

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ»



На правах рукописи

Коринец Екатерина Михайловна

**Развитие информационных технологий исследования речных  
геосистем**

Специальность 25.00.35 – Геоинформатика

05.22.17– Водные пути сообщения и гидрография

Диссертация на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель:  
д.г.н., профессор, заслуженный деятель науки РФ Н.Б. Барышников

Научный консультант:  
к.в.н., доцент А.Г. Соколов

Санкт-Петербург – 2018

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
1 СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ УЧЕТА РАСХОДОВ И СТОКА ДОННЫХ НАНОСОВ В СТРУКТУРЕ РЕЧНОЙ ГЕОСИСТЕМЫ	14
1.1 Научно-технические аспекты управления территориями речных геосистем на основе применения ГИС	-
1.2 Наносы, как компонент структуры речной геосистемы	26
1.3 Методы учета стока донных наносов и оценка эффективности расчетных формул	34
1.4 Поймы и их основные характеристики	47
1.5 Взаимодействие руслового и пойменного потоков	56
1.6 Результаты оценки воздействия эффекта взаимодействия руслового и пойменного потоков на транспортирующую способность руслового потока	70
Выводы	74
2 МЕТОДЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ	77
2.1 Методика проведения экспериментов	-
2.2 Алгоритм обработки данных	91
2.3 Структура и содержание базы данных экспериментальных исследований	97
Выводы	102
3 РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ВЛИЯНИЯ ЭФФЕКТА ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ РУСЛОВОГО И ПОЙМЕННОГО ПОТОКОВ	104
3.1 Результаты исследования транспортирующей способности руслового потока при гладкой пойме	-
3.2 Результаты исследования транспортирующей способности руслового потока при шероховатой пойме	117
3.3 Обоснование структуры базы знаний ГИС для прогнозирования русловых деформаций	127

Выводы	133
4 ПРАКТИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО УЧЕТУ ВЛИЯНИЯ ЭФФЕКТА ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ РУСЛОВОГО И ПОЙМЕННОГО ПОТОКОВ НА ТРАНСПОРТ ДОННЫХ НАНОСОВ В УПРАВЛЕНИИ РЕЧНОЙ ГЕОСИСТЕМОЙ	135
Выводы	144
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	147
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	154
ПРИЛОЖЕНИЯ	162

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность работы.** В последнее время перед учеными стоит ряд проблем, связанных с изменением окружающей среды, глобальным потеплением, и, как следствие, с учащающимися катастрофическими явлениями, такими как наводнения, ураганы, смерчи и др. Предстоит решать задачи оперативного реагирования, прогнозирования и разработки мероприятий по минимизации ущерба от таких явлений, что необходимо для жизни людей в целом. Особенно острой эта проблема является для территории РФ богатой водными ресурсами. Специфика состоит в том, что большинство рек РФ относят к равнинным, следовательно, у них имеется пойма, затопляемая часть речной долины в период паводков и половодий. Поймы занимают обширные территории (приблизительно 2-3% территории страны) и для жизни реки играют ключевую роль, регулируя и пропуская высокие паводки, в период которых в русло реки попадает не только большое количество воды, но и наносов, информация о которых крайне важна для разработок проектов гидротехнических сооружений. К сожалению, на сети Росгидромета наблюдения за расходами донных наносов не производятся, так как методика их измерений несовершенна и приводит к неудовлетворительным результатам.

Отсутствие или низкая точность результатов расчетов расходов и стока донных наносов может стать причиной аварий на мостовых переходах, дамбах и др. гидротехнических сооружениях. Для предотвращения таких последствий проводились многочисленные исследования, направленные на разработку универсальной формулы или методики, позволяющих надежно рассчитывать транспортирующую способность потока и сток наносов. Итогом этих разработок стало появление более двухсот формул для расчетов расходов донных наносов, ни одну из которых, как показали дальнейшие исследования, нельзя считать универсальной. Основными недостатками этих формул является то, что их применение дает приемлемые результаты только

в очень узком диапазоне изменения переменных, а погрешности расчетов по ним, как правило, выходят за допустимые пределы.

Так как инженерная гидрология оперирует большими объемами пространственной информации, перед учеными также **актуальной является научная проблема** формирования геоинформационных систем, включающих структуры и инструменты управления данными, необходимые для их анализа и обработки. К сожалению, в настоящее время отсутствует единый открытый для исследователей информационный банк, характеризующий состояние гидроресурсов страны и их использование. Причиной такого положения является разрозненность гидрологической информации, ее несогласованность, а также отсутствие обобщенных данных результатов экспериментальных лабораторных и натурных исследований.

Системный подход, как новое направление исследований в гидрологии, стал применяться не так давно, в частности, он представляет собой анализ системы «бассейн – речной поток – русло», как саморегулирующейся. Благодаря объединению достижений различных направлений исследований потоков в руслах с поймами на основе учета особенностей морфологического строения и пространственного распределения морфометрических характеристик стало возможным вплотную подойти к решению некоторых проблем русловых и пойменных процессов.

Поймы являются важной составляющей в процессе саморегулирования в геосистеме: «бассейн – речной поток – русло», так как они выполняют основную роль регулятора стока воды и стока наносов в периоды паводков и половодий, особенно катастрофических. Процесс саморегулирования заключается в существенном увеличении транспортирующей способности руслового потока в периоды подъема уровней при поступлении максимального объема наносов, и к значительному ее снижению в периоды спада уровней, когда осуществляется торможение руслового потока при вторжении в него пойменного.

Известно, что основная масса наносов поступает в речные русла в периоды подъемов уровней во время паводков и половодий и, особенно, катастрофических, когда поймы, как правило, полностью затоплены, и пойменный поток начинает активно взаимодействовать с русловым. При этом возникает эффект взаимодействия потоков, который трансформирует поля их скоростей. Отсюда следует, что одной из главных причин неудовлетворительных результатов расчетов расходов донных наносов по формулам является недостаточная изученность вопроса о влиянии эффекта взаимодействия руслового и пойменного потоков, оказывающего решающее влияние на транспортирующую способность руслового потока.

Такое положение дел с информацией о стоке донных наносов свидетельствует об **актуальности научной задачи диссертации**, имеющей как теоретическое, так и большое практическое значение: на основе модифицированной методики экспериментального прогнозирования русловых деформаций разработать модуль базы знаний для создания геосистем с целью сбора, систематизации и анализа пространственно-координированных данных о характеристиках русловых и пойменных потоков.

Актуальность разработок по данной тематике подтверждает также и то, что в 2012 году разработанный проект был удостоен премии, как победитель конкурса грантов для студентов и аспирантов вузов, отраслевых и академических институтов, расположенных на территории Санкт-Петербурга.

**Объектом исследований** является геоинформационная система оценки транспортирующей способности руслового потока при влиянии на него пойменного.

**Предмет исследований** – база знаний геоинформационной системы, включающая экспериментально установленные зависимости транспортирующей способности руслового потока от особенностей

морфологического строения расчетного участка, определяющего тип взаимодействия руслового и пойменного потоков.

**Цель работы** – формирование базы знаний геоинформационной системы на основе исследований закономерностей взаимодействия руслового и пойменного потоков.

В используемых на практике расчетных формулах этот эффект не учитывается, хотя он был открыт в 40-х годах прошлого столетия и явился определяющим для расчетов параметров скоростного поля руслового потока и пропускной способности русла.

Для решения этой проблемы помимо анализа ограниченного объема натуральных данных, были проведены лабораторные исследования на моделях русла с односторонней гладкой и шероховатой поймами как при расхождении, так и при схождении динамических осей потоков под углами 5,10,15,20 градусов. На основе данных лабораторных экспериментов было выявлено влияние этого эффекта на транспортирующую способность руслового потока, систематизированы данные измерений предыдущих лет в виде базы знаний, включающей методы оценок расходов донных наносов.

Для достижения поставленной цели в работе решены следующие **задачи**.

1. Выполнен анализ современного состояния проблемы учета расходов и стока донных наносов в структуре речной геосистемы.
2. Проведены экспериментальные исследования по разработанным модифицированным методикам.
3. Разработан алгоритм обработки экспериментальных данных, на основании которого было проведено обобщение результатов экспериментальных исследований за все периоды их проведения, а также выявлены новые зависимости.
4. Разработано программное обеспечение по визуализации полученных зависимостей и база данных для их хранения, обработки и дальнейшего дополнения.

5. Обоснованы структура и содержание базы знаний для прогнозирования русловых деформаций.
6. Разработаны практические рекомендации по учету влияния эффекта взаимодействия руслового и пойменного потоков на транспорт донных наносов в управлении речной геосистемой.

**Научная новизна и личный вклад автора.** Автором была задача сформулирована новая научная задача: систематизации и анализа пространственно-координированных данных о характеристиках русловых и пойменных потоков для совершенствования методики прогнозирования русловых деформаций в части оценки влияния эффекта взаимодействия руслового и пойменного потоков на транспортирующую способность руслового потока в условиях различного расположения динамических осей взаимодействующих потоков.

Для решения поставленной задачи разработана модифицированная методика проведения экспериментальных исследований, алгоритм обработки экспериментальных данных, позволивший установить новые закономерности поведения речной геосистемы, составившие содержание базы знаний геоинформационной системы.

Разработано программное обеспечение по визуализации полученных зависимостей, на основании выполненного анализа, а также проведено обобщение результатов экспериментальных исследований за все периоды их проведения.

В результате проведения экспериментов выявлены закономерности воздействия эффекта взаимодействия руслового и пойменного потоков на транспортирующую способность руслового потока в стационарных условиях. На их основе разработаны рекомендации по учету эффекта взаимодействия руслового и пойменного потоков при оценке транспортирующей способности руслового потока.

Автор принимала непосредственное участие при проведении экспериментальных исследований и обработке результатов измерений, на

основании которых была разработана база данных, обобщающая результаты экспериментов, проводимых более десяти лет в лаборатории кафедры гидрометрии РГГМУ.

Выполнена оценка влияния особенностей морфологического строения русла и поймы на транспортирующую способность руслового потока при стационарных условиях. Впервые экспериментальным путем установлено, что в результате саморегулирования в подсистеме речной поток-русло в период подъема уровней, когда в русловой поток поступает максимальное количество наносов, система перестраивается таким образом, что под воздействием эффекта взаимодействия значительно возрастают скорости и транспортирующая способность руслового потока. В период спада уровней, когда в русловой поток поступает ограниченное количество донных наносов («осветленный поток»), система вновь перестраивается, и за счет торможения пойменным потоком руслового, скорости последнего и его транспортирующая способность существенно уменьшаются.

Предложены практические рекомендации для формирования структуры и содержания базы знаний ГИС оценки влияния эффекта взаимодействия руслового и пойменного потоков на транспорт донных наносов.

#### **Практическая значимость и применение результатов.**

Рекомендации по совершенствованию методов расчетов расходов донных наносов, основанные на результатах данной работы, могут быть применены при проектировании и строительстве гидротехнических сооружений, так как данные о стоке наносов востребованы, а натурная информация, как правило, отсутствует или имеет высокую стоимость и низкое качество.

**Публикации.** Основные положения и выводы работы были изложены в публикациях в научных журналах и сборниках материалов конференций, в том числе в журналах «Ученые записки РГГМУ» (№19, 2011; №22, 2011; №23, 2011; №30, 2013; №39, 2015; реферируется ВАК), «Геоморфология» (№1, 2012; реферируется ВАК). Всего 16 печатных работ, в том числе 7 в изданиях, рекомендованных ВАК РФ.

**Апробация.** Результаты работы были доложены на конференциях: VII Всероссийский Гидрологический съезд (Санкт-Петербург, 2013), Научно-практическая конференция "Водные пути и русловые процессы - Гришанинские чтения", (ГУМиРФ им. адмирала С.О. Макарова, Санкт-Петербург, 2014), Всероссийская конференция «Гидрометеорология и экология: научные и образовательные достижения и перспективы развития» (Санкт-Петербург, 2017) и на заседаниях СНО РГГМУ. Проект был удостоен премии, как победитель конкурса грантов для студентов и аспирантов вузов, отраслевых и академических институтов (СПб, 2012). Получено авторское свидетельство №2018610821 о регистрации программы для ЭВМ (2018).

#### **Соответствие диссертации Паспорту специальности.**

Сформулированные в диссертации цели и задачи, а также полученные основные результаты соответствуют формуле паспорта специальности 25.00.35-«Геоинформатика» и следующим пунктам: п.4. Базы и банки цифровой информации по разным предметным областям, а также системы управления базами данных; п.5. Базы знаний по разным предметным областям; п.6. Математические методы, математическое, информационное, лингвистическое и программное обеспечение для ГИС. Также полученные результаты соответствуют формуле паспорта специальности 05.22.17-«Водные пути сообщения и гидрография» и следующим пунктам: п.2. Глубины, поверхностные и глубоководные течения; п.5. Донные грунты и грунты на прилегающих территориях.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, 4 разделов, заключения, списка литературы из 82 наименований и 3 приложений. Работа объемом 162 стр., содержит 40 рисунков и 11 таблиц.

**Во введении** сформулированы основные цели и задачи исследования, описан объект исследования, раскрыта актуальность и научная новизна работы, обоснована ее практическая значимость, а также обозначен личный вклад автора. Приведено краткое описание работы по разделам, и обозначены основные результаты, выносимые на защиту.

**В первом разделе** «Современное состояние проблемы учета расходов и стока донных наносов в структуре речной геосистемы» приведены результаты анализа основных проблем, связанных с развитием речных геосистем, а также с методиками учета транспорта донных наносов в руслах рек.

Установлено, что на транспортирующую способность руслового потока значительное влияние оказывает пойменный поток, что не учитывается в методиках определения расходов донных наносов, а натурная информация по данной проблематике ограничена, в связи с чем, обоснована необходимость экспериментального исследования эффекта взаимодействия руслового и пойменного потоков.

***Результат, выносимый на защиту:*** на основании анализа современного состояния проблемы учета расходов и стока донных наносов в структуре речной геосистемы сформулирована новая научная задача: ***систематизации и анализа пространственно-координированных данных о характеристиках русловых и пойменных потоков в геоинформационной системе для совершенствования методики прогнозирования русловых деформаций***

**Во втором разделе** «Методы экспериментальных исследований» представлена методика проведения экспериментов по выявлению влияния эффекта взаимодействия руслового и пойменного потоков на транспортирующую способность руслового потока на лабораторной установке. Приведено описание лабораторного оборудования, экспериментальной модели и измеряемых характеристик, а также способы обработки и визуализации экспериментальных данных. За основу методического обеспечения экспериментов принята методика, разработанная на кафедре гидрометрии РГГМУ, представляющая собой моделирование руслового и пойменного потоков при стационарных условиях. Совершенствование методики основано на вариативном характере типа подстилающей поверхности поймы и включает шероховатость трех типов.

Для снижения погрешностей измерения расходов воды и, особенно, расходов донных наносов был применен метод сравнения, основанный на сопоставлении данных измерений транспортирующей способности руслового потока как при его изоляции от пойменного, так и при их взаимодействии.

***Результат, выносимый на защиту: модифицированная методика проведения экспериментальных исследований.***

**В третьем разделе** «Результаты экспериментальных исследований влияния эффекта взаимодействия руслового и пойменного потоков» представлены графические зависимости транспортирующей способности потока от глубины и угла между динамическими осями взаимодействующих потоков, а также характеристик подстилающей поверхности поймы, построенные на основе проведенного исследования. Полученные результаты позволяют качественно оценить влияние эффекта взаимодействия руслового и пойменного потоков на транспорт донных наносов в стационарных условиях. Экспериментальные данные были обобщены и представлены в программе визуализации графических зависимостей, разработанной автором, схема и описание которой представлено в данном разделе.

***Результат, выносимый на защиту: разработана методика обработки экспериментальных данных, реализованная в виде алгоритма и программного обеспечения по визуализации полученных зависимостей.***

**В четвертом разделе** «Практические рекомендации по учету влияния эффекта взаимодействия руслового и пойменного потоков на транспорт донных наносов в управлении речной геосистемой» были сформулированы основные выводы по итогам данного исследования, даны рекомендации по совершенствованию методики учета стока донных наносов, а также сформирована и обоснована структура базы знаний для прогнозирования русловых деформаций. Физические процессы, которые наблюдаются в природных условиях, подтверждают результаты экспериментальной работы, для чего были проанализированы и представлены результаты природных исследований по данному направлению.

*Результаты, выносимые на защиту: обоснованы структура и содержание базы знаний геоинформационной системы для прогнозирования русловых деформаций на основании результатов экспериментальных исследований, систематизированных в специализированной базе данных; рекомендации по учету эффекта взаимодействия руслового и пойменного потоков при оценке транспортирующей способности руслового потока.*

**В заключении** представлены основные научные результаты, которые отвечают задачам, поставленным в данном исследовании, и выносятся на защиту. Сформулированы основные направления дальнейших исследований.

## 1 СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ УЧЕТА РАСХОДОВ И СТОКА ДОННЫХ НАНОСОВ В СТРУКТУРЕ РЕЧНОЙ ГЕОСИСТЕМЫ

1.1 Научно-технические аспекты управления территориями речных геосистем на основе применения ГИС.

Понятие геосистема представляет собой взаимообусловленные природные компоненты, связанные воедино и развивающиеся во времени как части целого. Практически любые структурные физико-географические образования от географической оболочки Земли до фации считаются геосистемами. Этот термин был введен в 1963 г. Б.В. Сочавой [1], который также отмечает, что сущность любого объекта принадлежит к системам, как универсальной форме организованности в природе. Для геосистемы характерны одновременно как свойство континуальности (непрерывности), так и свойство дискретности (прерывистости). Континуальность выражается во взаимопроникновении компонентов системы в виде потоков энергии и вещества – круговоротами (интеграция), дискретность же проявляется в виде процессов разделения компонентов, отдельные части которых выполняют свои функции в составе целого (дифференциация). Оба эти процесса должны рассматриваться в совокупности.

К основным свойствам геосистем относят следующие: целостность, устойчивость, структура, функционирование, эволюция и динамика. Важнейшим из них является целостность, что означает невозможность представлять систему в виде простой суммы ее компонентов, так как именно их взаимодействие делает систему автономной и устойчивой к внешним воздействиям. Тем не менее, геосистемы пронизаны потоками вещества и энергии, связывающими их с окружающей средой, что делает их открытыми системами. Функционирование системы и ее динамика выражаются в повторяющихся изменениях системы, связанных с суточными и годовыми ритмами, а способность возвращаться в первоначальное состояние свидетельствует об устойчивости. Направленное необратимое изменение,

при котором начинается смена одного природного комплекса другим, характеризуется эволюцией.

Структура геосистемы является сложносоставной, включает в себя вертикальную и горизонтальную составляющие, предполагающие не только взаимное расположение составных частей, но и способы их соединения. Вертикальная структура образуется компонентами, а горизонтальная отвечает за сочетание систем более низкого ранга.

Современные геоинформационные системы (ГИС) представляют собой новый тип интегрированных информационных систем, которые оперируют координатно-привязанной информацией и, в силу этого, обладают определенной спецификой в организации и обработке данных, но включают методы обработки данных многих ранее существовавших автоматизированных систем. Применительно к геоинформационному подходу совершенствование системы управления обеспечивается использованием геоинформационных систем и технологий, распределенных гетерогенных баз данных, пространственных аспектов методов анализа и представления информации. Важнейшими критериями эффективности управленческих функций должны быть положительные изменения конечных показателей деятельности объекта управления при сохранении устойчивости системы. В традиционном понимании географическая информационная система – это информационная система, обеспечивающая использование данных о пространственных объектах в форме их цифровых представлений (векторных, растровых, квадратомиических и иных)[2].

Обязательными составными частями ГИС являются базы данных и программное обеспечение. Типовая структура ГИС включает, как показано на рисунке 1.1:

базу данных (с системой управления - СУБД);

базу знаний (с системой управления - СУБЗ);

систему управления ГИС в целом с выходом на соответствующий интерфейс (глобальная система управления), согласованный с особенностями пользователя.

Геоинформационный подход к управлению русловыми процессами с учетом рассмотренных особенностей предполагает формирование новых требований как к ГИС в целом (информационная система поддержки управленческих решений), так и к элементам ГИС.

