26 | 0,14 | 12,5 |
|                | 7,23 |  | 1,14 |  | 1,3  | 0,16 | 16,1 |
|                | 6,2  |  | 1,13 |  | 1,18 | 0,05 | 4,4  |
|                | 6,13 |  | 1,03 |  | 1,17 | 0,14 | 13,6 |
|                | 5,74 |  | 0,98 |  | 1,11 | 0,13 | 13,3 |
|                | 5,42 |  | 0,92 |  | 1,07 | 0,15 | 16,3 |
|                | 5,42 |  | 0,7  |  | 1,07 | 0,37 | 52,9 |
|                | 5,47 |  | 0,98 |  | 1,09 | 0,11 | 12,2 |

Таблица 6.2 - Значения измеренных и расчетных средних на вертикалях скоростей по р. Нестеровке – рзд. Таловый (по ширине руслового потока)

| Расстояние от п.н., м.      |            | 30  | 40  | 50  | 60  | 70  | 80  | 90  | 100 | 110 | 120 | 130 | 140 |
|-----------------------------|------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| Глубина, м                  |            | 0,8 | 1,7 | 2,9 | 3,5 | 4,0 | 5,1 | 5,4 | 5,0 | 4,4 | 3,7 | 3,1 | 1,9 |
| Скорости на вертикалях, м/с | Измеренные | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,4 | 0,4 | 0,4 | 0,3 | 0,2 | 0,2 | 0,1 |
|                             | Расчетные  | 0,3 | 0,5 | 0,7 | 0,8 | 0,9 | 1,0 | 1,1 | 1,0 | 0,9 | 0,8 | 0,7 | 0,5 |
| $\Delta v = v_p - v_{изм}$  |            | -   | 0,2 | 0,2 | 0,3 | 0,4 | 0,6 | 0,7 | 0,6 | 0,6 | 0,6 | 0,6 | 0,4 |
| $\Delta v/v_{изм} \%$       |            | -33 | 2   | 42  | 60  | 87  | 136 | 161 | 168 | 203 | 273 | 311 | 279 |

На основе данных Н.Б. Барышникова приведенных на рисунке 6.7 в 2015 году мною были рассчитаны средние и максимальные погрешности расчётов для р. Луга – пос. Толмачево. Учитывая, что скоростные вертикали на всех реках располагались равномерно на одинаковых расстояниях, средняя величина погрешности, как указывалось выше, определялась посредством деления суммы погрешностей скоростей на отдельных вертикалях на их количество. Эти сведения приведены в таблицах 6.3 и 6.4.

Таблица 6.3 - Сведения о расчётных значениях средних на вертикалях скоростей и погрешностях расчётов по методике, основанной на формулах Шези – Маннинга р. Луга - пос. Толмачево.

| Река – пост    | Данные измерений при уровнях, см |                | Расчетные значения скоростей | Погрешности расчетов |      |
|----------------|----------------------------------|----------------|------------------------------|----------------------|------|
|                | глубин, м                        | скоростей, м/с |                              | м/с                  | %    |
| р. Луги - пос. | 1,42                             | 0,11           | 0,07                         | 0,04                 | 35,0 |
|                | 1,92                             | 0,15           | 0,09                         | 0,06                 | 41,7 |

|                                |      |      |      |      |      |
|--------------------------------|------|------|------|------|------|
| Толмачево<br>$\alpha=20^\circ$ | 3,32 | 0,25 | 0,13 | 0,12 | 49,7 |
|                                | 4,32 | 0,29 | 0,15 | 0,14 | 48,3 |
|                                | 6,82 | 0,31 | 0,20 | 0,11 | 34,4 |
|                                |      |      |      | ср   | 41,8 |

Таблица 6.4 - Сведения о расчётных значениях максимальных на вертикалях скоростей и погрешностях расчётов по методике, основанной на формулах Шези – Маннинга р. Луга - пос. Толмачево.