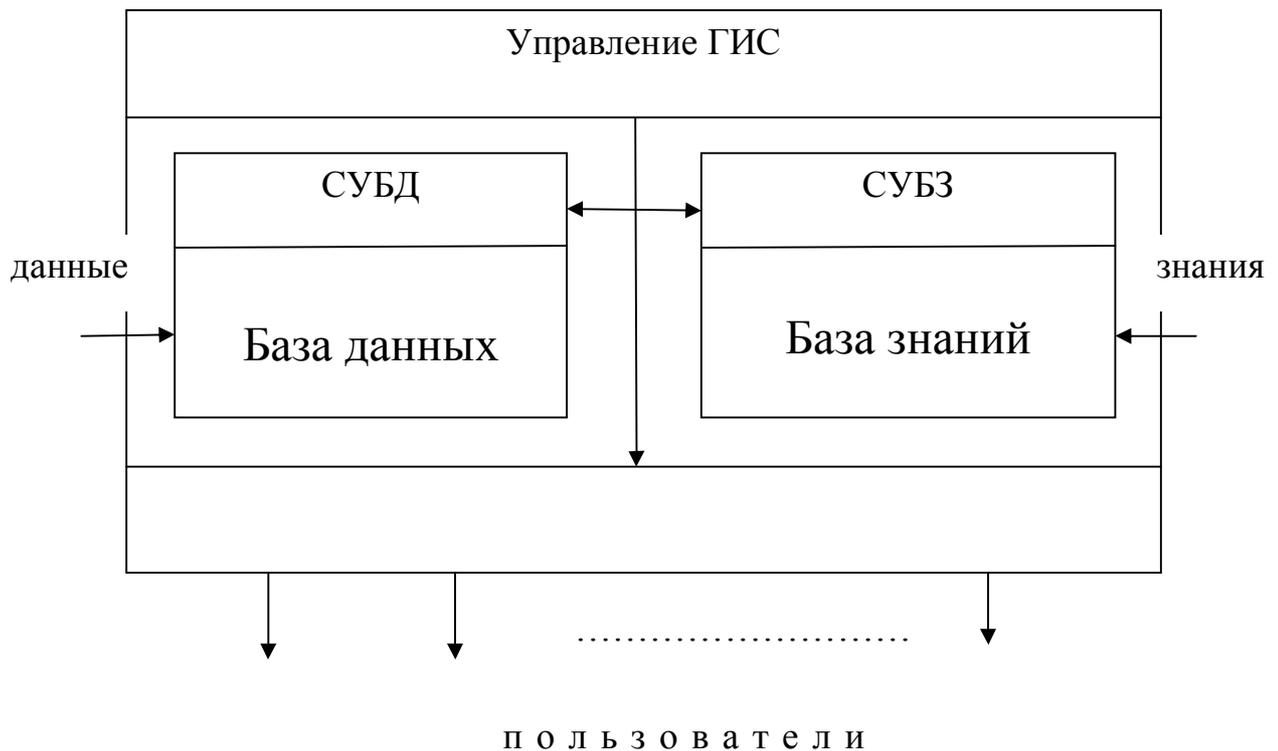


Рисунок 1.1 – Типовая структура геоинформационной системы

Массив гидрологических наблюдений состоит из данных различного рода, к которым относятся средние, максимальные и минимальные уровни воды, среднемесячные, максимальные и минимальные расходы воды, ледовые явления, состав наносов и пр. Последующая систематизация этих данных применительно к различным географическим объектам является составной частью процесса проектирования базы данных. Измерения и выборки, содержащиеся в базе данных, должны как можно более полно и точно соответствовать предмету исследований и его основным

характеристикам. Также представление данных должно учитывать и дальнейшие преобразования системы [2].

Для создания базы данных геоинформационной системы (БД ГИС) предъявляются высокие требования, связанные с пространственной формой организации данных [3].

- согласованность по времени – количественные данные должны соответствовать определенному времени и быть актуальными;

- полнота – необходима подробность для создания на основе ГИС, категории данных должны включать все необходимые сведения для осуществления анализа или моделирования данного объекта или явления;

- точность – полная совместимость с другими данными, которые могут впоследствии добавляться;

- достоверность – правильность отражения характера явлений, что предполагает наличие четкого определения включенных в нее атрибутов;

- простая обновляемость;

- доступность.

Пространственные данные в ГИС представляют собой цифровые модели, которые используются исключительно в среде компьютера, в связи с этим обусловлена необходимость визуализации этих данных [4]. Однако, для целостного представления этих данных необходима графическая визуализация, отображающая их в единстве их позиционных составляющих. Для решения неформализованных задач такого рода в геоинформатике стали применяться экспертные системы, для которых характерны следующие общие черты:

- невозможность реализации задач в числовой форме;

- отсутствие алгоритмического решения задач или невозможность использовать его в виду ограниченность ресурсов;

- невозможность выразить в терминах точно определенной функции.

К тому же неформализованные задачи обладают неполнотой и неоднозначностью, как исходных данных, так и знаний о решаемой задаче.

В основе любой экспертной системы находится база знаний (БЗ) о предметной области, которая пополняется в процессе проектирования и эксплуатации экспертной системы [3]. Таким образом, база знаний – это своеобразная база данных, которая оперирует знаниями и работает совместно с системами поиска и извлечения информации. Информация в базе знаний находится в структурированном виде, предназначенным для использования программным обеспечением [5]. В сфере инженерной гидрологии и геологии самой распространенной считается «База Знаний: гидрогеология, инженерная геология, геоэкология» разработанная Санкт-Петербургским отделением Института геоэкологии РАН и НИЦ Гидрогеологии геологического факультета Санкт-Петербургского государственного университета.

В настоящее время, благодаря внедрению ГИС-технологий в сферу гидрологических исследований значительно усовершенствовались методы комплексного изучения водных ресурсов и их пространственно-временного распределения. Геоинформационные системы нашли широкое применение в гидрологии, так как большинство гидрологических задач носят пространственный характер [6].

Тем не менее, методические указания по использованию ГИС-технологий применительно к управлению русловыми процессами в части оценки транспортирующей способности руслового потока до сих пор не разработаны.

С целью установления возможности использования для автоматизированного определения аварийных ситуаций при обслуживании гидротехнических сооружений осуществлен анализ потенциальных возможностей программного обеспечения. Опробованы методические подходы к обработке геоданных в среде ГИС с целью сокращения затрат времени на принятие адекватного решения при управлении русловыми процессами.

Использование ГИС-технологий охватывает практически все области решения задач в гидрологии, а создаваемые цифровые модели рельефа или

карты отображают потенциальные площади затоплений или изменения рельефа дна, что служит основой для проектирования и строительства защитных сооружений. Успешное применение ГИС-технологий подтверждаются многими зарубежными и отечественными учеными и их разработками, стоит отметить работу Магомедовой А.В. и Курбановой З.А. [7] по применению ГИС-технологий. В работе представлены результаты исследования русловых переформирований на примере участка реки Терек, которая включает в себя продольные и поперечные профили русла по 70 створам в период 1965-1994 гг, систематизированные в базе данных, на основе которой была построена векторная электронная карта данной области [7].

Как правило, в работах по применению ГИС описывается их практическое применение для решения отдельных задач в области гидрологии, при этом методы реализации решения не рассматриваются. В качестве исключения стоит отметить работу Орловой Е.В. [8], в которой на основе обобщения исходной информации о применении ГИС-технологий в гидрологии рассматриваются в основном методические подходы. Для широкого применения в гидрологических исследованиях такой подход является наиболее актуальным, что справедливо и для данного исследования.

Известно, что для оценки состояния водных ресурсов при условиях ограниченного количества натурной информации используют метод картирования гидрологических характеристик. Основу метода составляет концепция о плавно изменяющемся в пространстве характере географических параметров, от которых зависят и основные гидрологические характеристики, следовательно, для любой точки карты можно определить искомую величину при помощи интерполяции к натурной информации, полученной в точках пунктов наблюдений.

В качестве демонстрации потенциальных возможностей применения ГИС-технологий был выбран участок реки Оби около города Барнаула. На рис. 1.2 представлен результат построения этой области.



Рисунок 1.2 – цифровое картографическое изображение участка реки Оби

При помощи ГИС-программ (QGIS и Global Mapper) была построена цифровая карта участка бассейна реки Оби, и на ее основе был применен метод трехмерного моделирования. Так как высота местности является одним из факторов, оказывающих существенное влияние на сток, данный метод позволил создать карту пространственного распределения слоя стока (рис1.3).

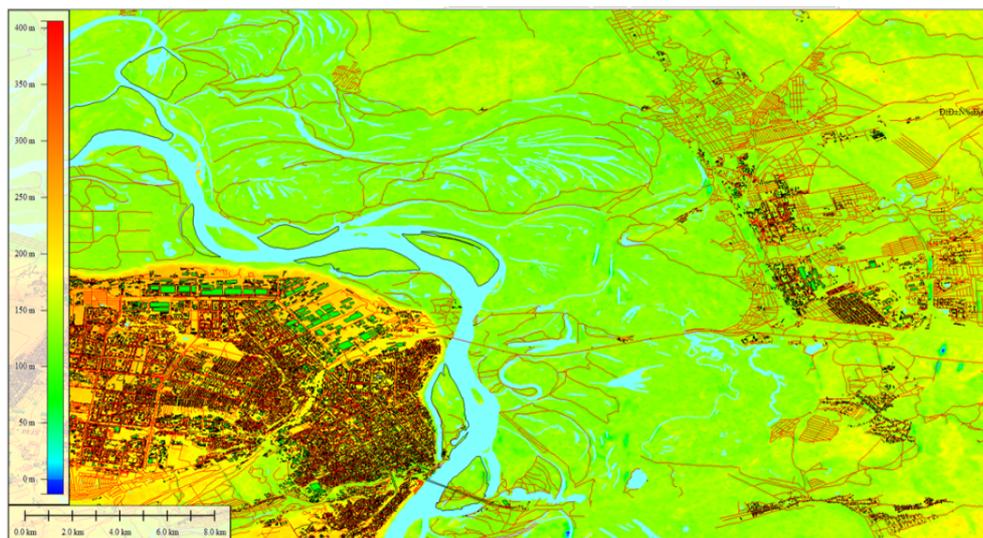


Рисунок 1.3 – трехмерное картографическое изображение участка реки Оби

Многие геоинформационные системы имеют функции, которые позволяют работать в трехмерном пространстве, на их основе можно построить цифровые модели рельефа (ЦМР). Пример ЦМР для участка реки Оби представлен на рис. 1.4. По этим моделям определяются средние высоты водосбора, уклон, объемы водных объектов, также строятся продольные и поперечные разрезы.

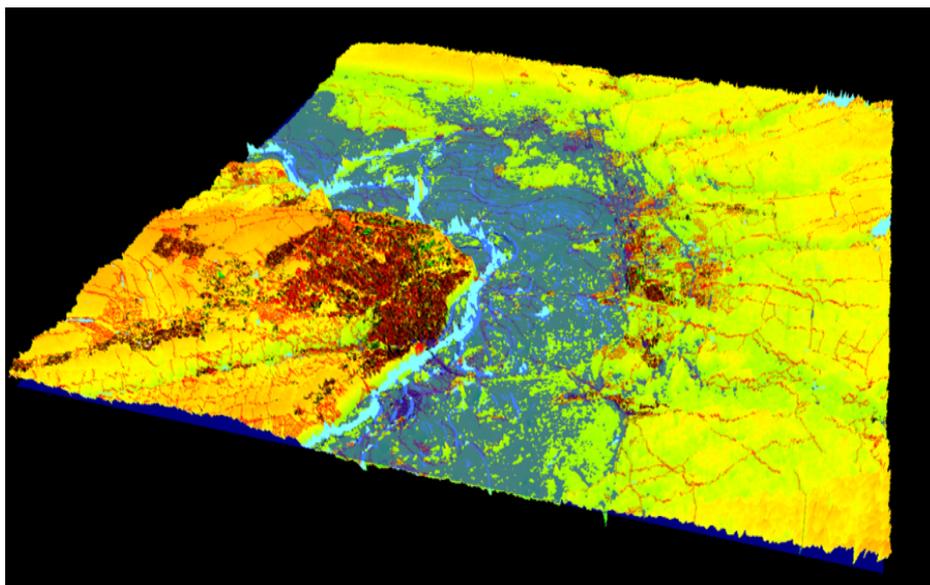


Рисунок 1.4 – Цифровая модель рельефа участка реки Оби

Для решения таких задач, как выполнение оперативных расчетов, оценки водных ресурсов и изучения гидрологического режима водных объектов органы государственного управления нуждаются в использовании географических информационных систем. Особенно остро эта проблема стоит в связи с регулярным сокращением количества гидрологических станций на территории РФ, а также во многих зарубежных странах.

Цифровые карты водных объектов совместно с их гидрологическими характеристиками и данными измерений в ГИС позволяют оперативно производить автоматизированный комплексный анализ происходящих процессов, в связи с чем, эффективнее производится сбор, обработка и систематизация данных, на основе которых осуществляется проектирование и строительство гидротехнических сооружений, а также подготовка принятия управленческих решений. В целях повышения эффективности управления

русловыми процессами проектные организации и подразделения Ростехнадзора заинтересованы в применении программного обеспечения под существующие аппаратно-программные комплексы.

Таким образом, управленческое решение должно содержать модель процесса, которым оно управляет, и являться системой. Для разработки системы (модели) существует два подхода: на основе анализа или синтеза. Первый подход не позволяет формировать процессы с заранее заданными свойствами, что особенно важно при прогнозировании. На рис. 1.5 представлена структура основных этапов синтеза модели управленческого решения [9].

Управленческое решение – это условия обеспечения субъектом условий реализации предназначения объекта, которым он управляет, в соответствующей обстановке в интересах достижения цели управления. Обстановка – совокупность факторов и условий, в которых осуществляется деятельность [10].

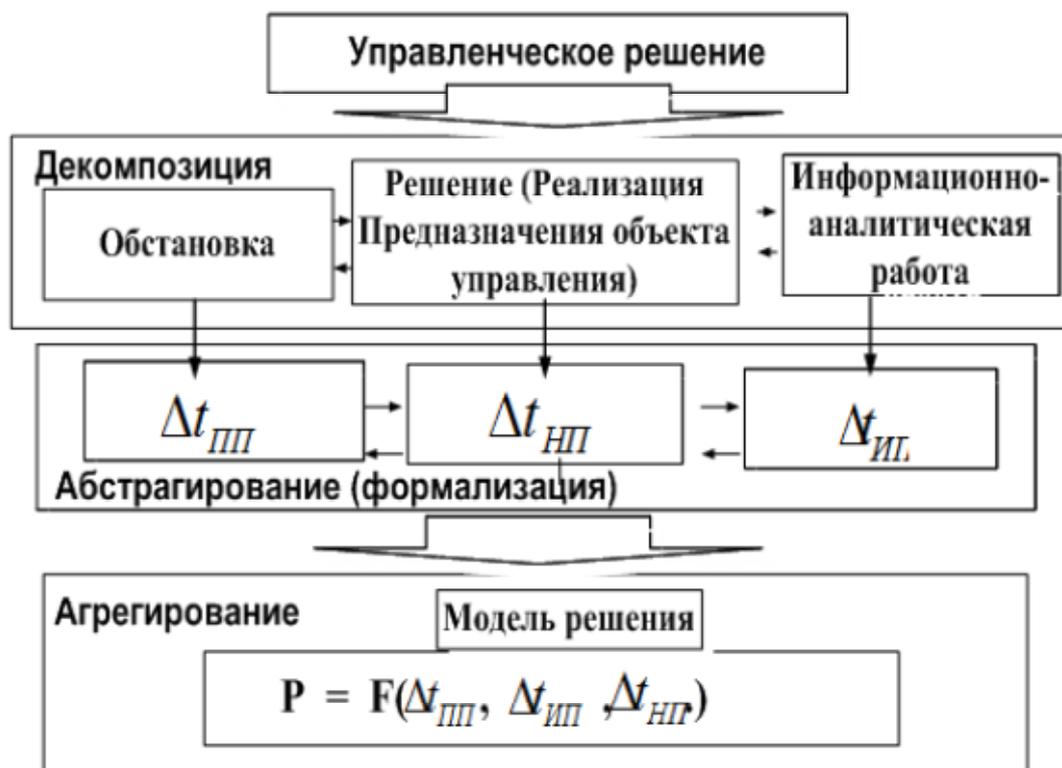


Рисунок 1.5 - Структурная схема этапов синтеза модели управленческого решения

**где:  $\Delta t_{пп}$  – время проявления проблемы;**

**$\Delta t_{ип}$  – время идентификации (распознавание);**

**$\Delta t_{нп}$  – время нейтрализации (устранение).**

Математическую модель управленческого решения следующего вида:

В этом соотношении связаны три параметра. Таким образом установлена зависимость характеристик проявления проблемы ( $\Delta t_{пп}$ ), идентификации проблемы ( $\Delta t_{ип}$ ) и ее нейтрализации ( $\Delta t_{нп}$ ), возникшей при управлении [10]. Поставлена задача и показана возможность, как повысить эффективность реализации решения человека.

На основе полученной зависимости можно записать формулу для расчета показателя эффективности принятия управленческого решения, который характеризует вероятность идентификации ситуации и принятия адекватного решения ( $P$ ). В основу деятельности положено решение руководителя, которое основывается на построении математической модели, так как необходима количественная оценка. Данные условия получены при следующих допущениях и предположениях:

1. Схема принятия решения представляется в форме информационно-управляющей системы.
2. Интервалы времени между моментами обнаружения фактов проявления проблем являются величинами случайными.
3. Обнаруженные факты во времени образуют поток, близкий к распределению Пуассона.
4. Время обработки данных о требуемом признаке является величиной случайной.
5. Данные о признаках распределяются далее между выделенными ресурсами, решающими соответствующие целевые задачи.
6. Рассматривается случай, когда время пребывания требуемых признаков (фактов) в области действия системы (человека) весьма ограничено и соизмеримо со временем, которое необходимо для их

идентификации, а также обработки данных и принятия адекватных действий по этим признакам.

7. Система подготовлена к решению задач распознаванию и нейтрализации проблем.

8. Разрабатываемая система (решение человека) предназначена для оценивания потенциальных возможностей системы управления в зависимости от обстановки.

Обозначенные допущения и предположения позволяют использовать систему дифференциальных уравнений Колмогорова-Чепмена [10].

Основное уравнение показывает вероятность нахождения системы во время состояния, когда существующая проблема решена, а новая еще не наступила.

$$P = \frac{\vartheta_1 \vartheta_2}{\lambda(\lambda + \vartheta_1 + \vartheta_2) + \vartheta_1 \vartheta_2}, \quad (1.1)$$

где  $\vartheta_{1,2}$  – интенсивности деятельности по идентификации и нейтрализации проблемы (причем  $\vartheta_1 = \frac{1}{\Delta t_{\text{тип}}}$ ,  $\vartheta_2 = \frac{1}{\Delta t_{\text{тип}}}$ );

$\lambda$  – величина, обратная среднему времени проявления проблемы ( $\lambda = \frac{1}{\Delta t_{\text{тип}}}$ ).

В качестве примера расчетно-графического представления возможностей применения ГИС при управлении русловыми процессами можно рассмотреть обслуживание участка трубопровода через реку. На основе учета и прогноза русловых деформаций можно гарантировать бесперебойную работу данного участка. Заглубление трубопровода направлено на предотвращение таких аварийных ситуаций, как провисание трубы, воздействие на нее турбулентного потока, характеризующегося интенсивными пульсациями.

Пусть  $\Delta t_{\text{тип}}$  – время проявления одной из вышеуказанных проблем (неизвестно);

$\Delta t_{ип}$  – время идентификации (распознание) при плановом обслуживании приблизительно 3 суток, при использовании ГИС и наличии прогноза русловых деформаций приблизительно 2 часа;

$\Delta t_{нн}$  – время нейтрализации (комплекс мероприятий по предотвращению аварийных ситуаций на участках подводных переходов трубопроводов) приблизительно 5 суток.

Тогда, решая уравнение 1.1 получаем зависимость  $P=f(\lambda)$  графически представленную на рис. 1.6

$P_1$  – показатель эффективности при наличии плановых мероприятий по обслуживанию участка перехода (отображается синим цветом),  $P_2$  – при использовании ГИС (красный цвет).

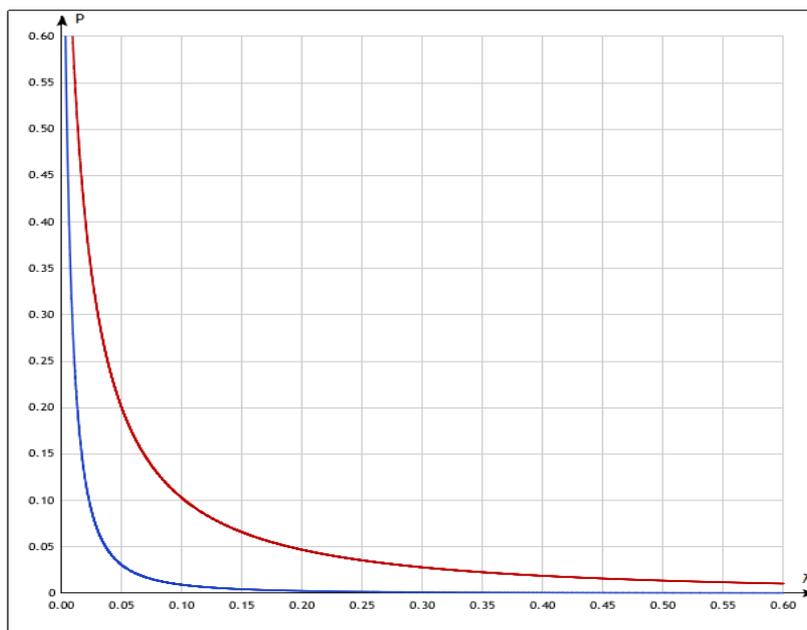


Рисунок 1.6 - Показатель эффективности в управлении гидротехническими сооружениями при использовании ГИС

Из данного рисунка видно, что при увеличении времени на принятие решения, включающее время идентификации и нейтрализации проблемы можно повысить вероятность решения отвечающего современным условиям функционирования речной геосистемы.

Использование автоматизированной системы управления русловыми процессами, основанной на ГИС, позволит усовершенствовать ее

управленческие функции и механизмы, повысит уровень предотвращения аварий на гидротехнических сооружениях, а также представит потенциал для дальнейшего развития методик на основе данной системы. В свою очередь в приведенной математической модели определены зависимости обобщенных характеристик обстановки.

Полученные в ходе данного исследования методические разработки могут быть использованы при создании территориальных ГИС, корректировке СНиПов, оценке риска наводнений, а также для мониторинга и прогноза русловых деформаций, в том числе учет стока донных наносов, расчет русловых карьеров, размыв водохранилищ и опор мостовых переходов.

Однако, для более полного представления речной геосистемы и целесообразного использования водных ресурсов при использовании ГИС-технологий, необходимым является непосредственное изучение физики процессов, происходящих в геосистеме с учетом взаимодействия руслового и пойменного потоков при наличии изменяющегося характера подстилающей поверхности. Для чего требуется анализ натуральных и проведение экспериментальных исследования процессов.

## 1.2 Наносы, как компонент структуры речной геосистемы

Центральной частью речной геосистемы является долина, так как специфика ее строения и функционирования полностью подчиняется одному ведущему водно-эрозионному процессу. Характеризуется речная геосистема большой динамичностью, в которую входят интенсивные виды денудации, разгрузка подземных вод и русловые деформации.

Непрерывные деформации, которым подвержены речное русло и поймы под действием текучей воды называются русловым процессом, который проявляется в виде размыва русла и поймы, а также переноса и аккумуляции наносов. Направленность этого процесса определяется соотношением между расходом наносов и транспортирующей способностью

потока, в чем проявляется связь с комплексом природных условий всего водосбора [11]. Так как климатические условия и свойства подстилающей поверхности водосбора определяют объем и режим жидкого стока. Сток наносов также формируется под действием природных факторов, проявляясь в виде переотложений наносов, с которыми связаны деформации русла.

В зависимости от набора тех или иных природных условий в бассейнах рек формируются различные режимы стока воды и наносов, и, в результате взаимодействия потока и русла реки появляются некоторые типичные черты морфологического строения русла. Поэтому, знание природных условий и закономерностей взаимодействия между потоком и руслом позволяет управлять потоком, создавая различные искусственные сооружения, для хозяйственного использования реки [11].

Представление всего многообразия природных условий, строения и функционирования речной геосистемы, как целого, предполагает также системный анализ взаимного влияния отдельных компонентов и их сочетаний на ход основного процесса, которым в данном случае является сток воды и наносов. Известно, что равновесное состояние системы нарушается при несбалансированном изменении темпов протекания процессов в любом из ее звеньев. Исторически именно речные долины подвержены наибольшей антропогенизации, откуда и возникает необходимость тщательного изучения и особого подхода к данным объектам.

Сложная речная геосистема превращается в простую технологическую схему, в процессе ее урбанизации, которая проявляется в первую очередь в упрощении – спрямлении русел, потере малых притоков, распахиванию поймы и осушению болот. В итоге все естественные функции реки, и ее саморегуляцию вынужден брать на себя город, который в конечном счете разрушает способность речной геосистемы воспроизводить водные ресурсы [1].

Таким образом, появляется природно-техническая геосистема, которая представляет собой образование, пришедшее на смену природной

геосистемы, существовавшей до внедрения антропогенного фактора в естественную среду. К ней относятся: проектирование и прокладка трубопроводов, строительство мостовых переходов и водохранилищ, ЛЭП, водозаборов и водовыпусков, пристаней и причалов и различные нужды судоходства [12].

В частности при проектировании мостовых переходов, как правило, необходимо определить три составляющие глубины размыва:

- бытовой размыв, который основан на прогнозе русловых деформаций.

В широком плане нужно дать прогноз на период действия сооружения (в зависимости от его класса), при этом необходимо собрать информацию о русловых процессах как за текущий период, так и за длительный предшествующий, с целью разработки прогноза русловых деформаций;

- местный размыв основан на определении расходов донных наносов при экстремальных значениях расходов воды;

- общий размыв определяется на основе уравнения неразрывности (закон сохранения масс).

**Речные наносы**, как правило, подразделяют на два основных вида: взвешенные и донные.

Взвешенные наносы представляют собой мелкие минеральные частицы, которые поток переносит во взвешенном состоянии, и перемещает их на относительно большие расстояния.

Большая часть почвенного материала с территорий лесных массивов поступает в реки после ливней прошедших после лесных пожаров или из-за постоянной эрозии лесных дорог[13].

Измерение расходов взвешенных наносов основано на определении мутности воды, т.е. содержания массы наносов в единице объема смеси воды с наносами.

$$S = 10^6 m/V, \quad (1.2)$$

где  $S$  – мутность ( $\text{г}/\text{м}^3$ )

$m$  – масса наносов в пробе ( $\text{г}$ )

$V$  – объем пробы (мл)

$10^6$  – переводной коэффициент от мл к м<sup>3</sup>

Учет взвешенных наносов производится методом отбора проб при помощи приборов, называемых батометрами. Батометры можно подразделить на два вида: батометры мгновенного и длительного наполнения. На сети Гидрометслужбы в настоящее время в основном применяются батометры длительного наполнения, так как эти приборы в той или иной степени учитывают пульсацию мутности, затрачивая некоторое время на заполнение в каждой точке отбора проб.

Батометры длительного заполнения можно подразделить на 2 вида: батометр-бутылка на штанге или с грузом и вакуумный батометр. Также следует отметить, что в последнее время интенсивно развивается фотометрический метод определения мутности.

**Донные наносы** – это преимущественно наиболее крупные частицы, которые перемещаются вниз по течению реки. Как правило, это песок и гравий, а также, в случае высокой пропускной способности, в частности на горных реках, поток может переносить даже булыжники и валуны.

В таблице 1.1 представлены сведения о содержании донной составляющей в процентах от общего числа переносимых рекой наносов [14]. Отдельные частицы, например, песка, могут перемещаться вдоль русла реки в виде сальтации. В результате многочисленных соударений в процессе перемещения они приобретают окатанную форму и формируют русла и поймы рек, дно озер и водохранилищ.

Виды перемещения донных наносов можно разделить на три основных типа: перекачивание частиц (качение и влечение), сальтация (скачки) и донные гряды.

Однако, существует некоторое несоответствие в терминологии этих видов, например, без особых пояснений употребляются термины «влекомые» и «донные» наносы. Н.Б. Барышников [15] предложил к «влекомым» наносам относить те, которые перемещаются качением, влечением и сальтацией, а

«донные» наносы, соответственно включали бы в себя все типы перемещения наносов, в том числе и донные гряды. Такое деление является условным, так как при изменении гидравлических характеристик потока может изменяться и режим перемещения наносов.

Анализ данных натуральных исследований, представленных в таблице 1.1, позволил сделать вывод о том, что на равнинных реках доля донных наносов в общем их стоке незначительна, и составляет 1-10%. В то же время на горных реках эта доля может достигать 50-70% от общего стока наносов.

Для количественной оценки стока наносов необходимы данные об их гранулометрическом составе. Эти сведения используются при установлении зависимости расхода наносов от гидравлических характеристик потока, что чрезвычайно затруднено, ввиду отсутствия достоверных данных наблюдений, да и самой методики измерений [16].

Таблица 1.1 – Сведения о содержании донных наносов в общем расходе наносов, в %

Реки	Отношение	Автор
Горные	от 15 до 23	С.Т. Алтунин
Предгорные	от 5 до 15	
Равнинные	от 1 до 3	
Горные	от 10 до 20	Г.В. Лопатин
Равнинные	от 5 до 10	
р.Терек (горная)	50	А.А. Троицкий
Горно-предгорные	от 2 до 40	В.Н. Шолохов
Северного склона Заилийского Алатау	от 7 до 40	Н.П. Павленко
Киргизии (горные)	от 40 до 70	В.Ф. Галмаза А.Н. Крошкин
Альп (горные)	от 67 до 70	А. Шоклич
р.Инн	31	Л. Мюльгофер
р.Колорадо	20	С. Фортъе
Волга, Дон	от 1.0 до 2.5	Б.В. Поляков Б.А. Апполонов

Источниками материала, поступающего в водотоки, являются: 1) эрозия почв – т.е. непосредственное воздействие потока на подстилающую

поверхность, которая в свою очередь начинает размываться и 2) овраги, осыпи, и пр. – т.е. поступление твердых частиц из бассейнов рек и со склонов под действием гравитационных процессов.

В некоторых случаях, в горных районах с повышенной селевой активностью поступление наносов со склонов может играть определяющую роль в формировании стока наносов, в основном же их доля в общем стоке наносов невелика [17]. Например, на среднем Днестре со склонов долины в русло в результате осыпей и других склоновых процессов по данным А.М. Калинина в среднем поступает 375 тыс. тонн грунтов в год [18] при годовом стоке наносов в реке более 6 млн. тонн [19]. На р. Янцзы, при пересечении рекой горного массива (г.п.Лошань), наблюдается увеличение стока влекомых наносов по сравнению с естественными условиями [20].

Количество наносов может существенно изменяться в зависимости от влияния климатических условий, природных явлений, а также антропогенного воздействия. Даже в пределах одного водосбора количество транспортируемых потоком наносов может существенно отличаться как в пространстве, так и во времени (например, в зависимости от времени года). Изменения в количестве транспортируемых наносов может быть вызвано как естественными причинами, так и под действием антропогенного фактора [21]. К независимым от изменения климата антропогенным воздействиям относят в первую очередь вырубку лесов и мелиорацию, а также различного рода сельскохозяйственную деятельность.

Гидротехнические сооружения, несомненно, оказывают значительное влияние на транспорт наносов русловым потоком, особенно там, где река впадает в различные водоемы: озера, водохранилища и др. Это является основной причиной уменьшения объема наносов, достигающего устья рек ниже по течению. Одной из причин того, что резервуары водохранилищ имеют проблемы с заилением (т.е. со временем теряют свой полезный объем) является то, что скорость движения воды начинает уменьшаться, при резком увеличении площади водной поверхности, а силы, которые удерживают

отложения, начинают ослабевать. При условиях, когда расход наносов больше транспортирующей способности потока более крупные частицы, перемещающиеся качением, влечением или сальтацией, перестают двигаться, а мелкие частицы, которые в потоке перемещаются во взвешенном состоянии, начинают оседать, так как скорости потока продолжают уменьшаться. В нижний бьеф водохранилища, в свою очередь, поступает так называемая «осветленная вода», которая вымывает частицы грунта, чтобы вновь насытить поток наносами.

**Транспортирующая способность** – это термин, который используется для характеристики предельно возможного транспорта наносов при конкретных гидравлических характеристиках потока и морфометрических характеристиках русла. Когда транспортирующая способность уменьшается из-за изменения энергии потока, наносы откладываются на дне русла. Наносы оседают в любой части русла реки, формируя, таким образом, чередующиеся плесы и перекаты. Когда сток с крутых дренажных склонов входит в большой поток, наносы оседают в месте слияния потоков, принимая форму аллювиального конуса выноса. У извилистых рек наибольшее накопление наносов происходит на точечных барах на внутренней стороне изгиба, где импульс уменьшается. На внешнем изгибе, более высокий импульс приводит к усилению эрозии и обрушениям берегов.

Количество наносов, которое река переносит в данных конкретных условиях, называется расходом наносов. В речных потоках расход наносов меньше или равен их транспортирующей способности.

Методика измерения расхода донных наносов основана на использовании донных батометров, в частности батометр «Дон», и определении элементарного расхода на отдельных скоростных вертикалях, т.е. определения количества наносов, перемещающихся через единицу ширины русла в единицу времени.

$$P_d = m/(l \cdot t), \quad (1.3)$$

где  $P_d$  – расход донных наносов

$m$  – средняя масса наносов на вертикали (кг)

$l$  – объем пробы (мл)

$t$  – продолжительность выдержки батометра на дне реки (с)

К сожалению, все батометры, основанные на принципе механического улавливания донных наносов, имеют большую погрешность, составляющую 25-40%. К причинам такой низкой точности можно отнести следующие:

для полного захвата всех влекомых наносов по фронту прибора батометр должен быть установлен плотно на дно. Но вследствие неровностей дна, часть наносов проходит под батометром. В случае же сильного заглобления, в прибор попадают и частицы неподвижного основания;

мимо входного отверстия прибора проходят наносы, которые движутся отдельными скачкообразными импульсами;

массивная конструкция прибора искажает поле скоростей и, соответственно, расход наносов;

поле придонных скоростей и турбулентность по ширине потока могут существенно меняться, из чего следует резко неравномерное перемещение наносов по ширине потока;

входное отверстие батометра может быть погружено в гребень донной гряды, что также искажает фактическое значение донных наносов.

Для случая перемещения наносов в форме донных гряд применяется метод эхолотирования, с помощью которого можно определить различные характеристики этих гряд (таких как высота, крутизна, длина и т.д.), а последующее повторение измерений через заданный отрезок времени позволяет также определить величину расхода донных наносов.

В настоящее время только за расходами взвешенных наносов производятся систематические наблюдения, в т.ч. и на сети Росгидромета, а измерения расходов донных наносов были прекращены еще в середине прошлого столетия, из-за отсутствия надежных приборов необходимых для их измерения и несовершенных методов количественной оценки, погрешности по которым превышали допустимые пределы.

Благодаря использованию стационарных измерительно-наблюдательных сетей, возможным стало получить гидрологические и метеорологические данные. Гидрологические материалы содержат сведения о прошлом и настоящем состоянии рек, данные о которых собираются с опорных гидрометеорологических станций. Также отработан автоматический сбор и хранение больших объемов данных от срочных до многолетних при Всероссийском научно-исследовательском институте гидрометеорологической информации – Мирового центра данных (ВНИИГМИ-МЦД) в Обнинске, а также в Государственном гидрологическом институте (ГГИ) в Санкт-Петербурге. Для реализации этих целей производится сбор сведений со всех водомерных постов, которые до конца 80-х годов публиковались в виде отдельных изданий.

### 1.3 Методы учета стока донных наносов и оценка эффективности расчетных формул

Данные о стоке донных наносов являются востребованными при проектировании и строительстве различных гидротехнических сооружений, что привело к необходимости разработки расчетной формулы, которая бы позволила количественно оценить данную величину. Более 200 формул известно для расчетов транспортирующей способности потока, большинство из которых основано на данных лабораторных исследований, проводимых, как правило, в узких лотках, что привело в свою очередь к ограниченному диапазону применения этих формул [22].

Три подхода стали основными при разработке методики расчетов транспортирующей способности потока:

- динамический – изучающий силы, действующие на частицу, находящуюся на дне потока. Первым исследователем этого подхода был французский ученый Дюбуа, позже этим направлением стали заниматься и отечественные исследователи: В.Н. Гончаров [23], Г.И. Шамов [24] и др.

- статистический – изучающий вероятность, с которой срывается донная частица и начинает перемещение. Исследователями этого подхода стали Г.А. Эйнштейн [25], М.А. Великанов [26] и др.

- метод анализа размерностей – это подход фактически является вспомогательным, и, как правило, используется для анализа и систематизации экспериментальных данных. Этот метод разрабатывал И.В. Егиазаров.

Все эти формулы Н.Б. Барышников [15] предложил условно подразделить на 4 основных группы:

- формулы, в которых в роли основного определяющего параметра стала скорость потока. Как примеры формул этой группы ниже представлены формулы, основанные как на лабораторных (1.4, 1.5, 1.6), так и на натуральных данных (1.7):

$$\text{В.Н. Гончарова} \quad g_s = 1,2(1+\varphi)v_k d (v/v_k)^{4,33} \quad ; \quad (1.4)$$

$$\text{И.И. Леви} \quad g_s = 0,002(v/\sqrt{gd})^3 (v-v_k)(d/h)^{0,25} \quad ; \quad (1.5)$$

$$\text{К.В. Гришанина} \quad g_s = 0,015(v/v_k)^3 k (v-v_k) \quad ; \quad (1.6)$$

$$\text{Г.И. Шамова} \quad g_s = 0,95\sqrt{d}v^3/v_k^3 (v-v_k)(d/h)^{0,25} \quad , \quad (1.7)$$

где

$g_s$  – расход влекомых наносов на единицу ширины потока,  $\text{м}^3/(\text{м}\cdot\text{с})$

или  $\text{кг}/(\text{м}\cdot\text{с})$ ;

$v, v_k$  – средняя и критическая скорости руслового потока,  $\text{м}/\text{с}$ ;

$d$  – средняя крупность,  $\text{м}$ ;

$\varphi$  – параметр турбулентности;

$g$  – ускорение свободного падения,  $\text{м}/\text{с}^2$ ;

$h$  – глубина потока,  $\text{м}$ ;

$k$  – размерный коэффициент (для песков  $k=0,95 \text{ кг}/\text{м}^2$ );

- ко второй группе отнесены формулы, в которых в качестве основного расчетного параметра принята «влекущая сила потока»  $\tau = \rho ghI$ . В России эти формулы не получили широко применения, но продолжают довольно часто

использоваться в ряде зарубежных стран. В качестве примера ниже представлена формула (1.8)

$$\text{И.В. Егiazарова} \quad g_{\text{в}} = \alpha \rho_1 g \sqrt{I} \left( \frac{\tau - \tau_0}{\tau_0} \right), \quad (1.8)$$

где

$g_{\text{в}}$  – расход влекомых наносов на единицу ширины потока;

$\alpha$  – постоянная;

$\rho_1$  – плотность наносов;

$I$  – уклон водной поверхности;

$\tau_0$  – влекущая сила потока, при которой начинается перемещение наносов.

- к третьей группе были отнесены формулы, основанные на связи расходов наносов непосредственно с расходами воды и уклонами водной поверхности. Формулы этой группы нашли широкое применение в Западной Европе, в качестве примера ниже представлены наиболее распространенные из них (1.9, 1.10)

$$\text{А. Шоклича} \quad g_{\text{в}} = \frac{\alpha}{\sqrt{k}} I^{3/2} (q - q_0); \quad (1.9)$$

$$\text{Мейер – Петера} \quad g_{\text{в}} = \alpha_1 I^{3/2} (q^{3/2} - bk/I), \quad (1.10)$$

где

$\alpha$ ,  $\alpha_1$  и  $b$  – числовые параметры;

$q$  и  $q_0$  – расходы воды на единицу ширины потока и при начале движения наносов;

- для формул четвертой группы определение расхода наносов осуществляется на основе статистического анализа движения отдельных частиц. Основы этой методики заложены Г.А. Эйнштейном [24] в середине прошлого века. В России разработки этого направления осуществлялись М.А. Великановым [25]. В качестве примера приведены формулы (1.11) и (1.12), в которых учитываются наносы, перемещающиеся не только сальтацией, но и влечением по дну потока.

$$\text{Доу Го Женья} \quad g_B = 0,048k(v-v_K) \frac{\omega v^2}{v_K v_K} \quad ; \quad (1.11)$$

$$\text{К.И. Россинского} \quad g_B = \beta \rho_1 k (\alpha_1 v_B + \alpha_2 v_C) \quad , \quad (1.12)$$

где

$\alpha_1, \alpha_2$  – коэффициенты, характеризующие сплошность движения частиц;

$v_B, v_C$  – скорости движения частиц, перемещающихся влечением и сальтацией.