| Река – пост                                         | Данные измерений<br>при уровнях, см |                   | Расчетные<br>значения<br>скоростей | Погрешности<br>расчетов |      |
|-----------------------------------------------------|-------------------------------------|-------------------|------------------------------------|-------------------------|------|
|                                                     | глубин,<br>м                        | скоростей,<br>м/с |                                    | м/с                     | %    |
| р. Луги -<br>пос.<br>Толмачево<br>$\alpha=20^\circ$ | 1,42                                | 0,14              | 0,12                               | 0,02                    | 11,9 |
|                                                     | 1,92                                | 0,22              | 0,15                               | 0,07                    | 31,4 |
|                                                     | 3,32                                | 0,32              | 0,22                               | 0,10                    | 32,1 |
|                                                     | 4,32                                | 0,40              | 0,26                               | 0,14                    | 35,3 |
|                                                     | 6,82                                | 0,44              | 0,35                               | 0,09                    | 20,3 |
|                                                     |                                     |                   |                                    | ср                      | 26,2 |

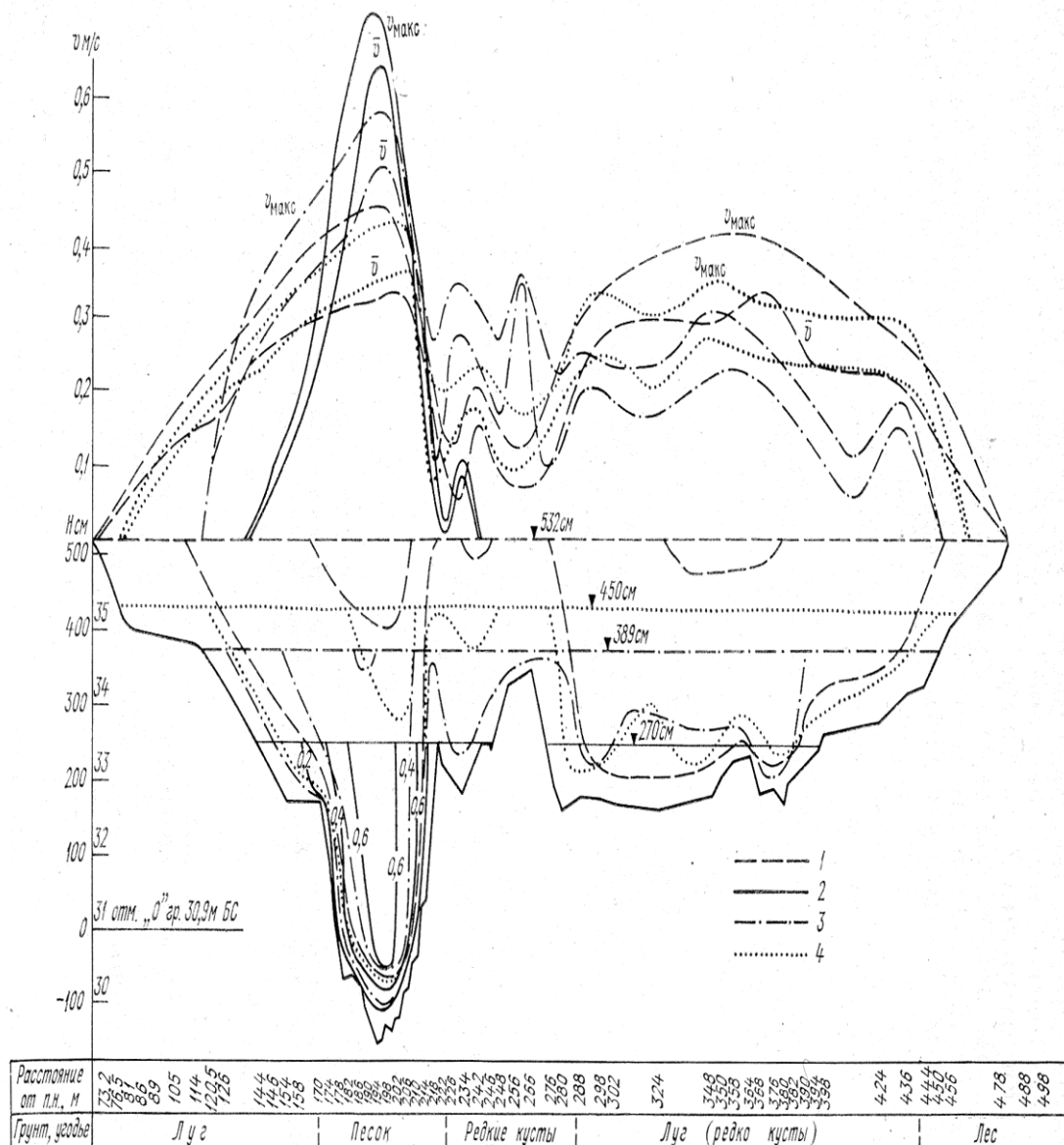


Рис. 6.7. Профиль поперечного сечения с изотохами и кривыми распределения средних на вертикалях скоростей по ширине гидроствора р. Луги - пос. Толмачево. Данные измерений 1977 г. при уровнях: 1 - 532 см, 2 - 450 см, 3 - 389 см, 4 — 270 см.

Учитывая все сведения о расчётных значениях максимальных и средних на вертикалях скоростей и погрешностях расчётов в таблицах 6.1 – 6.4, а также дополнительные данные добытые уже после выпускной работы бакалавра, были рассчитаны средние погрешности расчётов для каждой из исследуемых рек. Итоговые сведения приведены в таблице 6.5.

Таблица 6.5 - Сведения о величинах средних и максимальных погрешностей расчётов средних на вертикалях скоростей русловых потоков при их взаимодействии с потоками поймы при третьем и пятом типах на основе методики Шези – Маннинга

| №  | Река, пост                  | Тип взаимодействия | Угол $\alpha$ | $\Delta(V/V_{изм})_{ср}$ | $\Delta(V/V_{изм})_{макс}$ |