Следует отметить, что, как правило, все расчетные формулы разработаны на основе лабораторных данных, полученных в узких лотках, где существенное влияние оказывает, так называемый, эффект пространственности, который приводит к тому, что при тех же средних скоростях потока увеличиваются их донные составляющие, а, следовательно, возрастает и транспортирующая способность потока. Так, например, В.Н. Гончаров [23], в разработанную им формулу на основе анализа экспериментальных данных, ввел понижающий коэффициент, равный 1,76, учитывающие трансформацию эпюры скоростей, на которую оказывает влияние эффект пространственности.

Особо следует отметить, что ни одна из перечисленных формул не учитывает эффект взаимодействия руслового и пойменного потоков, который существенно трансформирует поле скоростей взаимодействующих потоков, что особенно четко прослеживается при анализе полей скоростей руслового потока. Значительно изменяется и средняя скорость руслового потока.

Сотрудники ГГИ под руководством З.Д. Копалиани [27] на основе натурной информации по р. Полометь, некоторым рекам Северного Кавказа, а также данных экспериментальных измерений в лотках, провели глубокий анализ методов и формул для расчета расходов донных наносов.

Исходная информация была подразделена на пять серий, в зависимости от методики ее получения:

I серия – структурный транспорт донных наносов

II серия – бесструктурный транспорт донных наносов

III серия – малая равнинная р. Полометь

IV серия – предгорная р. Лаба

V серия – экспериментальные данные в лотках с крупными наносами

В итоге все формулы были разделены на 9 групп в зависимости от их определяющего аргумента, в качестве которого были приняты:

касательные напряжения,

расход воды,

скорость потока,

уклон водной поверхности,

мощность потока,

вероятностное описание движения донных наносов,

выведенные на основе регрессионных зависимостей, учитывающие движение крупных наносов в структурной форме,

основанные на регрессионных зависимостях, полученных для однотипных рек или групп рек одного региона, или для конкретных рек, использующих один аргумент – расход воды или скорость потока.

Расчеты транспортирующей способности потока были проведены по группам формул для каждой серии исходных данных, состоящих из натурной информации и данных лабораторных экспериментов [28]. После этого, был рекомендован ряд формул, результаты расчетов по которым оказались в наилучшем совпадении с натурной информацией.

Результаты исследований условно были подразделены на две группы в зависимости от формы перемещения наносов (структурная и бесструктурная), и сделаны следующие выводы.

**Для структурной формы**, т.е. для условий грядового режима перемещения наносов, рекомендованы формулы следующих авторов: Снисченко-Копалиани (формула ГГИ), Ю.М Корчохи, А.Ф. Кудряшова, К.В. Гришанина.

$$\text{Формула Снисченко-Копалиани } g_s=0,011h_r v F r^3, \quad (1.13)$$

где  $h_r=0,25h$ ,  $h<1$ ;

$h_r=0,2+0,1h$ ,  $h>1$  (по Б.Ф. Сниценко);

$h_r=0,39d(v/v_0)^{0,25}Fr^{-3,75}$  (по З.Д. Копалиани),

где

$g_s$  – расход наносов на единицу ширины потока,  $m^3/(m \cdot c)$ ;

$h$  – глубина потока, м;

$h_r$  – высота донных гряд, м;

$v$ ,  $v_0$  – средняя скорость руслового потока и начальная скорость движения частиц, м/с;

$d$  – средняя крупность, м;

$Fr$  – число Фруда.

Формула (1.13) получена для условий динамического состояния гряд установившегося профиля, и приемлемые результаты по ней могут быть получены для всего диапазона высоких концентраций донных наносов (рис. 1.7) [27].

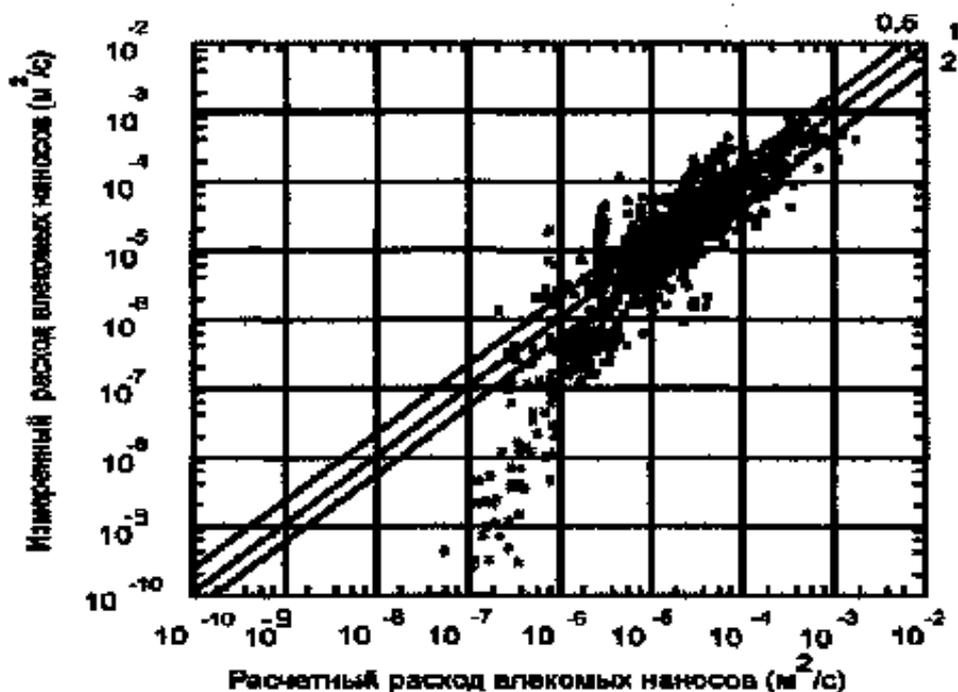


Рисунок 1.7 - Результаты сравнения значений измеренных расходов донных наносов и определенных по формуле ГГИ

Из графика (1.7) видно, что удовлетворительные результаты получены при значении расходов донных наносов на единицу ширины потока приблизительно равных и больших  $10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с. При меньших расходах донных наносов наблюдается значительное отклонение расчетных величин от измеренных.

К сожалению, отсутствуют критерии надежности оценки данной формулы. Основой для сравнения формул в рамках данного типа послужил массив данных, собранных отделом русловых процессов ГГИ в течение многих лет в рамках экспедиций на большие, малые и средние реки СССР [29, 30], а также данные японских авторов по р. Хии [31]. Массив состоит из данных 200 измерений. Все результаты получены методом повторного продольного эхолотирования речного русла. При этом данные измерений высоты и скорости перемещения гряд представляют собой не осредненные характеристики на участке эхолотирования, а данные по конкретным грядам установившегося профиля, геометрические (высота, длина) и динамические (скорость перемещения) характеристики которых в процессе производства измерений остаются постоянными. Гидравлические и морфометрические характеристики результатов измерений приведены в таблице 1.2.

Из таблицы следует, что режим равнинных рек спокойный (число Фруда значительно меньше единицы), крупность наносов на малых реках больше, гряды на малых реках движутся значительно быстрее, гладкость потока велика [29].

Аналогичные зависимости были получены для условий бесструктурной формы перемещения наносов, т.е. при их перемещении методом качения, влечения или сальтации.

Были апробированы 17 формул различных авторов на основе данных по равнинным и полугорным рекам, а также данных, полученных в лабораторных условиях (рис. 1.8).

Таблица 1.2. Диапазон изменения гидравлических характеристик потока и песчаных гряд в использованных натуральных исследованиях

Характеристика	Диапазон изменения			
	Большие реки (105 измерений)		Малые и средние реки (95 измерений)	
	min	max	min	max
Глубина потока $H$ , м	2,90	13,7	0,20	5,40
Скорость потока $V$ м/с	0,72	2,10	0,45	1,76
Крупность донных отложений $d$ , мм	0,30	2,90	0,26	7,50
Уклон водной поверхности $I$	0,000069	0,000195	0,000270	0,001660
Высота гряд $h_r$ , м	0,31	1,75	0,0145	1,00
Длина гряд $l_r$ , м	15,0	120	0,79	21,0
Скорость перемещения гряд $C_r$ , м/сут	0,96	55,0	12,0	146
Число Фруда $F_r$	0,09	0,19	0,13	0,50
$H/d$	3897	38571	144	8269
$h_r/H$	0,07	0,20	0,07	0,54
$h_r/d$	328	4861	10,1	3704

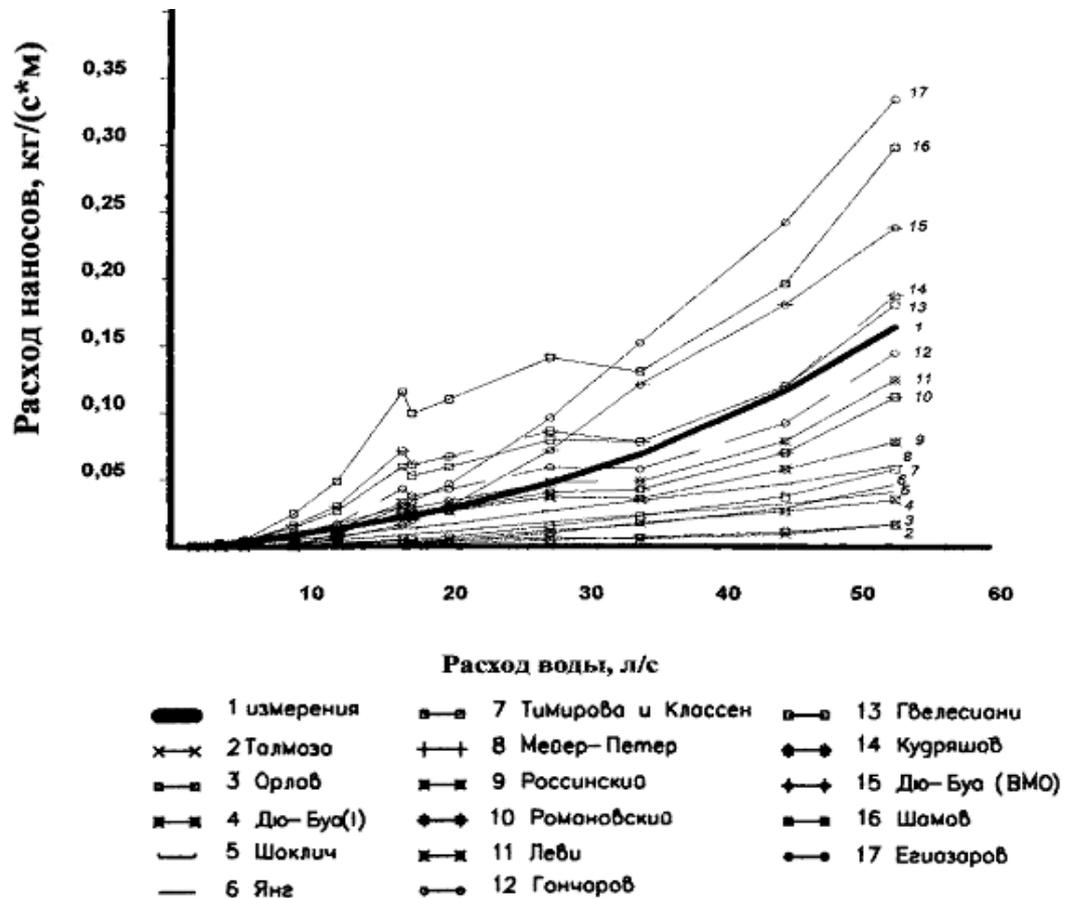


Рисунок 1.8 - Зависимость  $G=f(Q)$  для бесструктурной формы перемещения наносов, полученная по данным расчетов по 17 формулам и на основе экспериментальных измерений

Как видно на рисунке 1.8, для бесструктурной формы перемещения наносов наилучшее совпадение расчетных данных с результатами измерений получены по формулам следующих авторов: Л.Г. Гвелисиани (1.14), И.И. Леви (1.5), В.Н. Гончарова (1.4), Г.И. Шамова (1.7) и К.В. Гришанина (1.6).

$$\text{Л.Г. Гвелисиани } g_s = 12,95 \frac{dv_c}{\left(\lg \frac{12d_{max}+d}{d}\right)^2} \left(\frac{v^3}{v_c^3} - 1\right) \left(\frac{v}{v_c} - 1\right), \quad (1.14)$$

$$\text{где } v_c = 3,4 \frac{\lg\left(\frac{8,8h}{d}\right)}{\lg\left(\frac{12d_{max}+d}{d}\right)} \sqrt{d}$$

$d_{max}$  – максимальная крупность перемещаемых частиц, м;

$v_c$  – критическая скорость руслового потока, при которой донные наносы перестают перемещаться, м/с;

На фоне значительного количества формул, разработанных для расчета транспортирующей способности потока, было опубликовано большое количество работ, их критикующих. К ряду таких публикаций относятся, например, работы М.Е. Аскуравы и др. [32], в которых утверждается, что формулы для расчета расходов донных наносов, рекомендуемые в «Руководстве по гидрологическим расчетам...», а также популярная во всем мире формула П.Е. Мейер-Петера не подходят для условий горных рек, так как они дают транспортирующую способность потока. Однако, в горных условиях поток ее почти никогда не достигает, за исключением расходов редкой повторяемости, когда происходит срыв самоотмостки. Сравнительный анализ расчетов по рекомендуемым формулам с данными натурных измерений расходов донных наносов горных рек Кавказа и Средней Азии [33] показал, что рассчитанный по формулам расход завышен на один – два порядка.

Во многих расчетных зависимостях для определения расходов донных наносов присутствует такой параметр, как критическая скорость, который также определяется по формулам. Результаты расчетов по этим формулам значительно отличаются друг от друга. При сравнении расчетных значений с натурными данными часто используются некачественные, случайные данные, без надлежащего анализа формы перемещения донных наносов (структурная, бесструктурная) и фаз водности реки (паводок, межень). Нередко формулы, которые рекомендованы для песчаных грунтов, используются и для крупных наносов, и наоборот. А формулы, предложенные исключительно для донных наносов, применяются для расчета общего расхода наносов.

К сожалению, практически невозможно количественно оценить эти формулы из-за отсутствия надежных данных натуральных измерений. Осложняет эту задачу еще и невозможность полного переноса результатов лабораторных экспериментов на натурные условия. К сожалению, по мнению авторов [34], формулы для расчета донных наносов можно использовать только для ограниченного диапазона размеров частиц, и расходов воды, при которых эти формулы были выведены. В случае, если величину транспорта наносов нужно прогнозировать, то это представляется возможным только для коротких участков русла прямоугольной формы с однонаправленным течением [34]. Несмотря на то, что для расчета транспортирующей способности потока предложено достаточно много формул, до сих пор не было получено четкой зависимости, которая бы однозначно описывала процесс срыва и транспортирования крупных фракций наносов в придонном слое.

В работе Н.С. Знаменской [35] было показано, что сама структура формул приводит к результатам, различающимся на порядок и более. Как далее отмечает автор [35], если возникает необходимость использовать эти формулы при других условиях, то расхождение с натурными данными возрастает настолько, что приводит к появлению новых формул, с которыми

происходило то же самое. Автор [35] считает, что проблема расчета расхода донных наносов является одной из важнейших на протяжении уже многих лет. Однако, эта проблема нуждается в новых подходах к ее решению, как и проблема гидравлических сопротивлений. В качестве нового подхода, представляется возможным расчет расхода донных наносов не по параметрам русла и потока, а с учетом поступления частиц грунта со всего водосбора реки, т.е. на более высоком системном уровне.

Ниже представлен **перечень основных причин**, которые объясняют неудовлетворительное состояние методов расчета расходов донных наносов в реках.

**Несогласованность терминологии.** Исследователи [28 и др.] в качестве определения «донные наносы» принимают разные понятия. Некоторые из них под донными понимают только влекомые наносы, т.е. перемещающиеся перекатыванием или скольжением, находящиеся в постоянном контакте с дном. Другие ученые в это понятие включают и наносы, перемещающиеся сальтацией. При этом высота прыжка частицы оказывается неопределенной (размытой), составляя от двух до десяти и более диаметров влекомых наносов. Существует и другая типизация, в которой формы перемещения донных наносов подразделяются на структурную и бесструктурную [28]. Причем к структурной форме относятся наносы, перемещающиеся в форме донных гряд, а к бесструктурной – в форме влечения, качения и сальтации.

**Отсутствие однозначных количественных зависимостей** для разграничения влекомых, сальтирующих и взвешенных наносов.

Так как реки одновременно переносят наносы разных размеров, необходимо учитывать, какую роль играет каждая из фракций в формировании морфологии русла и поймы, процессе руслообразования и общем стоке наносов. Вопрос о формах перемещения наносов в процессе транспорта (донное влечение, качение, сальтация) приобретает особую

значимость при решении практических задач руслового процесса и транспорта наносов в реках.

*Низкая точность зависимостей*, используемых для расчета критических скоростей сдвига и срыва донных частиц

Большинство расчетных зависимостей для определения расхода донных наносов включают в себя в том или ином виде характеристику критических условий сдвига частиц, однако, рекомендованные разными исследователями формулы для определения этой величины дают значительно отличающиеся друг от друга результаты.

Момент начала движения донных частиц в руслах, сложенных крупными наносами, имеет принципиальное значение для определения расхода донных наносов, как в сезонном распределении стока, так и в многолетнем разрезе. Однако, его точное определение представляет особую сложность, связанную с тем, что активный транспорт донных наносов на таких реках бывает не каждый год.

Так же необходимо отметить, что результаты расчетов, полученные по большому количеству формул для определения начальной скорости движения донных наносов, имеют существенные расхождения между собой.

В качестве основных причин этих расхождений принято считать неоднозначное понимание различными исследователями терминов «начальная» и «предельная» скорости потока. Имеется в виду различное состояние подвижности частиц на дне, соответствующее скорости потока, когда основная масса частиц еще не пришла в движение, передвигаются отдельные частицы или группы частиц.

В большинстве экспериментальных исследований присутствовал эффект пространственности, возникавший в случае, когда отношение ширины к глубине потока было меньше 10 [23], что приводило к трансформации эпюр скоростей потока, когда донные скорости увеличивались, а средние оставались такими же. Отсюда возникали существенные погрешности при установлении соответствующих формул для

так называемых неразмывающих скоростей – предельных скоростей начала движения донных частиц.

Расчетные формулы для неразмывающих скоростей потока были получены, как правило, на основе данных лабораторных исследований. Учитывая, что современное техническое состояние средств измерений не позволяет с достаточной точностью вести наблюдения и фиксировать точный момент начала движения частиц на дне потока, это приводит к существенным различиям результатов расчетов по формулам.

В экспериментальных работах различных авторов, были использованы грунты разного фракционного состава: однородные и неоднородные в той или иной степени, что также создает трудности при обобщении экспериментальных данных.

***Низкая точность и ограниченность данных натурных измерений.*** Особенно на горных реках при высоких расходах воды.

Все натурные измерения по количественной оценке расходов и стока донных наносов можно подразделить на четыре группы основных традиционных способов:

с помощью батометров различных конструкций,  
объемным методом,  
определением объема отложений наносов в водохранилищах и отстойниках руслоперегораживающих сооружений,  
по определению скоростей перемещения русловых микро- и мезоформ методом эхолотирования и повторных съемок рельефа дна реки.

Для случаев использования батометров, в т.ч. и батометров сетчатого типа, возникают трудности, связанные с искусственным возмущением потока в придонной области, которое приводит к искажению естественного процесса транспорта донных наносов. Поэтому для тарировки батометров предварительно рассчитывают коэффициент, учитывающий количество поступающих в батометр наносов, что несколько сближает результаты измерений с фактическим расходом донных наносов. К сожалению, этот

коэффициент не является постоянным для всего диапазона наполнения русла, изменения скорости потока и интенсивности транспорта донных наносов. Также следует отметить, что однозначная связь расходов донных наносов с гидравлическими характеристиками потока при руслоформирующем расходе воды, равном транспортирующей способности потока и уклону дна динамического равновесия, наблюдается только при условиях срыва самоотмостки и интенсивного движения наносов. Для других условий, когда расходы воды меньше руслоформирующего, при тех же гидравлических характеристиках потока, расход донных наносов может существенно различаться, в зависимости от условий поступления на данный участок различных грунтов и наносов из бассейна реки, сформированных при условиях более высоких руслоформирующих расходов воды.

Необходимо отметить и некоторые причины неудовлетворительного состояния методов расчета расходов донных наносов: невозможность в полном объеме учитывать пульсационный режим транспорта наносов, гранулометрический состав, тип руслового процесса, гидрологический режим реки (фазы водности, тип движения). И возникновение некорректности при сравнении различных формул, рекомендуемых для расчета расхода песчаных или крупных наносов, только для донных наносов или для суммарного стока наносов.

Отмеченные недостатки свидетельствуют о несовершенстве теоретических моделей, взятых за основу при разработке расчетных методов, стремящихся, как правило, к универсальным схемам количественной оценки транспорта донных наносов.

### 1.3 Поймы и их основные характеристики

Наносы в русле, перемещающиеся вниз по течению в виде песчаных или галечных гряд, пересекают реку не по нормали к ее оси, а в виде языка, который располагается вдоль того берега, где во время половодья находится

стрежень потока с самыми большими скоростями течения. В этом же месте находится и побочень – самая высокая часть гряды, которую еще называют прирусловой отмелью, в периоды межени она находится над водой [36].

При зарастании в маловодные годы высоких частей побочней начинает формироваться пойма [37]. За несколько следующих подряд маловодных лет высокие побочни или осередки не покрываются водой, и закрепляются растительностью, как правило, в умеренных широтах, это ивовые кусты, которые поток не может смыть в следующее высокое половодье. Те участки побочней, которые не закреплены растительностью, продолжают смещаться вниз по течению, оставляя позади заросшие участки по берегам или посередине русла. В связи с тем, что количество и крупность наносов, которые переносит русловой поток, зависит от скорости потока, а растения своими ветками замедляют скорости, то начинается осаждение взвешенных частиц, которые покрывают песчаную или галечную поверхность бывших побочней, образуя тем самым слой пойменного наилка [38].

Процесс переформирования пригребневых частей побочней в пойменные террасы завершается развитием пойменных почв и распространением травянистых растений различных видов.

**Пойма** – это затопляемая в периоды высокой водности часть дна речной долины, сформированная в результате отложения переносимых потоком наносов в ходе плановых деформаций речного русла. Пойма оказывает существенное влияние на весь ход руслового процесса, принимая участие в пропуске расхода воды и наносов [37].

Для равнинных рек, имеющих сезонные изменения горизонтов воды, принято различать два уровня поймы:

**нижняя пойма** – полоса прибрежных песков, слабо закрепленных растительностью, постепенно переходящая в подводные мели и составляющая с ними единое целое при подъеме уровней воды;

**высокая пойма** – покрытая лугами или кустарником территория, слабо наклоненная в сторону общего падения долины, обычно изрезанная гривами и ложбинами.

Высокая и нижняя поймы разделены **яром** – уступом берега, который имеет невысокий обрывистый, как правило, вогнутый характер, размываемый в период средних и высоких вод. Яр имеет два плеча: верхнее и нижнее, определяющие его размеры, так как они совпадают с началом и концом его размыва, а также с устойчивыми большими глубинами, по которым, как правило, прокладывают судовой ход.

Н.И. Маккавеев и В.С. Советов [39] подразделяют высокую пойму на две основные формы:

*двусторонняя пойма* имеет место в случае, когда русло реки проходит по широкой пойме, отклоняясь то к правому, то к левому коренному берегу, образуя излучины и рукава.

*односторонняя пойма* имеет место в случае, когда русло прижато к высокому коренному берегу, а вдоль противоположного берега простирается широкая полоса поймы.

А.И. Чеботарев [36] добавляет к ним также *чередующиеся поймы*, т.е. попеременно расположенные то справа, то слева от потока. М.А. Великанов [26] считал пойму разновидностью одного из шести выделенных им типов русловых образований равнинных рек, которым соответствуют и особые типы гидравлической структуры потока.

Так как пойма является постоянным аккумулятором и источником твердого материала, т.е. играет важную роль в транспорте наносов, ей отводят особое положение среди многих геоморфологических элементов, составляющих речную долину. А. В. Чернов отмечает, что во время половодья пойма представляет собой дно потока, и поэтому непосредственно влияет на значения руслоформирующих расходов воды и пропускную способность русла [37].

Как и у всех речных террас, у поймы есть обрыв высотой до нескольких метров, также часто имеется береговой вал, отделяющий равнинную поверхность с промоинами и старицами, упирающуюся в свою очередь в заболоченное притеррасное понижение, так называемый тыловой шов или задняя закраина. Такое подразделение поймы по ширине с закономерным понижением к ее краям соблюдается не всегда. Наряду с такими широко распространенными поймами (как у р. Обь, нижней части р. Амур и нижней Волги), также имеются поймы с повышением отметок в сторону от реки к коренным берегам. Первый вид поперечного сечения поймы – с понижением от русла – обычно встречается на аккумулярующих реках, второй – с повышением отметок от русла к коренным берегам – на врезающихся реках.

*Морфологические особенности строения пойм* имеют определяющий характер воздействия на гидравлику пойменных потоков. К сожалению, в большинстве трудов, посвященных исследованиям морфологии пойм, не приводятся описания их количественных характеристик, несмотря на острую необходимость в показателях и расчетных зависимостях, позволяющих их получать, при проектировании гидротехнических и водохозяйственных сооружений. Как показал анализ системы уравнений гидродинамики, описывающих движение потока, практически в каждом параметре этих уравнений в неявном виде отражены особенности морфологии, притом не только конкретного расчетного створа, но и всего участка целиком [40].

В многочисленных работах [21, 23, 41 и др.], были выявлены надежные зависимости между гидравлическими и морфометрическими характеристиками русел, которые, были рекомендованы впоследствии для инженерных расчетов. В частности, В.И. Антроповский [41] выполнил детальный анализ этих зависимостей и установил, что значения «постоянных» в них зависят от различных типов руслового процесса. В то время как с поймами наблюдается обратная ситуация. Сложно получить однозначную зависимость между глубиной затопления пойм и их

морфометрическими характеристиками, во-первых, потому, что большинство пойм – это сложные, часто ступенчатые структуры, состоящие из разновысотных массивов, резко изменяющих свои характеристики не только по длине и ширине, но и по высоте при уровнях затопления последующей «ступеньки» массива. Во-вторых, к причинам, из-за которых становится невозможным однозначно сопоставить гидравлические и морфометрические характеристики пойм, также можно отнести и низкую точность исходной информации, обусловленную сложностью изучения пойм в естественных условиях, и значительное отличие размеров пойм от размеров русел. Нерешенным также остается вопрос о морфометрических характеристиках пойм, определяющих гидравлику потоков в период пропуска паводков по затопленным поймам, которые отражали бы особенности строения пойм не только для расчетного створа или участка небольшой протяженности, но и для реки в целом. Так как изменение морфометрических характеристик тесно связано с типом руслового процесса и типом поймы, встает проблема их научно обоснованного выбора. Недостаточно изучена методика определения длины участка такого осреднения при различных уровнях. Следовательно, необходимо рассматривать отдельные структурные образования – «пойменные массивы». И.В. Попов [36] ввел этот термин и отметил, что он аналогичен понятию «макроформа речного русла», которое было положено в основу типизации русловых процессов. Автор [36] называет пойменным массивом участок поймы, который ограничен с одной стороны руслом реки, а с другой – склоном долины. В его пределах наблюдаются определенные закономерности, а также наличие замкнутого гидравлического цикла. Также, отмечает автор, пойменный поток разобщен руслом, которое пересекает дно долины [36].

В качестве плановых морфометрических характеристик Попов предлагает следующие [36]: для пойменных массивов определяются длина реки на участке массива, его площадь, шаг и средняя ширина. Полученные

плановые характеристики были проанализированы на основе исходных данных двумя способами:

по данным сетевых наблюдений системы Росгидромета – определение ширин пойм и русел по многочисленным измерениям, обобщенным и представленным в виде поперечных профилей по гидростворам (с учетом данных имеющихся съемок участков длиной около пяти ширин реки в районе гидроствора);

на основе карт – определение изменения величины принятых расчетных параметров русел и пойм по длине реки в зависимости от типа руслового процесса и вида пойм.

Первый способ является наиболее точным, к тому же по гидростворам имеются данные об уровнях воды различной обеспеченности. Однако, по этим данным невозможно определить русловые и пойменные образования, также для этого требуется наличие карты-схемы с обозначением на ней типов русловых процессов.

К сожалению, приведенные характеристики отражают морфологию русел и пойм только на участках ограниченной длины, что не может полностью удовлетворять требованиям гидравлических расчетов.

Гидравлика потоков в руслах с поймами по данным РГГМУ [42] при различных глубинах затопления пойм определяется именно их морфологией на участках большой протяженности. Так, например, участок между двумя резкими сужениями поймы, может изменяться от километра до нескольких десятков километров, в зависимости от размера реки. В роли параметра, который охарактеризовал бы эти изменения, был выбран угол  $\alpha$  между геометрическими осями русла и поймы, на участке, расположенном ниже расчетного створа.

Изменения этих углов по длине рек в естественных условиях наиболее точно можно проследить по данным дистанционного зондирования, чего, к сожалению, невозможно добиться при использовании карт, из-за некоторого сглаживающего эффекта.

К сожалению, угол  $\alpha$  в неполной мере отражает влияние морфологических характеристик русел и пойм на гидравлику потоков, особенно на начальных стадиях затопления пойм. Необходимо учитывать еще и то, что этот сложный процесс зависит также и от типа пойм. Стоит отметить, что угол  $\alpha$  также не учитывает значительную роль низовых и верховых прорыв при затоплении и разгрузке пойм на реках свободного и незавершенного меандрирования. И, тем не менее, именно эта характеристика позволила вплотную подойти к решению ряда сложнейших задач речной гидравлики.

Как было ранее отмечено, процесс затопления пойм является крайне сложным, но при этом имеет ряд общих черт, что позволило Н.И. Маккавееву [43] выделить в нем *несколько фаз для пойм в условиях свободного меандрирования*.

*Первая фаза* – затопление низовых частей пойменных массивов происходит через низовые прорывы. Потоки на пойме имеют местный характер и приобретают направления, обратные направлению руслового потока. Значительные объемы стока заполняют обширные аккумулятивные емкости, приводя к снижению расходов воды в основном русле. В случаях незавершенного меандрирования или пойменной многорукавности на массиве может наблюдаться транзитный поток.

*Вторая фаза* – поступление воды из русла на пойму через верховые прорывы и понижения прируслового вала в верхней части массива. Наблюдаются средние уровни затопления поймы, на массиве присутствуют отдельные застойные зоны или зоны замедленного течения. В случаях незавершенного меандрирования или пойменной многорукавности наблюдается интенсивное транзитное течение по крупным протокам. По мере развития спрямляющего протока в него переходит все большая часть годового стока реки.

*Третья фаза* – образование единого русло-пойменного транзитного потока наблюдается при высоких уровнях воды, близких к 1%

обеспеченности. Незатопленными остаются только отдельные останцы, образующие острова.

Именно в этой фазе наиболее полно проявляется эффект взаимодействия руслового и пойменного потоков. Также возможно появление кинематического эффекта, возникающего на отдельных пойменных протоках с различной шероховатостью и глубиной или на границах потоков - пойменных вод, поступающих в русло через прорывы.

На спаде половодья при разгрузке пойм можно выделить аналогичные фазы, которые будут являться обратными, т.е. возвратом вод из поймы в русло вместо аккумуляции.

Так как от продолжительности процесса затопления пойм зависит формирование того или иного вида растительного покрова, продолжительность затопления и толщина слоя воды на пойме стали важнейшими характеристиками для сельского хозяйства, которые используются при разработке проектов улучшения и мелиорации пойм. Даже были предложены классификации пойм по этому признаку [44], которые, к сожалению, не учитывали периодичность их затопления, что также оказывает существенное влияние на вид растительности.

Как правило, частота и продолжительность затопления пойм рассчитываются по данным наблюдений за уровнями воды на водомерных постах. Однако, В.Ф. Усачев и Ю.И. Каменсков [45] выявили значительные несоответствия колебаний уровней воды в русловой и пойменной частях потока, проходящего по поймам сложного морфологического строения. Это справедливо для рек, протекающих в условиях свободного и незавершенного меандрирования или в случаях пойменной многорукавности. Таким образом, можно заключить, что фактические частота и продолжительность затопления центральной части, а также других удаленных от берега частей поймы, несколько меньше получаемых по расчетам.

К русловым процессам, как к факторам поймообразования, в первую очередь относятся горизонтальные и вертикальные русловые деформации,

тогда как сама пойма, «а главное, обычно покрывающая ее растительность, создающая повышенные сопротивления паводочному стоку, делают участие поймы в образовании русла в большинстве случаев сравнительно слабым. Исключения составляют случаи, когда пойменный поток имеет направление, существенно отличное от меженного, и пересекает последний» [46].

В отличие от русла, пойма, как правило, имеет значительную ширину, достигающую на больших реках нескольких десятков и даже сотен километров. Соответственно и площади пойм значительно превышают площади русел, что, в свою очередь, приводит к тому, что значительные объемы воды идут на затопление пойменных массивов, при этом, паводочные расходы воды уменьшаются, и это влечет за собой распластывание паводочной волны [47].

При спаде половодья часть воды, поступившей на пойму, возвращается в русло, а некоторый ее объем, который пошел на заполнение бессточных пойменных емкостей и понижений рельефа, составляет безвозвратные потери. Также к ним можно отнести потери на инфильтрацию и испарение, на что большое влияние оказывают физико-географические и климатические условия, и продолжительность затопления поймы. К сожалению, определение объемов воды, которые пойма может аккумулировать, весьма затруднено ввиду перекоса водной поверхности на поймах, что делает данные об их аккумулирующей способности недостаточно точными.

#### 1.4 Взаимодействие руслового и пойменного потоков

Отличительной особенностью русел с поймами является наличие двух и более потоков, которые движутся с разными скоростями под различными углами друг к другу и взаимодействуют между собой, создавая на линии раздела потоков дополнительные сопротивления, существенно изменяя, таким образом, пропускную способность русел. Подобные явления могут наблюдаться и при движении потока непосредственно по пойме, глубина и шероховатость которой резко изменяется по ширине.

Ф. Форхгеймер [48] приводит первые сведения об особенностях пропускной способности русел с поймами, отмечая, что расчетное значение расхода воды, определенное по уравнению (1.15) будет больше фактического, а уменьшение пропускной способности русла с поймой объясняется образованием на границе раздела двух потоков вихрей с вертикальной осью вращения.

$$Q=Q_p+Q_{п}=\omega_p C_{p\sqrt{h_p I_p}} + \omega_{п} C_{п\sqrt{h_{п} I_{п}}} , \quad (1.15)$$

где

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

$Q_p, Q_{п}$  – расход воды в русловой и пойменной составляющих потоков, м<sup>3</sup>/с

$\omega_p, \omega_{п}$  – площадь живого сечения русла и поймы, м<sup>2</sup>

$C_p, C_{п}$  – коэффициент Шези для потоков в русле и пойме, м/с<sup>1/2</sup>

$h_p, h_{п}$  – глубины русла и поймы, м

$I_p, I_{п}$  – уклон свободной поверхности руслового и пойменного потоков, ‰

На крупномасштабной модели Эльзаского канала в г. Мец М.Эгли [49] была проведена экспериментальная работа, направленная на изучение процесса взаимодействия потоков. Длина канала в масштабе 1:20 составляла 209,2 м, а поперечное сечение включало в себя трапецеидальное русло, с минимальной шириной 1,65 м, а также одностороннюю пойму трапецеидальной формы. Несмотря на то, что детальные эксперименты не выявили особенностей взаимодействия потоков в сложносоставных руслах, Эгли установил наличие поперечных течений, которые объяснил неравномерностью режима движения потока. В качестве одного из главных итогов работы, он приводит следующий: «Распределение общего расхода между различными частями сечения происходит пропорционально глубине потоков и шероховатости стенок каждой части» [49].

В то же время в трудах Б.В. Полякова [50] был представлен ряд кривых расходов воды для русловой части р. Дон, на которых совершенно четко можно проследить перегиб кривых расходов и средних скоростей русловых составляющих потока и значительное отклонение влево при уровнях, с которых начинается затопление поймы. Однако, объяснение этого факта автором [50] не приводится.

Лишь в 1947-1950 гг. Г.В. Железняков [51] в процессе изучения руслового и пойменного потоков собрал большой объем экспериментальных данных, полученных на прямолинейной модели русла с двусторонней поймой. Анализ этих данных показал, что наблюдается существенное уменьшение средних и поверхностных скоростей руслового потока под влиянием пойменного, что им было названо кинематическим эффектом взаимодействия безнапорного руслового и пойменного потоков. В дальнейшем, результаты исследований Железняка стали отправной точкой для более глубокого изучения различных аспектов этой важной для решения ряда практических задач проблемы [52].

Первоначально исследования были проведены на экспериментальных моделях различной длины, где русло с поймой (одной или двумя) располагались параллельно друг другу, т.е. соблюдались условия параллельности геометрических осей потоков.

Позже Н.Б. Барышников [53,54] и А.Л. Радюк [55] занимались изучением процесса взаимодействия, моделируя потоки, протекающие по поверхности с одинаковыми глубинами по ширине и с резко отличающейся шероховатостью. Исследования проводились в лаборатории водных исследований ЛГМИ (РГГМУ), где на экспериментальной модели было сформировано русло, состоящее из трех продольных полос одинаковой ширины, имеющих разную шероховатость. Изучение процесса взаимодействия потоков в образованных этими полосами отсеках осуществлялось по методике, разработанной в РГГМУ [56], т.е. измерения параметров выполнялись сначала для изолированных друг от друга потоков,

а потом при их взаимодействии. Также необходимо отметить, что режим движения воды поддерживался близким к равномерному.

Отличительной особенностью экспериментальной работы, которая проводилась сначала под руководством В.Н. Гончарова [23], а затем Н.Б. Барышникова, явилось непосредственное изучение эффекта взаимодействия потоков, который возникает, когда оси руслового и пойменного потоков не параллельны друг другу. Масштабные исследования были проведены для случаев русел с поймами [57] и для русел с неоднородной по ширине шероховатостью [54].

Анализ результатов проделанной работе, позволил сделать ряд важных выводов. Так, например, при движении потоков с различными скоростями на границе их раздела при малых скоростях возникает вертикально расположенная волновая поверхность. По мере увеличения скоростей потока, от этой волновой поверхности начинают отделяться вихри с вертикальной осью вращения и по закону Кутта-Жуковского перемещаться в поток, движущийся с большими скоростями. Таким образом, эти вихри захватывают массы жидкости пойменного потока и переносят их в русловой, тем самым осуществляя массообмен между этими потоками, что приводит к торможению руслового потока пойменным [23, 57].

А.Л. Радюк [55] привел итоги натурных исследований на р. Большой Енисей, на участке шириной 300м, где было отмечено, что при очень большой разнице скоростей руслового (5м/с) и пойменного (0,4м/с) потоков по всей линии соприкосновения этих потоков четко просматривалась вихревая дорожка.

Теоретический анализ процесса взаимодействия руслового и пойменного потоков был впервые выполнен В.Н. Гончаровым [23], а наличие вихрей на границе взаимодействующих структур экспериментально установил И.П. Спицын [58] и позже подтвердил Р.Х. Селлин (рис.1.9).

Вихревые структуры располагались на незначительной части поймы и почти по всей ширине русла, образуясь сразу после слияния потоков и

вращаясь против часовой стрелки. Диаметры вихрей постепенно увеличивались, изменяясь от 15 до 150 см. После смещения вихрей в сторону руслового потока, угловая скорость их вращения уменьшается, что приводит к распаду и последующему их рассеиванию в окружающей среде. Продолжительность «жизни» отдельных вихрей составляла 2-6 с.