|----|-----------------------------|--------------------|---------------|--------------------------|----------------------------|
| 1  | Р. Ветлуга- д. Быстри       | III                | 50            | 215                      | 373                        |
| 2  | Р.Ветлуга –Дубники          | III                | 3             | 23                       | 82                         |
| 3  | Р.Конда-д. Чантырья         | III                | 30            | 130                      | 183                        |
| 4  | Р.Амур –д. Кумара           | III                | 4             | 10                       | 23                         |
| 5  | р. Луги - пос. Толмачево    | III                | 20            | 26                       | 42                         |
| 6  | р. Крыловка- –д. Крыловка   | V                  | 9             | 84                       | 109                        |
| 7  | Р.Нестеровка – рзд. Таловый | V                  | 22            | 145                      | 311                        |
| 8  | р. Бобр- с. Куты            | IV-III             | 15            | 42                       | 70                         |
| 9  | р.Аремзянка- д.Чукманка     | IV-III             | 10            | 40                       | 57                         |
| 10 | р.Тяжин – пос.Старый Тяжин  | III                | 5             | 35                       | 73                         |
| 11 | р. Пьяна-пос. Камкино       | IV-II              | 45            | 30                       | 35                         |
| 12 | р.Луга-г.Луга               | II                 | 5             | 12                       | 19                         |
| 13 | р.Луга-пос.Воронино         | II                 | 3             | 7                        | 12                         |
| 14 | р. Горынь-Оженин            | II                 | 10            | 8                        | 15                         |

Как видно в таблице, приведены данные только по 4 объектам при втором типе взаимодействия потоков, что позволило получить зависимость

вида  $\frac{\Delta \bar{v}}{\bar{v}_{изм}}$  и для второго типа взаимодействия потоков (рис.6.8) и уточнить аналогичную зависимость для условий третьего типа взаимодействия потоков (рис.6.9). При этом было принято считать углы  $\alpha$  отрицательными при втором и положительными - при третьем типе взаимодействия потоков. Соответственно и значения  $\Delta v$  - положительными при третьем и отрицательными при втором типах взаимодействия потоков.