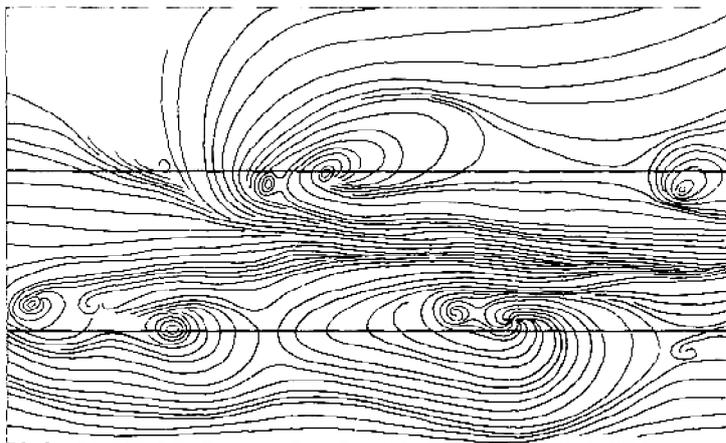


Рисунок 1.9 - Вихревые структуры по данным экспериментальных исследований Р.Х. Селлина

Очевидно, что на процесс образования, перемещения и обтекания русловым потоком вихрей, поток затрачивает большое количество энергии. Также необходимо учитывать и затраты на замещающие течения. Соответственно, пропускная способность руслового отсека потока уменьшается, что приводит к деформации поля его скоростей. Дополнительное сопротивление в этом случае может быть рассчитано по формуле (1.16)

$$\tau = A_B \left( \frac{\partial V}{\partial b} \right), \quad (1.16)$$

где

$A_B$  – коэффициент турбулентного обмена между взаимодействующими потоками

$\partial V / \partial b$  – градиент осредненных по вертикали скоростей в зоне взаимодействия потоков

Отсюда следует, что дополнительное сопротивление, образующееся на границе взаимодействующих потоков, проходящих по поверхности с разной по ширине шероховатостью, пропорционально градиенту их скоростей. При этом, градиент скоростей обусловлен не разностью глубин, как в предыдущем случае русел с поймами, а различием шероховатости дна.

Результаты исследований раннего периода по данной тематике были обобщены В.Н. Гончаровым [23], который пришел к следующим выводам:

При низких уровнях затопления поймы ведущим остается русловой поток, так как влияние на него пойменного невелико. Сказывается оно лишь в том, что уменьшается пропускная способность русла в результате перелива масс жидкости из русла на пойму и обратно, а также в уменьшении интенсивности циркуляционных течений и выравнивании эпюр распределения скоростей по глубине потока. При условиях, когда уровни затопления поймы начинают увеличиваться (глубины  $h_{п} > 0,2h_{р}$ ), ведущим становится пойменный поток, при этом следует отметить некоторые его особенности:

- массы жидкости руслового потока, переливающиеся на пойму, увеличивают скорости пойменного потока на большем расстоянии, чем при условиях малого наполнения поймы;

- выравнивается распределение скоростей по ширине руслового потока в створах изгиба;

- вследствие увеличения перелива жидкости из русла на пойму и обратно, соответственно увеличивается и торможение руслового потока пойменным.

Следует отметить, что большинство экспериментальных исследований было направлено именно на выяснение основных закономерностей процесса взаимодействия руслового и пойменного потоков, поэтому выбирались произвольные физические модели безотносительно к каким-либо критериям моделирования. Исключением является работа В.Г. Саликова, в которой были представлены модели конкретных участков рек по трассе БАМа [59],

выполненные соответственно с учетом критериев подобия. Приведем результаты анализа основных итогов, полученных в этих исследованиях [59]:

- вскрыты основные закономерности взаимодействия руслового и пойменного потоков и потоков, проходящих по поверхностям с различной по ширине шероховатостью при условиях, когда динамические оси взаимодействующих потоков не параллельны;

- разработана типизация процесса взаимодействия русловых и пойменных потоков, основанная на учете взаимного расположения динамических осей взаимодействующих потоков ниже расчетного створа, установлено четыре типа взаимодействия этих потоков;

- установлен характер трансформации полей скоростей руслового потока под воздействием пойменного;

- разработаны рекомендации для учета эффекта взаимодействия руслового и пойменного потоков при расчете пропускной способности сложносоставных русел.

**В то же время экспериментальные исследования имеют ряд недостатков.**

Не учитываются особенности морфологического строения русел и пойм, а также изменения их морфометрических характеристик по длине водотока. Основные эксперименты проводились на моделях с берегами поймы, имитирующими склоны долины, строго параллельными друг другу, а суммарная ширина русла и поймы на моделях не изменялась по длине потока.

Отсутствие на моделях особенностей рельефа пойм. Известно, что наличие прорв в прирусловых валах, а также многочисленных грив, стариц, пойменных озер и других морфологических образований приводит к значительным несоответствиям между процессами на моделях и в естественных условиях, особенно это характерно для пойм.

В лабораторных условиях, как правило, изучались поймы с одинаковыми отметками по ширине, тогда как на реках обычно наблюдается чередование разновысотных пойм. Это было учтено только лишь в работах В.Г. Саликова и Н.Б. Барышникова [40].

Продольные и поперечные уклоны свободной поверхности на моделях не соответствуют данным о поймах, полученных для натуральных условий. Обработка результатов данных наблюдений ограниченного числа натурального материала показала, что процесс формирования уклонов свободной поверхности пойменных потоков является сложным и, как правило, определяется типом поймы и ее морфологией.

Диапазон расчетных зависимостей, которые были получены на основании анализа результатов модельных испытаний, имеет локальное значение, так как он ограничен диапазоном изменения параметров моделируемых участков.

На протяжении 1962 – 63 годов и в 1966 году сотрудниками ГГИ были проведены специальные натурные исследования на семи реках ЕТР в условиях паводков. Результаты этих исследований были обобщены Д.Е. Скородумовым [60]. В 1970 году сотрудники ГГИ совместно с сотрудниками Института Водных проблем Белоруссии провели исследования процессов взаимодействия руслового и пойменного потоков на примере излучины р.Сож, при условиях пересечения осей потоков под углом в  $135^\circ$ . Обобщение результатов этих работ были проведены И.Ф. Карасевым [61]. Кроме вышеперечисленных исследований специальных направлений, известны также работы сотрудников бывшего Московского гидромелиоративного института по изучению течений на пойменном массиве р. Оки, исследования сотрудников ГГИ на реках Полометь и Обь [62]. Анализ большого количества натуральных данных, полученных в подразделениях Росгидромета, при пропуске паводков по затопленным поймам был выполнен Н.Б. Барышниковым [40], в частности, по данным измерений,

проведенных на гидростворах сети Росгидромета на 27 реках бывшего СССР. Итогом проведенных натурных исследований и анализа полученных результатов стало подтверждение выводов, сделанных на основе лабораторных экспериментов.

Более того, было установлено, что особенности морфологического строения русла и поймы, а также изменение их морфометрических характеристик по длине реки являются главными факторами, определяющими величину гидравлических сопротивлений и характера взаимодействия руслового и пойменного потоков [53, 63 и др.]. В подтверждение этого было установлено, что именно характер изменения ширины долины, и, соответственно, ширины поймы, определяет положение динамических осей русловых и пойменных потоков. Н.Б. Барышников [40] по данным наблюдений на реках Крыловка у с. Крыловка, Нестеровка у рзд. Таловый и Друть у с. Городище установил факт изменения взаимного расположения динамических осей руслового и пойменного потоков при увеличении глубин этих потоков (рис.1.10).

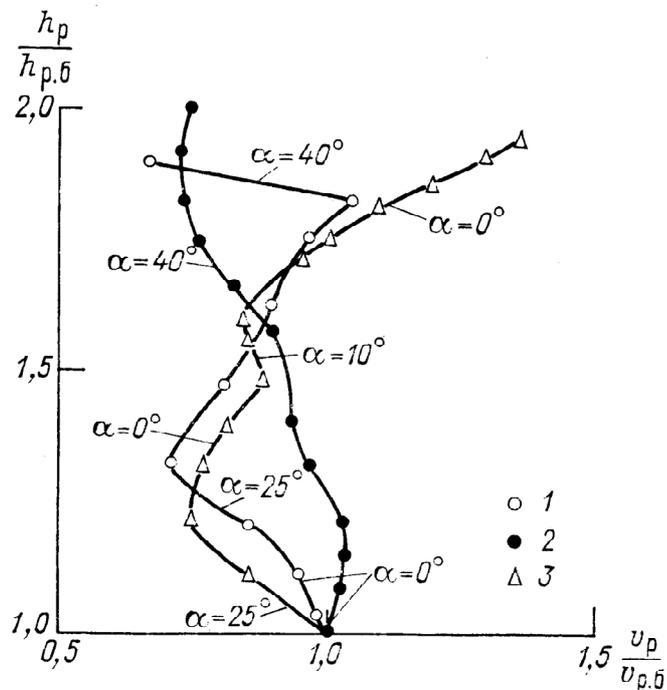


Рисунок 1.10 - Кривые зависимости вида  $V_p/V_{p.б.} = f(h_p/h_{p.б.}, \alpha)$ ,

где  $\alpha=f(h_p/h_{p,б})$  по натурным данным: 1 – р. Нестеровка - рзд. Таловый, 2 – р. Крыловка - с. Крыловка, 3 – р. Друть - с. Городище.

На основе анализа натурных данных по 100 рекам, были установлены наиболее часто встречающиеся случаи взаимного расположения геометрических осей русла и поймы и, соответственно, динамических осей руслового и пойменного потоков. Это позволило разработать рекомендации для дальнейших исследований по данной тематике при моделировании на лабораторных установках.

Совместный анализ лабораторных и натурных данных позволил усовершенствовать типизацию процессов взаимодействия русловых и пойменных потоков на основе учета особенности морфологии русла и поймы для расчетного участка. Итогом этих исследований стала систематизация этого сложного и многообразного процесса, ряд особенностей которого, к сожалению, еще недостаточно изучен. Следует отметить, что в большинство лабораторных экспериментальных исследований выполнялось на идеализированных моделях русел с односторонней поймой, а потоки в руслах с двусторонними, и тем более с разновысотными поймами, не моделировались.

В основу разработанной Н.Б. Барышниковым [49] **типизации процессов взаимодействия руслового и пойменного потоков**, было положено взаимное расположение их динамических осей на участке, расположенном ниже расчетного створа. В результате было выделено пять соответствующих типов (рис 1.11), каждый из них рассмотрен им [49] более детально.

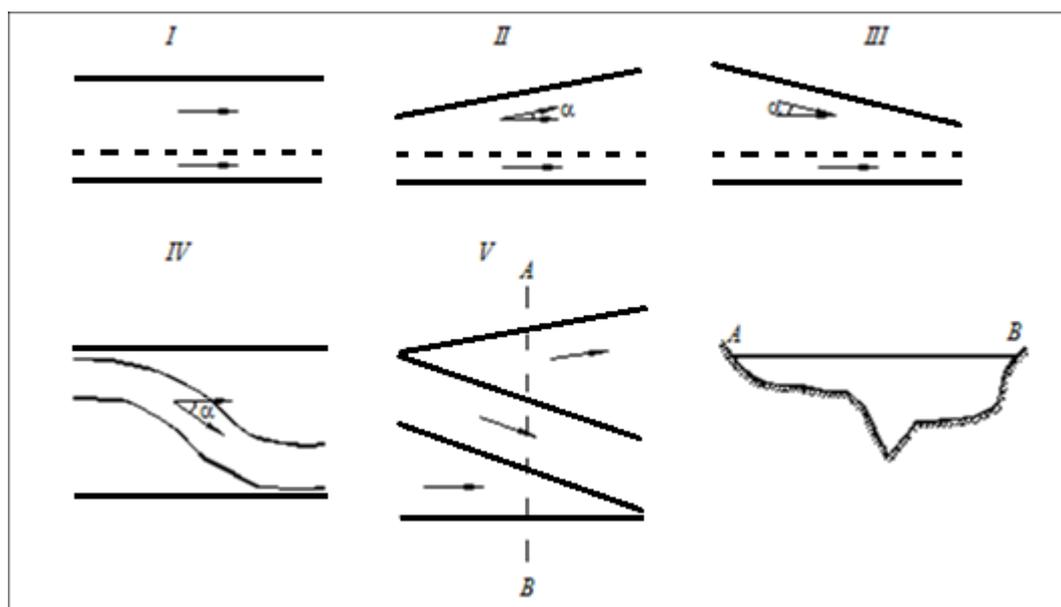


Рисунок 1.11 - Типы взаимодействия руслового и пойменного потоков

**Первый тип** характеризуется параллельностью динамических осей взаимодействующих потоков, и, соответственно, параллельностью геометрических осей русел и пойм. За счет возникновения на границе раздела потоков вихрей с вертикальной осью вращения и их перемещения в сторону более быстрого руслового потока по закону Кутта-Жуковского, возникают дополнительные сопротивления в зоне раздела этих потоков. Значительное количество энергии потока при этом затрачивается на торможение руслового потока, что приводит к уменьшению пропускной способности русла примерно на 15% и не может компенсироваться незначительным увеличением скоростей в прирусловой части пойменного потока. Следовательно, в целом пропускная способность потока уменьшается примерно на 10-15% по сравнению с условиями, когда потоки изолированы друг от друга тонкостенной продольной перегородкой.

Необходимо отметить, что такого рода идеализированный тип взаимодействия потоков довольно редко наблюдается в естественных условиях, так как по длине и с увеличением уровней, как правило, происходит изменение морфометрических характеристик русел и пойм. Но,

так как большинство гидростворов на сети Росгидромета расположено на относительно прямолинейных участках, процессы взаимодействия руслового и пойменного потока все-таки возможны при параллельности их динамических осей.

Для *второго типа* взаимодействия руслового и пойменного потоков характерно расхождение динамических осей. Такое может наблюдаться как при условиях, когда геометрические оси русла и поймы не параллельны, так и при подаче меньшего количества воды на пойму, и большего в русло, несоответствующего их пропускной способности при параллельности их геометрических осей. Так же возможно увеличение или наоборот небольшое уменьшение пропускной способности русла и незначительное увеличение пропускной способности пойм по сравнению с аналогичными отсеками потока, но изолированными друг от друга продольной тонкостенной перегородкой. Вероятно, это увеличение пропускной способности обусловлено следующими факторами: 1) уменьшением затрат энергии на трение об указанную перегородку, 2) небольшим увеличением площади сечения потока в целом за счет изъятия разделительной стенки, 3) резким увеличением уклонов водной поверхности, особенно для русловых потоков.

Стоит отметить, что в естественных условиях данный тип взаимодействия встречается довольно часто, например, при поступлении масс руслового потока на пойму из-за расширения долины вниз по течению реки.

При *третьем типе* взаимодействия потоков наблюдается схождение динамических осей руслового и пойменного потоков. При данном типе взаимодействия в русловой поток поступают водные массы пойменного потока под разными углами, тем самым вызывая его торможение и, следовательно, уменьшая его пропускную способность. Величина уменьшения такого рода напрямую зависит от градиента скоростей и угла схождения динамических осей взаимодействующих потоков. Как и для

случая второго типа, геометрические оси русла и поймы могут быть как параллельными, так и не параллельными.

Значительное количество энергии русловой составляющей потока, затраченное на перемешивание его водных масс с водами пойменного потока, а также на повышение скоростей последнего может привести к уменьшению пропускной способности руслового отсека потока более чем на 50% (по лабораторным данным), причем скорости пойменного потока возрастают незначительно, а пропускная способность потока в целом уменьшается существенно.

По натурным данным Н.Б. Барышниковым [49] был выполнен детальный анализ, который подтвердил полученные ранее положения, а также показал, что в естественных условиях данный тип взаимодействия потоков наблюдается в случаях сужения речной долины, а, следовательно, и поймы вниз по течению реки, что встречается довольно часто.

**Четвертый тип** взаимодействия потоков характеризуется пересечением динамических осей руслового и пойменного потоков, что наиболее часто встречается в естественных условиях, где преобладающим типом руслового процесса по данным И.В. Попова [36] является свободное меандрирование.

Данный тип взаимодействия можно считать обобщением всех предыдущих, так как при углах пересечения динамических осей потоков, близких к нулю, процесс переходит в первый тип взаимодействия. А при изменении углов от нуля до  $50^\circ$  в зависимости от характера изменения ширины долины и самой поймы наблюдается процесс, близкий ко второму или третьему типам взаимодействия, т.е. расширение или сужение поймы соответственно.

При углах пересечения динамических осей больших  $50^\circ$ , наблюдается принципиально новый тип взаимодействия руслового и пойменного потоков, при котором затрачиваемая русловым потоком энергия возрастает настолько, что движение воды в нем прекращается или направляется в

противоположную сторону. В то же время верхняя по отношению к пойменному потоку бровка коренного русла становится, так называемым, гребнем водослива, причем в русле образуется водоворотная зона, размеры которой зависят от соотношения значений скоростей и глубин руслового и пойменного потоков.

Описанная выше типизация, основанная на лабораторных данных, полностью подтверждается данными, полученными в натуральных условиях. Причем первые три рассмотренные типа соответствуют потокам в руслах с односторонней поймой, а четвертый тип для условий взаимодействия потоков при наличии двусторонней поймы.

К сожалению, типизация не может охватить все многообразие природных условий, что, разумеется, требует соответствующей доработки. Так, например, в данной типизации не отражены изменения ширины русла и поймы по длине реки при разных уровнях воды, несмотря на то, что таким образом определяется гидравлика потоков в руслах и поймах и соответственно тип их взаимодействия. Таким образом, типизация была дополнена еще одним типом.

К *пятому типу* относятся наиболее сложные случаи взаимодействия потоков в руслах с двусторонними и односторонними разновысотными поймами, а также с поймами, для которых изменения ширины по длине реки зависят от уровней воды. Главной чертой этого типа взаимодействия является изменение направления динамической оси пойменного потока относительно оси руслового при изменении уровня воды.

Анализ данных экспериментальных исследований показал, что каждому типу взаимодействия руслового и пойменного потоков соответствует определенный характер изменения средних скоростей руслового потока, что позволило установить закономерности влияния эффекта взаимодействия руслового и пойменного потоков. Однако, процесс этот изучен недостаточно, и особенно при четвертом и пятом типах взаимодействия потоков, так как экспериментальные исследования в

основном выполнялись только для первых трех типов взаимодействия потоков. Исследования второго и третьего типов проводились только в лаборатории водных исследований РГГМУ под руководством Н.Б. Барышникова [11,15,53].

Наименее изученными являются четвертый и пятый типы взаимодействия, для условий пересечения динамических осей потоков, для которого установлена прямая зависимость между уменьшением скоростей руслового потока, а также пропускной способности русла от угла пересечения динамических осей руслового и пойменного потоков.

Наиболее точно определить угол между динамическими осями взаимодействующих потоков  $\alpha$  возможно, используя данные измерений вектора скоростей. Однако, направление скоростей течения определяют только при проведении специальных исследований, к тому же при наивысших уровнях расходы воды, как правило, не измеряются. С учетом этого, была предложена методика определения угла  $\alpha$ , разработанная Г.В. Железняковым [51] и основанная на предположении о том, что углы между геометрическими и динамическими осями взаимодействующих потоков русел и пойм равны. Данное допущение существенно упрощает процессы определения угла  $\alpha$ , но тем самым снижает его точность, однако, другая методика его определения отсутствует.

Недостаточно разработанное гидравлическое обоснование теории русловых процессов приводит к тому, что современные гидроморфологические направления этой теории остаются описательными, в частности, отсутствуют расчетные зависимости, даже приближенные, основанные на уравнениях гидромеханики и гидравлики, на что справедливо указывали ведущие исследователи в этой области [26, 64, 65 и др.]. Сотрудники руслового отдела ГГИ под руководством Н.Е. Кондратьева [66,67] интенсивно разрабатывали направление, занимающееся гидравлическим обоснованием теории русловых процессов, но, к сожалению, его дальнейшее развитие в значительной степени тормозится отсутствием

теории турбулентности, а также невозможностью учесть все закономерности деформаций русла и соответствующих им гидравлических структур потока. Все это также должно быть подтверждено надежными данными как лабораторными, так и натурными, полученными на участках рек значительной длины по единой методике.

#### 1.5 Результаты оценки воздействия эффекта взаимодействия руслового и пойменного потоков на их транспортирующую способность

Н.Б. Барышников [57] впервые рассмотрел проблему влияния пойменного потока на транспорт наносов русловым потоком. Автор [57] отмечает, что между потоками в русле и пойме идет непрерывный обмен наносами, осуществляющийся разными способами:

образование поймы за счет прирусловых отмелей и их зарастания  
наращивание поймы за счет отложения ила  
плоскостной смыв, эоловый перенос, разработка пойменных протоков, переносящих наносы с поймы в русло.

Следует отметить, что объем наносов, который участвует в этом обмене, иногда может превышать объем транзитного стока наносов.

Известно [67 и др.], что основной сток наносов происходит во время прохождения половодий и паводков, одной из особенностей этого процесса является то, что скорости руслового потока уменьшаются при выходе на пойму, т.е. пойменный поток тормозит русловую а, следовательно, его пропускная способность уменьшается. Это явление называется кинематическим эффектом безнапорного потока, которое было открыто и исследовано в МИИТ под руководством Г.В. Железнякова [51].

При дальнейшем увеличении глубин и соответственном увеличении расходов русла и поймы, также увеличиваются и расходы наносов. Однако, темп роста меньше, чем в изолированном русле. Наличие высокой шероховатости на пойме оказывает влияние на уменьшение расходов донных

наносов, что необходимо учитывать при оценке транспортирующей способности руслового потока.

В периоды спада половодья и межени наблюдается уменьшение транспортирующей способности потока, а наносы практически не поступают в русловую поток, поэтому он размывает гребни перекаатов и берега пойм, тем самым увеличивая расход наносов, чтобы привести его в соответствие со своей транспортирующей способностью. Однако, проблема отложения и смыва грунтов с различных участков поймы и русла нуждается в дальнейшем изучении.

Благодаря последним разработкам по проблеме взаимодействия руслового и пойменного потоков, стало возможным представить некоторые важные результаты, которые подкреплены уникальными данными наблюдений сотрудников ГГИ на реках Обь [62, 68], Полометь [69], Луга и Пьяна [62], а также сотрудниками Московс

кого гидромелиоративного института на реке Оке.

Анализ этих данных показал, что при пересечении руслового потока с пойменным под большими углами, в русле образуется водоворотная зона, которая становится причиной отложения в нем наносов. В случае, когда наблюдаются продолжительные паводки и при больших углах пересечения взаимодействующих потоков, русло вообще может быть полностью заполнено наносами. Когда углы  $\alpha$  близки к  $90^\circ$ , что характерно для условий свободного меандрирования, происходит чередование пойменных массивов. В их верховых частях при затоплении бровок прирусловых валов начинают откладываться русловые наносы. Основное количество наносов поступает на пойменный массив через верховые прорвы, что обуславливается большими уклонами свободной поверхности в них, это в свою очередь приводит к тому, что отметки верховых частей пойменных массивов больше, чем низовых, так как поступление наносов не успевает распространиться на всю глубину массива, оседая в его верхней части.

Для случаев резкого изменения шероховатости русла или поймы при отсутствии изменения глубин наблюдается значительное расхождение между скоростями потоков. Таким образом, сопротивление и пропускная способность русла и поймы начинает изменяться под действием эффекта взаимодействия потоков.

Экспериментальные исследования на моделях русла с размываемым дном и жесткой поймой проводились под руководством Н.С. Знаменской [35, 70] и В.Г. Саликова [59] с целью выявления влияния пойменного потока на транспорт наносов русловым потоком. Анализ результатов проведенной работы показал, что резкое снижение транспортирующей способности в русловом отсеке потока происходит при больших углах пересечения динамических осей руслового и пойменного потоков, когда угол  $\alpha \geq 60^\circ$ .

Эти итоги были также подтверждены ранее проведенными исследованиями на мелкомасштабной модели И.А. Ярославцевым [71] при расходах воды до 8 л/с. Однако, И.А. Ярославцев приводит иную трактовку причины выноса наносов на пойму. При наличии пойменного потока происходит изменение направления циркуляции, возникающей в изогнутом русле, что приводит к образованию береговых валов и выносу наносов. Впрочем, вопрос о значительной роли циркуляции остается спорным. Тогда как детальный анализ данных показал, что вынос наносов на пойму происходит в нижней части излучины рядом с точкой перегиба, где динамические оси взаимодействующих потоков пересекаются под наибольшими углами.

Под руководством Н.Б. Барышникова [22] в 1960-х годах в ЛГМИ (РГГМУ) была проведена масштабная экспериментальная работа, направленная на изучение влияния эффекта взаимодействия руслового и пойменного потоков на транспортирующую способность руслового потока.

Лабораторные исследования проводились в малом гидравлическом лотке с переменным уклоном на модели русла с односторонней поймой, расположенной параллельно относительно русла и имеющей с ним

одинаковую ширину равную 0,2 м, и длину 2,8 м. Глубина русла до отметки бровки поймы составляла 0,05 м. Дно русла и поймы было гладким, покрытым стеклом толщиной 4 мм.

Разработанная методика измерений при изоляции потоков друг от друга стеклянной продольной перегородкой, а потом при их взаимодействии позволила минимизировать погрешности. Наблюдения проводились за скоростями потока и расходом наносов. Расходы воды измерялись методом скорость-площадь и контролировались по треугольному водосливу, погрешность результатов измерений не превышала 3-4%. Расходы наносов измерялись объемным способом. Все эксперименты осуществлялись при спокойном режиме потока, т.е. при числах Фруда меньших единицы.

Анализ данных экспериментальных исследований показал, что транспортирующая способность руслового потока резко уменьшается под действием пойменного потока.

К сожалению, на фоне интересных выводов по данной проблематике, также был обозначен и ряд недостатков, к которым, в первую очередь, можно отнести малые размеры лабораторных установок, а также и то, что измерения проводились только для условий параллельности динамических осей взаимодействующих потоков.

В связи с чем, встала проблема проведения дальнейших экспериментальных исследований, позволяющих более детально изучить и выявить влияние эффекта взаимодействия руслового и пойменного потоков на транспорт наносов русловым потоком в условиях различного расположения динамических осей взаимодействующих потоков.

Новый этап в разработке направления, изучающего влияние эффекта взаимодействия руслового и пойменного потоков на транспортирующую способность руслового, начался в 2003 году. На базе лаборатории кафедры гидрометрии РГГМУ были проведены первые аналогичные эксперименты, но на моделях большого размера, что позволило уменьшить влияние таких

недостатков, как эффект пространственности, который приводит к трансформации эпюр скоростей.

Данная работа продолжается и в настоящее время. Принципиально новым стало то, что эксперименты стали проводиться при слиянии под различными углами взаимодействующих потоков.

### **Выводы:**

В результате анализа современного состояния проблемы учета расходов и стока донных наносов в структуре речной геосистемы установлено.

1. Для геосистемы характерны одновременно как свойство континуальности (непрерывности), так и свойство дискретности (прерывистости). Континуальность выражается во взаимопроникновении компонентов системы в виде потоков энергии и вещества – круговоротами (интеграция), дискретность же проявляется в виде процессов разделения компонентов, отдельные части которых выполняют свои функции в составе целого (дифференциация). Оба эти процесса должны рассматриваться в совокупности.

К основным свойствам геосистем относят следующие: целостность, устойчивость, структура, функционирование, эволюция и динамика. Важнейшим из них является целостность, что означает невозможность представлять систему в виде простой суммы ее компонентов, так как именно их взаимодействие делает систему автономной и устойчивой к внешним воздействиям. Тем не менее, геосистемы пронизаны потоками вещества и энергии, связывающими их с окружающей средой, что делает их открытыми системами. Функционирование системы и ее динамика выражается в повторяющихся изменениях системы, связанных с суточными и годовыми ритмами, а способность возвращаться в первоначальное состояние свидетельствует об устойчивости. А направленное необратимое изменение,

при котором начинается смена одного природного комплекса другим, характеризуется эволюцией.

Структура геосистемы является сложносоставной, включает в себя вертикальную и горизонтальную составляющие, предполагающие не только взаимное расположение составных частей, но и способы их соединения. Вертикальная структура образуется компонентами, а горизонтальная отвечает за сочетание систем более низкого ранга.

Непрерывные деформации, которым подвержено речное русло и поймы под действием текучей воды называются русловым процессом, который проявляется в виде размыва русла и поймы, а также переноса и аккумуляции наносов. Направленность этого процесса определяется соотношением между расходом наносов и транспортирующей способностью потока, в чем проявляется связь с комплексом природных условий всего водосбора

2. Недостатками методического аппарата исследования наносов, как компонента речной геосистемы, и расчетных формул являются:

- отсутствие или высокая стоимость, а также низкое качество натурной информации о стоке донных наносов;
- высокие погрешности величины расходов донных наносов, полученных при использовании расчетных формул;
- неучет в формулах эффектов взаимодействия руслового и пойменного потоков и пространственности;
- отсутствие однозначной терминологии в определении искомой величины в расчетных формулах – расход наносов или транспортирующая способность.

3. Взаимодействие руслового и пойменного потоков характеризуется

- взаимным расположением динамических осей руслового и пойменного потоков, образующим угол  $\alpha$ ;
- вторжением пойменного потока в русловую при спаде уровней;
- растеканием водных масс руслового потока по пойме при поднятии уровней.

4. Недостатки методического аппарата оценки эффекта взаимодействия руслового и пойменного потоков на транспортирующую способность руслового потока:

- экспериментальные исследования этого эффекта проводились на лабораторных установках малых размеров;

- в лабораторных исследованиях не учитывался различный тип подстилающей поверхности поймы.

5. Систематизация результатов исследований взаимодействия руслового и пойменного потоков на транспортирующую способность руслового потока требует обобщения полученных данных и приведения зависимостей и других закономерностей в единое информационное пространство, что предлагается реализовать в форме базы знаний геоинформационной системы. Такой подход позволяет сформулировать новую научную задачу диссертации: ***систематизации и анализа пространственно-координированных данных о характеристиках русловых и пойменных потоков в геоинформационной системе для совершенствования методики прогнозирования русловых деформаций.***

## 2 МЕТОДЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

2.1 Методика проведения экспериментов по оценке влияния шероховатости поймы на транспортирующую способность руслового потока

Цели методики:

- на основе экспериментальных лабораторных исследований на физической модели русла с односторонней поймой установить зависимости транспортирующей способности руслового потока от типа его взаимодействия с пойменным потоком.
- разработать практические рекомендации по реализации установленных зависимостей при проектировании гидротехнических сооружений.

Задачи для реализации поставленных целей:

- оценка влияния эффекта взаимодействия руслового и пойменного потоков на транспортирующую способность руслового потока за счет одновременного моделирования различных потоков;
- определение зависимостей транспортирующей способности руслового потока от типа подстилающей поверхности поймы.

Для решения поставленных задач необходимо:

- организовать и модифицировать существующие лабораторные установки с точки зрения выявления влияния шероховатости поймы на транспортирующую способность русловой составляющей потока.
- провести серии модельных экспериментов на лабораторных установках для набора информации по данной проблематике.

**Описание исходного лабораторного оборудования применяемого при проведении экспериментов:**

Принципиальная схема расположения лабораторного оборудования представлена на рис.2.1

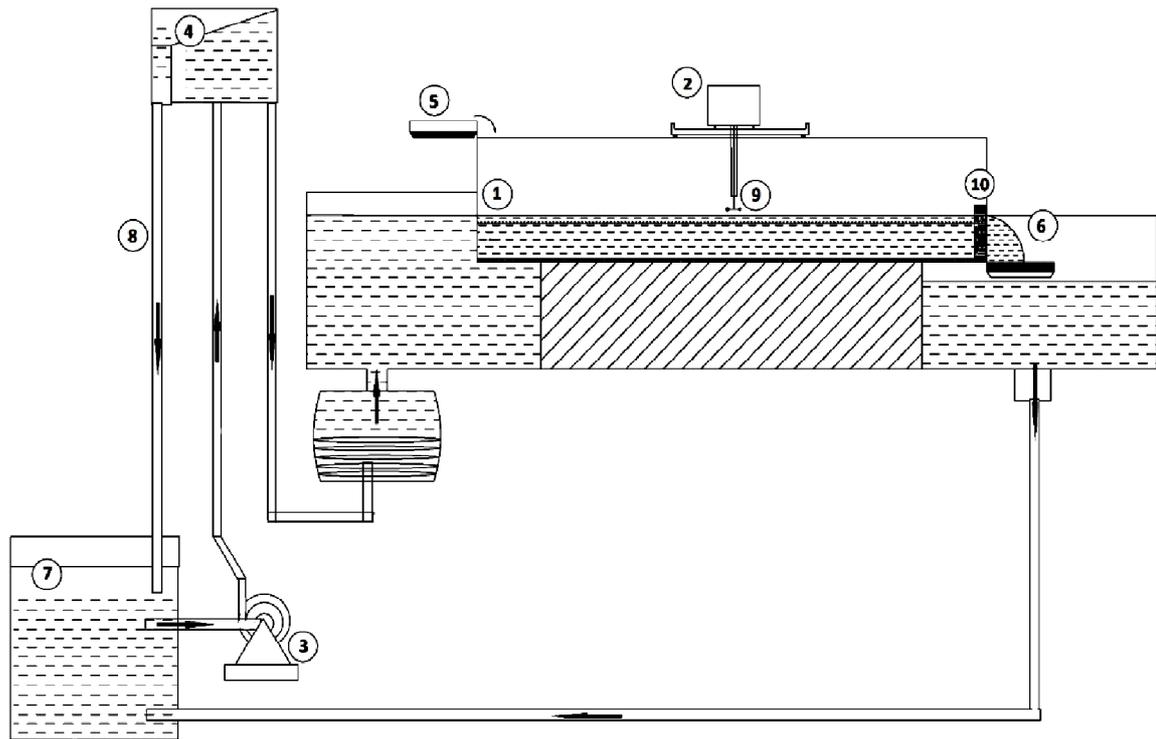


Рисунок 2.1 – схема расположения лабораторной установки

1 – гидравлический лоток с переменным уклоном;

2 – подвижная тележка;

3 – центробежный насос;

4 – напорный резервуар;

5 – устройство для подачи наносов;

6 – пескоулавливающее устройство;

7 – сборный резервуар;

8 – подводящий трубопровод;

9 – микровертушка и шпигун-масштаб;

10 – треугольный водослив;

В помещении цокольного этажа расположена насосная станция лаборатории. Насосная станция оснащена одноступенчатым центробежным

насосом модели К-150-125-250 (при числе оборотов 1450 об/мин обеспечивается напор 20 м)

Описание существующей лабораторной модели:

Схема модели представлена на рис. 2.2.

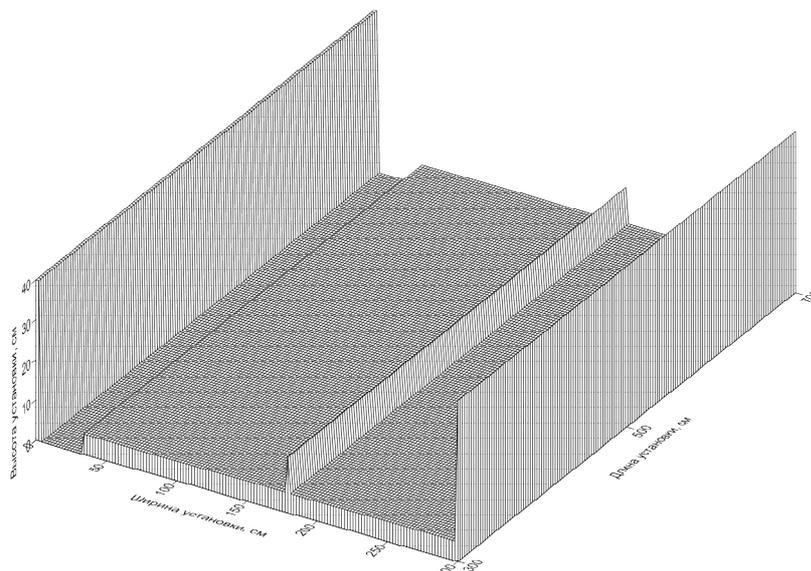


Рисунок 2.2. – принципиальная схема установки

К ее недостаткам относится то, что она характеризуется малыми размерами и расположенными параллельно друг другу руслом и поймой, что не отвечает задачам диссертации.

Размеры установки:

Длина – 6 м

Ширина русла – 0,25 м

Ширина поймы – 0,35 м

Высота русла – 0,05 м

Поверхность русла и поймы выложены стеклянными панелями толщиной 4 мм.

Выходное отверстие лотка перегородено жалюзи для стабилизации гидравлического режима потока. Также лоток снабжен специальным пескоулавливающим устройством, расположенным в конце установки. Это

устройство, закрепленное в конце экспериментальной установки, состояло из деревянного каркаса с закрепленной на нем ловушкой из капрона, которая поддерживалась в нижней части с помощью стальной сетки. Данное устройство крепилось на выходе из установки при помощи металлических гибких пластин.

На самом лотке была установлена специальная подвижная установка, перемещающая штативы микровертушек и игольчатого шпиген-масштаба.

Контроль измерений расходов воды производился по треугольному водосливу, также расположенному в конце лотка.

Над входным отверстием лотка было смонтировано устройство для ручной подачи наносов в русловой поток, скорость подачи которых фиксировалась посредством специальных маркеров, закрепленных в начале лотка. Подача наносов соответствовала транспортирующей способности руслового потока. Такой режим подачи наносов поддерживался постоянно.

К сожалению, размеры лотка не позволили провести масштабные исследования для условий взаимодействия руслового и пойменного потоков под различными углами. В процессе исследований установка была усовершенствована.

Для совершенствования лабораторной модели, удовлетворяющей поставленным в диссертации задачам, необходимо было ее доработать (модифицировать) с учетом выявленных специфических особенностей основных типов речных систем РФ.

### **Модификация лабораторного оборудования для подтверждения выбранной методики исследований**

В соответствии с поставленной задачей модификация была осуществлена следующим образом: на лабораторной установке была смонтирована модель большего размера с возможностью изменения расположения геометрических осей потоков под различными углами  $\alpha$ , а также с возможностью менять характер подстилающей поверхности поймы.

Основанием для постройки экспериментальной модели стало допущение о том, что угол  $\alpha$  между динамическими осями потоков, соответствовал углу между их геометрическими осями, что не всегда равнозначно для естественных условий.

Первой частью этих исследований стало выполнение экспериментов при втором типе взаимодействия руслового и пойменного потоков, т.е. для условий расходящихся динамических осей руслового и пойменного потоков.

Схема данной модели представлена на рисунке 2.3.

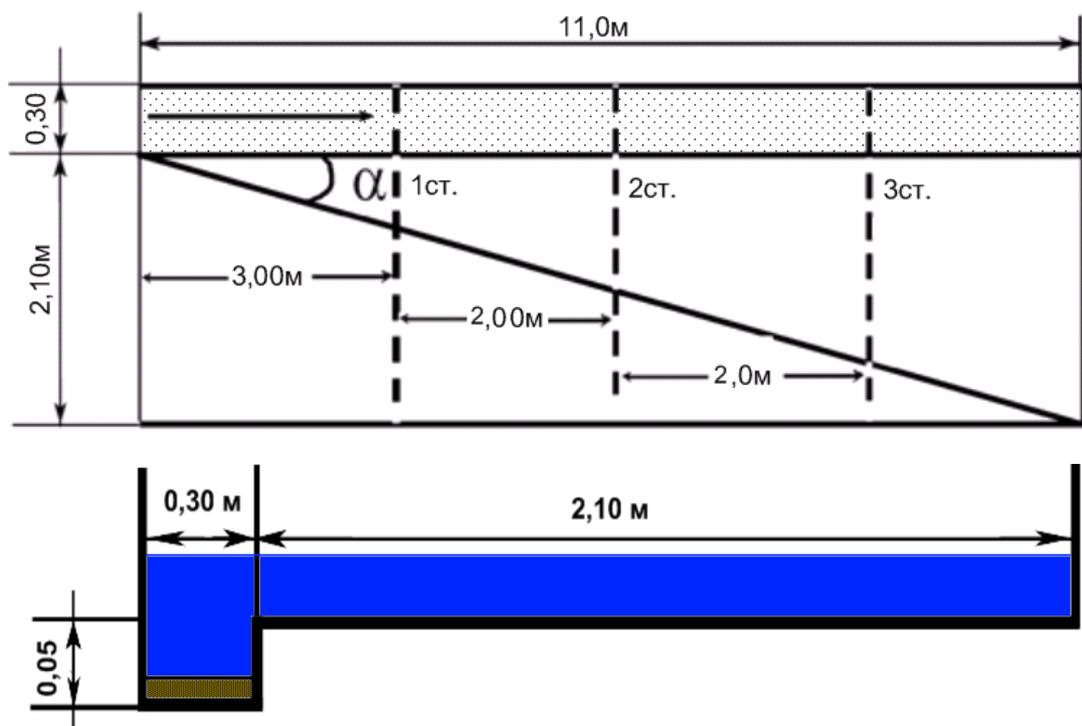


Рисунок 2.3 – План и сечение экспериментальной установки

В соответствии с размерами установки угол  $\alpha$  составлял величины равные  $5^\circ$ ,  $10^\circ$ ,  $15^\circ$  и  $20^\circ$ .