Как вытекает из анализа данных, приведённых в таблице 6.5, количество исходной информации ограничено, но уже приобретает некую

общую картину. Более того, хоть мы и добавили данные для условий второго типа взаимодействия руслового и пойменного потоков помимо р Пьяне–д. Камкино, этого также нам не достаточно, чтобы с уверенностью утверждать в правильности методики. Поэтому данная информация была использована для построения корреляционных зависимостей как средних, так и максимальных величин погрешностей расчётов средних на вертикалях скоростей от углов  $\alpha$  только для второго и третьего типов взаимодействия потоков (рис. 6.8 и 6.9). Для условий V типа взаимодействия расчётное значение угла  $\alpha$  определялось по формуле

$$\bar{\alpha} = \frac{\sum \Delta h_i \alpha_i}{h_i}. \text{ Здесь } \Delta h_i - \text{ интервал глубин соответствующий значению } \alpha_i.$$

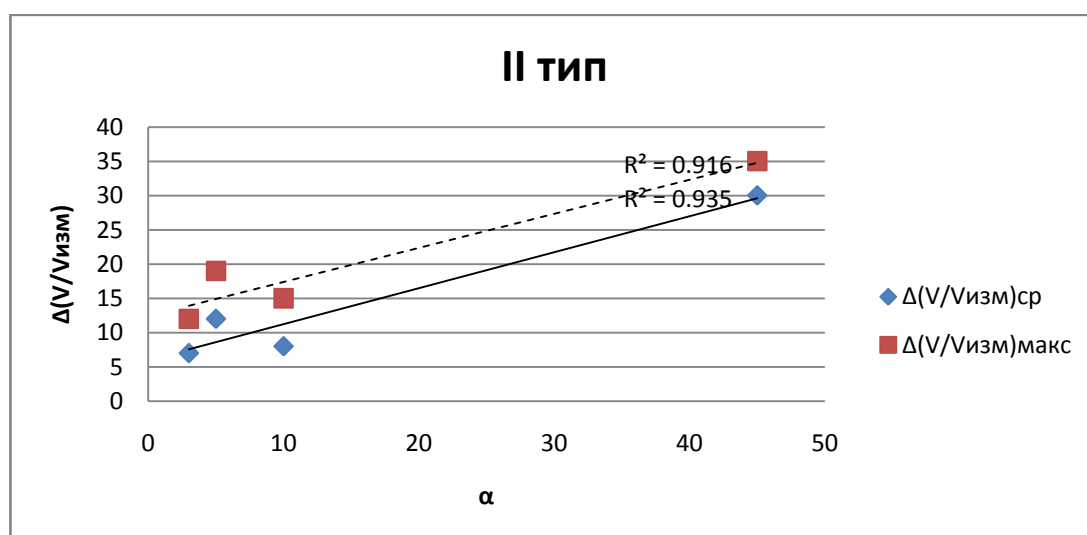


Рис.6.8 Зависимость средних и максимальных погрешностей расчётов средних на вертикалях скоростей русловой составляющей потока от угла  $\alpha$  (II тип взаимодействия потоков)

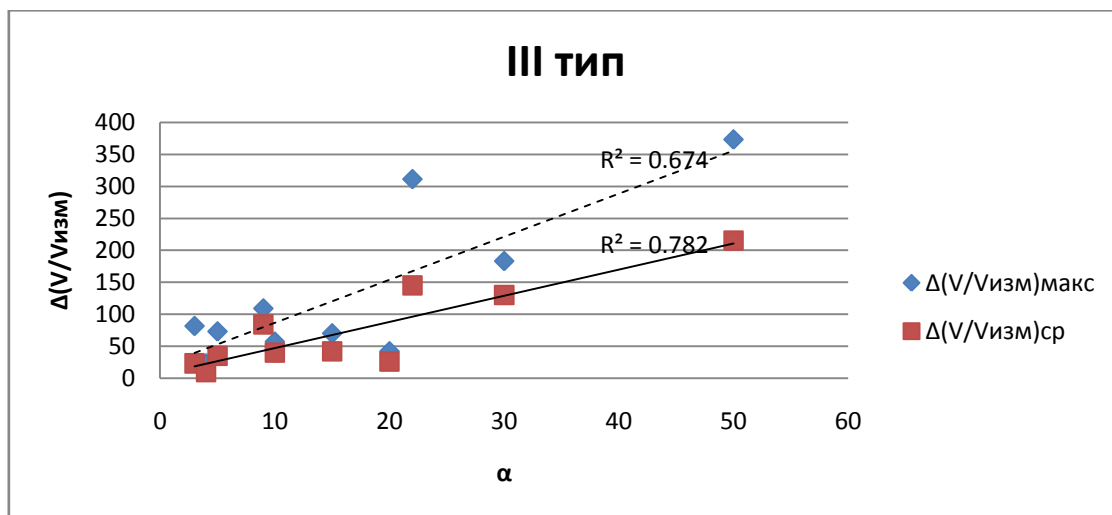


Рис.6.9 Зависимость средних и максимальных погрешностей расчётов средних на вертикалях скоростей русловой составляющей потока от угла  $\alpha$  (III и V типов взаимодействия потоков)

Как видно на рисунках (6.8) и (6.9), наблюдается довольно чёткая, близкая к линейной зависимость как средних  $(\frac{\Delta \bar{v}}{\bar{v}_{изм}})_{ср.}$ , так и максимальных  $(\frac{\Delta v}{v})_{макс}$  погрешностей расчётов средних на вертикалях скоростей от углов  $\alpha$ . Коэффициенты корреляции этих зависимостей для второго типа равно 0,92, а для третьего типа взаимодействия потоков 0,79.

Соответственно встаёт важный вопрос— как же рассчитывать значения средних на вертикалях скоростей русловых потоков при воздействии на них потоков поймы? Ответ на этот вопрос может быть следующим. По стандартной методике, основанной на формуле Шези-Маннинга, определяют значения средних на вертикалях скоростей русловых составляющих потоков  $v_p$ . Затем на основе планово-высотных крупномасштабных данных, определяют тип взаимодействия потоков и угол  $\alpha$ . По значению последнего по графику, приведённому на рисунках 6.8 и 6.9, определяют величину поправки  $(\frac{\Delta \bar{v}}{\bar{v}_{изм}})$ . Эта Поправка может быть использована для определения

величины  $v_{изм}$ . Представив её в виде  $\frac{\Delta \bar{v}}{v_{изм}} = \frac{v_{изм} - v_p}{v_{изм}}$ , получим  $v_{изм} = v_p \left( \frac{\Delta \bar{v}}{v_{изм}} + 1 \right)$ , т.е. величину измеренной средней скорости на вертикали примерно равную её фактическому значению.

Анализ информации, приведённой в таблицах 6.1–6.5 и на рисунках 6.8 и 6.9, позволяет сделать вывод о том, что погрешности расчётов средних на вертикалях скоростей  $\left( \frac{\Delta \bar{v}}{\bar{v}_{изм}} \right)$ , определённых по методике, основанной на формулах Шези-Маннинга, находятся в прямой зависимости не только от угла  $\alpha$ , но и от глубин на соответствующих вертикалях. Если корреляционная зависимость  $\left( \frac{\Delta \bar{v}}{\bar{v}_{изм}} \right)_{ср.} = f(\alpha)$ , приведённая на рисунках 6.8 и 6.9, подтверждает этот вывод, то выявление влияния на них глубин на вертикалях дело ближайшего будущего. Тем более, как показали исследования последних лет, учёт глубин в формулах для определения коэффициентов Шези явно недостаточен.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ информации, приведённой в таблице 6.5 и на рисунках 6.8 и 6.9 позволяет сделать следующие выводы и рекомендации:

–погрешности расчётов по рекомендуемой методики, основанной на методике Караушева [7] при третьем типе взаимодействия потоков почти на порядок больше, чем при втором типе;

–исходя из этого, целесообразно располагать морфостворы на участках, ниже которых происходит расширение пойм.

В тоже время необходимо отметить отсутствие натурной информации о скоростях в параллельных русловых и пойменных потоках. Это не позволяет вывести полученные зависимости на нулевую отметку.

Действительно, как показал анализ лабораторных данных, при параллельных потоках необходимо вводить в качестве третьего фактора глубину, что возможно только при наличии натурной информации.

Проведённый анализ и расчёты позволяют сделать следующие выводы и предложения:

–проблема гидравлических сопротивлений движению русловых потоков, к сожалению, ещё далека от решения. Особенно острой она является для расчётов сопротивлений русел сложных форм сечения, в частности, русел с поймами;

– необходимо повышать качество натурной информации особенно на пойменных створах;

– наиболее перспективным направлением исследований в области гидравлических сопротивлений в настоящее время является совершенствование таблиц для определения коэффициентов шероховатости, посредством введения в них параметров, учитывающих влияние глубин, формы сечения русел и других. На пойменных створах необходим учёт влияния эффекта взаимодействия потоков, в частности, с помощью угла  $\alpha$ ;

– необходима дополнительная натурная и лабораторная информация



для уточнения положения расчётной зависимости  $\frac{\Delta \bar{v}_p}{v_{изм}} = f(\alpha)$

при втором типе взаимодействия русловых и пойменных потоков;

— необходимо дальнейшее совершенствование методики расчётов средних на вертикалях скоростей русловых составляющих потоков, в частности, за счёт учёта эффекта взаимодействия при других его типах.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Попов И.В., Кочаненкова Н.П. О морфологических особенностях речных пойм [Текст]/ Попов И.В. // Труды ГГИ. – Вып. 190. – Л.: Изд. Гидрометеиздат, 1972. – С. 19 – 36.
2. Чалов Р.С. Русловые исследования [Текст]: уч. пособие / Р.С. Чалов – М.: Изд. МГУ, 1995.
3. Маккавеев Н.И., Чалов Р.С. Русловые процессы [Текст]/ Маккавеев Н.И. – М.: Изд. МГУ, 1986.
4. Чалов Р.С. Географические исследования русловых процессов [Текст]/ Чалов Р.С. – М.: Изд. МГУ, 1979.
5. Обидиентова Г.В. Формирование речных систем Русской равнины [Текст]/ Обидиентова Г.В. – М.: Изд. Недра, 1976. – 174 с.
6. Барышников Н.Б., Иванов Г.В. Взаимодействие руслового и пойменного потоков при пересечении их осей [Текст]/ Барышников Н.Б.// Труды ЛГМИ. – Вып.46. – Л.: Изд. Гидрометеиздат, 1972. – С. 23 – 31.
7. Барышников Н.Б. Поймы равнинных рек (морфология, гидрология и гидравлика) [Текст]/ Барышников Н.Б.// Труды ЛГМИ. – Вып.74. – Л.: Изд. Гидрометеиздат, 1981. – С. 95 – 104.
8. Наставление гидрометеорологическим станциям и постам. – вып. 6, ч. 1. – 3-е изд. – Л.: Изд. Гидрометеиздат, 1978. – 272 с.
9. Скородумов Д.Е. Вопросы гидравлики пойменных русел в связи с задачами построения и экстраполяции кривых расходов воды [Текст]/ Скородумов Д.Е.// Труды ГГИ. – Вып. 128. – Л.: Изд. Гидрометеиздат, 1965
10. Барышников Н.Б. Речные поймы (морфология и гидравлика) [Текст]/ Барышников Н.Б. – Л.: Изд. Гидрометеиздат, 1978. – 152 с.
11. Барышников Н.Б. Русловые процессы [Текст]/ Барышников Н.Б. – СПб.: Изд. РГГМУ, 2008. – 439 с.

12. Барышников Н.Б. Методика расчета пропускной способности русел с поймами [Текст]/ Барышников Н.Б.// Труды ЛГМИ. – Вып. 69. – Л.: Изд. Гидрометеиздат, 1969. – С. 127 – 143.
13. Железняков Г.В. Пропускная способность русел каналов и рек [Текст]/ Железняков Г.В. – Л.: Изд. Гидрометеиздат, 1981. – 310 с.
14. Форхгеймер Ф. Гидравлика [Текст] / Ф. Форхгеймер. – М.: Изд. ОНТИ, 1935. – 615 с.
15. Гончаров В.Н. Динамика русловых потоков [Текст]/ Гончаров, В.Н.// уч. пособие – Л.: Изд. Гидрометеиздат, 1962. – 374 с.
16. Спицын И.П. О взаимодействии потоков основного русла и поймы [Текст]/ Спицын И.П.// Метеорология и гидрология. – №10. – М., 1962. – С. 22 – 20
17. Барышников Н.Б., Попов И.В. Динамика русловых потоков и русловые процессы [Текст]/ Барышников Н.Б. – Л.: Изд. Гидрометеиздат, 1988. – 456 с.
18. Карасев И.Ф. Речная гидрометрия и учет водных ресурсов [Текст]/ Карасев И.Ф. – Л.: Изд. Гидрометеиздат, 1980. – 310 с.