На русловой площадке из бетона была смонтирована модель русла с односторонней поймой, длиной 11 м. Русло и пойма имели уклон в 1%. Боковые стенки, а также продольная перегородка, служившая для изменения углов, выложены стеклянными панелями, толщиной 4 мм, а дно представляет собой бетонное основание установки.

Размеры установки:

наибольшая ширина поймы – 2,1 м;

ширина русла – 0,3 м;

глубина русла – 0,05 м;

Дальнейшие исследования стали проводиться для условий схождения динамических осей взаимодействующих потоков – т.е. для условий 3 типа.

Рассмотренная ранее экспериментальная установка была переоборудована. Перегородка, разделяющая русло и пойму, была перемещена таким образом, что из условий расходящихся геометрических осей потоков, был осуществлен переход к сходящимся осям.

Для выявления влияния шероховатости поймы на транспортирующую способность руслового потока на нее был нанесен гранитный гравий, расположенный в шахматном порядке. Расстояние между «зернами» гравия составляло 4-5 см. Соответственно было смоделировано два типа шероховатости – с помощью гравия размером 2 см и 1 см.

Таким образом, была смонтирована экспериментальная установка русла с односторонней шероховатой поймой для условий сходящихся потоков, план и профиль которой представлены на рисунке 2.4

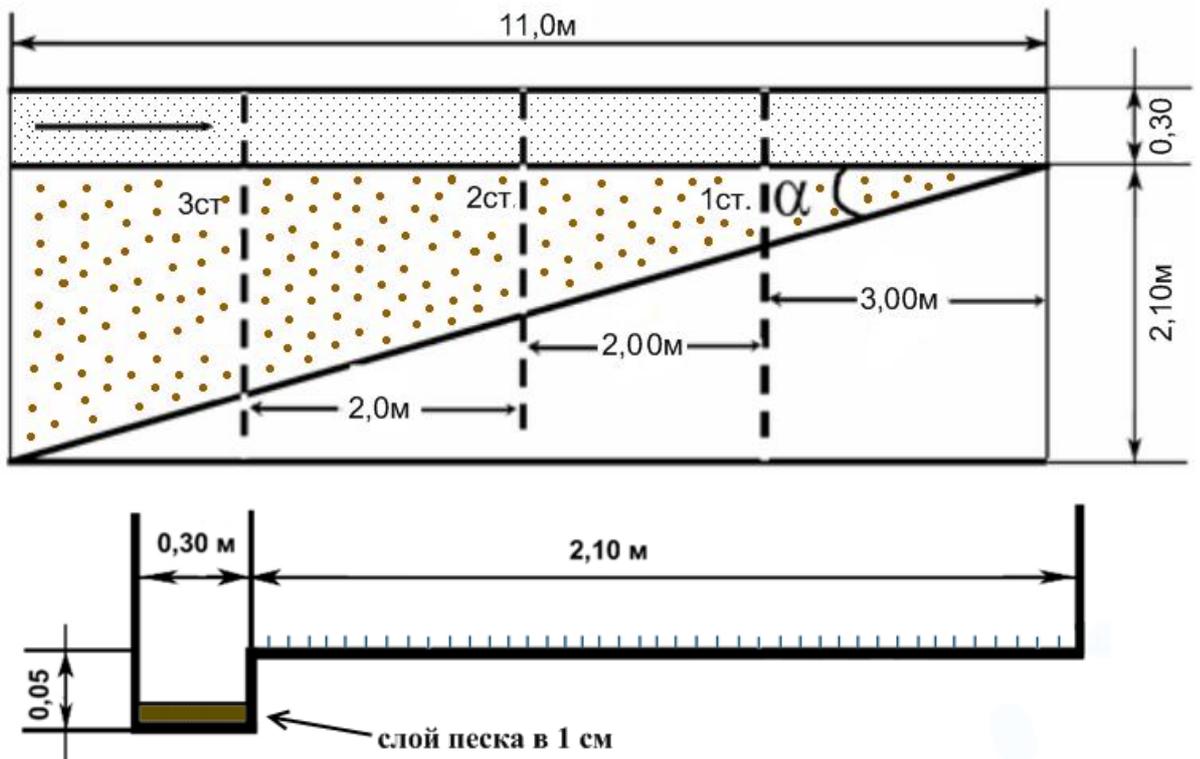


Рисунок 2.4 – План и сечение экспериментальной установки, где угол  $\alpha$  изменялся через  $5^\circ$ , т.е.  $5^\circ$ ,  $10^\circ$ ,  $15^\circ$  и  $20^\circ$ .

### **Методика проведения лабораторных экспериментов на модифицированной экспериментальной модели русла с поймой**

Дно русла было выложено равномерным слоем песка толщиной в 1 см. Чтобы песок не смывался, в конце русла по всей его ширине был установлен жесткий порог высотой в 1 см.

Для регулирования гидравлического режима потока, выходное отверстие установки было снабжено специальными жалюзи.

По бокам установки были расположены рельсы, по которым вдоль всей площадки перемещался металлический каркас, с установленной на нем тележкой, перемещающейся поперек лотка. На этой тележке был закреплен штатив для микровертушки и игольчатый шпиген-масштаб.

Измерительный комплекс для данной лабораторной установки не подлежит изменению, так как основной результат оценки геоинформационной системы не предполагает пересмотра основных принятых параметров, которые использовались при проектировании данной экспериментальной модели. Краткое описание оборудования представлено в таблице 2.1

Таблица 2.1 – приборный состав

Наименование оборудования	Измеряемая характеристика и форма представления	Диапазон измерения	Приборная погрешность
Микровертушка ГМЦМ-1	скорость течения (м/с)	0,03-6,0	1 – 3 %
Игольчатый шпиген-масштаб	отметки глубин и уровней (м)	0,001 – 0,2	1 – 2 %

Треугольный водослив	расход воды (м <sup>3</sup> /с)	0,001 – 0,1	1 – 2 %
Таймер	время проведения различных этапов эксперимента (с)	1-14400	1%
Аналитические весы	масса наносов (кг)	0,1-50	1 – 2 %

### План проведения экспериментов

План проведения экспериментов предполагал: представить и описать перечень моделируемых потоков, по которым будет приниматься решение.

Для проведения экспериментальных исследований были заданы следующие исходные данные (табл.2.2).

Таблица 2.2 – исходные данные

Тип	Наименование и форма представления	Диапазон измерения	Примечания
Характеристики водяного потока	Температура (°С)	8 – 15	
	Ph	6,0	
	Плотность (кг/м <sup>3</sup> )	1000	
	Давление (кгс/см <sup>2</sup> )	4 – 6	
	Расход (м <sup>3</sup> /с)	0,03 – 0,06	
Характеристики наносов	Крупность (мм)	0,15 – 0,2	Тип грунта: мелкозернистый песок
	Удельный вес	1700 – 1800	

	грунта (кг/м <sup>3</sup> )		
Характеристики лабораторной установки	Угол между геометрическими осями потоков ( $\alpha$ )	5° – 20°	
	Уклон (‰)	1 и 3	
Характеристики русла	Уровень бровки русла ( $h_{р.б.}$ , м)	0,06	Уровень, при котором начинается выход воды на пойму
	Глубина в русле (м)	0,06 – 0,14	
Характеристики поймы	Тип подстилающей поверхности поймы	1 и 2	Гладкая/шероховатая
	Высота зерен шероховатости (см)	1 – 2	Тип шероховатости: гравий
Расположение створов	Количество створов	3	На каждом створе располагаются вертикали, на которых производятся измерения скоростей
	Расстояние от входного	3 м, 5 м и 7 м	

	отверстия		
Расположение вертикалей	Количество вертикалей	21	По 7 на каждом створе (3 – для русловой части, 3 – для пойменной и 1 – на бровке русла).
	Количество точек на каждой вертикали	6 – 14	Точки на каждой вертикали, на которых производились измерения скоростей потока, располагались через 1 см уровня воды по всей амплитуде

Расположение вертикалей по створам показано на рис.2.5.

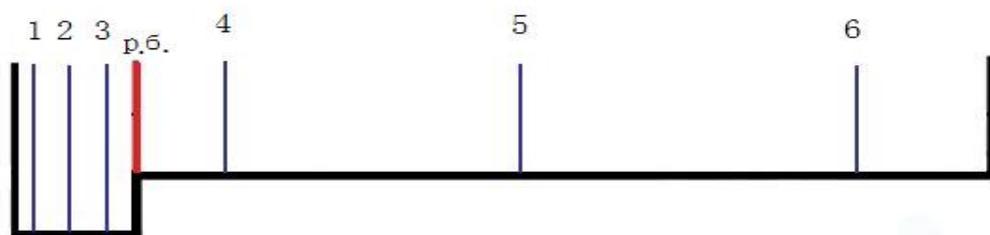


Рисунок 2.5 Расположение скоростных вертикалей в створе измерений

#### Методика реализации экспериментальных исследований:

Время средней продолжительности эксперимента: 4 часа, описание этапов представлено в таблице 2.3.

Таблица 2.3 – этапы проведения эксперимента

№	этапа	Время проведения	Описание
---	-------	------------------	----------

эксперимента		
1	15 – 20 мин	Подача воды – вода подается в соответствии с требованиями по температуре, давлению, плотности и расхода за время до 20 мин. для регулирования необходимого уровня и установка спокойного режима течения, выравнивание дна русла при помощи слоя песка в 1 см, подача наносов.
2	2 – 3,5 часа	Измерение скоростей на вертикалях по всей амплитуде уровней через 1 см уровня воды, отбор проб на гранулометрический состав, измерение геометрических характеристик донных гряд в условиях стационарного водного потока
3	30 – 45 мин	Отключение насоса, определение массы наносов, попавшей в пескоулавливающее устройство (без высушивания).

При проведении эксперимента осуществлялась подача водного потока на установку с наносной станции (насос модели К-150-125-250). Время для установления необходимого режима потока 15-20 мин. Режим движения воды должен быть спокойным, что характеризуется числом Фруда меньшим единицы:

$$Fr = \frac{v}{\sqrt{gh}} \quad , \quad (2.1)$$

где

$v$  – средняя скорость потока, м/с;

$g$ - ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;

$h$  – глубина, м.

Число Фруда характеризует соотношение между силой инерции и внешней силой, в поле которой происходит движение, которые в свою очередь действуют на элементарный объем жидкости. При фиксированных значениях  $g$  и  $h$  число Фруда прямо пропорционально скорости потока.

Так как при расчетах гидравлических характеристик для потоков, их движение, как правило, должно быть квазиравномерным, уклоны водной поверхности должны быть равны уклонам дна. Однако, для условий прохождения паводков по затопленным поймам, движение руслового потока не является равномерным, а, значит, уклоны водной поверхности не равны уклонам дна. При этом характер изменения уклонов водной поверхности определяется типом взаимодействия руслового и пойменного потоков.

Подача наносов осуществлялась вручную при помощи лотка, закрепленного на металлическом каркасе на входе установки, и соответствовала транспортирующей способности потока.

Шпицен-масштаб и микровертушка ГМЦМ-1 (полные технические характеристики представлены в приложении В) закреплены на подвижном металлическом каркасе, который перемещается поперек установки, закрепленном на тележке, перемещающейся вдоль установки. Лопасты микровертушки совпадают с положением иглы шпицен-масштаба. При перемещении по створам металлической тележки осуществлялись измерения скоростей на вертикалях, а также на бровке русла, соответствующей уровню затопления поймы. Для измерения скоростей и уровней игла шпицен-масштаба с закрепленной на ней вертушкой погружались в поток, и показания снимались через каждый сантиметр уровня воды, также включался датчик вертушки, каждые 30 секунд фиксировалось значение скорости в данной точке.

Во время проведения экспериментов одновременно проводился отбор проб наносов на определение их гранулометрического состава для оценки

расчетных значений крупности наносов ( $d$ ), используемых в расчетах по формулам для определения транспортирующей способности потока.

Полный список измеряемых характеристик представлен в таблице 2.4.

Необходимо отметить, что при малых значениях скоростей потока наносы в русле перемещались в основном сальтацией и влечением, а при увеличении скоростей формировался грядовый режим их перемещения, когда же скорости достигали максимальных значений, наносы снова начинали перемещаться влечением и фактически сплошным слоем.

Таблица 2.4 – измеряемые характеристики

Наименование величины	Форма представления	Точность измерения
Уровень	м	0,001
Глубина	м	0,001
Скорость потока	м/с	0,005
Расход воды	м <sup>3</sup> /с	0,001
Высота и ширина донной гряды	м	0,005
Масса наносов	кг	0,001
Гранулометрический состав наносов	мм	0,01

В ходе экспериментальной работы проводились измерения уровней и глубин потока с точностью замера 1 мм. Погрешность измерения уровней воды уровнемером типа шпиген-масштаб зависит от волнения водной поверхности и находится в пределах 1 - 3 %.

Расходы воды рассчитывались по методу скорость-площадь и контролировались с помощью треугольного мерного водослива с углом 90°.

Перед проведением опытов водослив тарировался. Определялся «0» водослива, а затем объемным способом определялся расход, проходящий через мерный водослив. Тарировка производилась с целью определения уровней и расходов воды. Результаты тарировки удовлетворительно совпали с результатами, полученными по формуле для расчета незатопленного треугольного водослива с тонкой стенкой:

$$Q = 1,343H^{2,5}, \quad (2.2)$$

где  $H$  - возвышение уровня воды верхнего бьефа над центром тяжести водосливного отверстия.

- погрешность данных измерений по треугольному водосливу не превышает 2 %.

Для исключения погрешностей измерений было рассчитано среднее значение расхода воды по выражению  $\bar{Q} = \Sigma Q_i / 3$ , которое отличалось от измеренного по водосливу на величину до 3 %. Далее измеренные расходы воды в каждом створе были приведены к их среднему значению с помощью поправочного коэффициента.

Так как движение наносов происходило в форме донных гряд, стало возможным измерить характеристики наиболее крупных из них в конце каждого эксперимента. В частности, измерялись: высота и длина гряды, а также скорости их перемещения.

Масса наносов, поступивших за время проведения эксперимента, была определена после высушивания грунта и последующего его взвешивания. Высушивание грунта проводилось в лабораторном сушильном шкафу модели 2В-151.

Таким образом, методика проведения экспериментальных исследований предполагает:

- формирование системы оценки влияния параметров подстилающей поверхности поймы на транспорт донных наносов в русловом потоке при взаимодействии с пойменным;

- возможности лабораторных исследований закономерностей транспортирующей способности руслового потока при влиянии на него пойменного для различных типов взаимодействия.

Реализация модифицированной методики проведения лабораторных экспериментов потребовала совершенствования алгоритмов и информационных систем формализации полученных научных результатов.

## 2.2 Алгоритм обработки данных

В процессе проведения экспериментальной работы, данные нуждаются в дальнейшей обработке, блок-схема алгоритма обработки представлена на рис. 2.6.

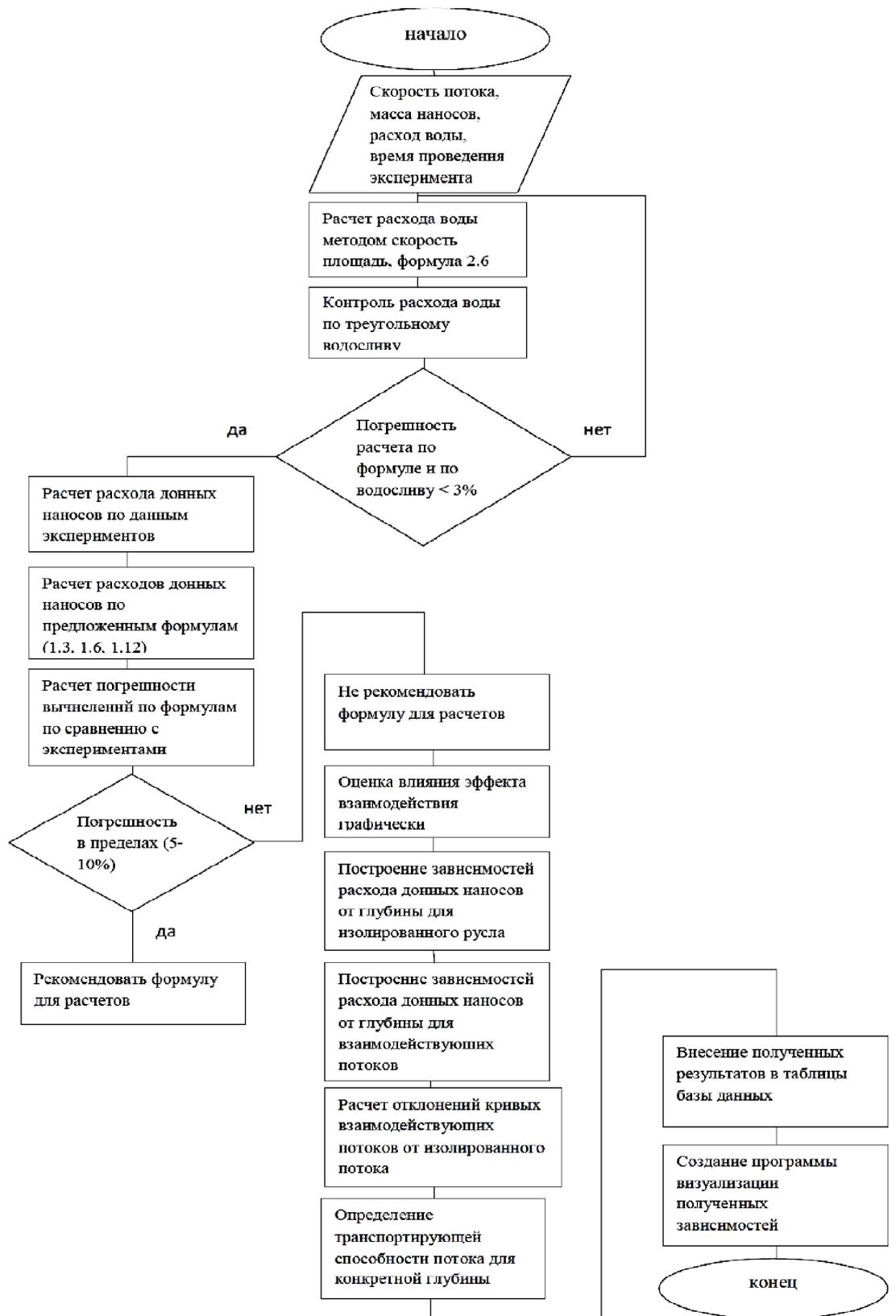


Рисунок 2.6 – Алгоритм обработки данных экспериментальных измерений.

**Составляющие алгоритма** включают определенные действия:

После выполнения экспериментальной части, включавшей в себя в основном измерения скоростей, производились взвешивания наносов, попавших в ловушку за время эксперимента (блок 1).

Расходы воды были рассчитаны методом скорость-площадь (блок 2), и контролировались с помощью предварительно протарированного тонкостенного треугольного водослива (блок 3, 4).

Расход воды ( $Q$ ) определяется как произведение площади водного сечения потока ( $\omega$ ) на его среднюю скорость ( $v_{cp}$ ):

$$Q = \omega v_{cp} \text{ (м}^3\text{/с)} \quad (2.3)$$

При определении гидрометрической вертушкой общий расход ( $Q$ ) равен:

$$Q = k \cdot v_1 \cdot \omega_1 + (v_1 + v_2) \cdot \omega_2 / 2 + \dots + (v_{n-1} + v_n) \cdot \omega_n / 2 + k \cdot v_n \cdot \omega_{n+1}, \quad (2.4)$$

где  $v_1, v_2, \dots$  - средние скорости на вертикалях (м/с);  $\omega_1$  - площадь водного сечения между берегом и первой скоростной вертикалью (м<sup>2</sup>);  $\omega_2, \omega_3, \dots$  - площади между скоростными вертикалями;  $\omega_{n+1}$  - площадь между последней скоростной вертикалью и берегом;  $k$  - коэффициент для скоростей на прибрежных вертикалях, принимаемых по табл. 2.5.

Таблица 2.5 - значение коэффициента  $k$  для скоростей на прибрежных вертикалях

Условия прибрежных зон	Значение коэффициента
Пологий берег с глубиной на урезе $h = 0$ м	0,7
Обрывистый берег или неровная стенка	0,8
Гладкая стенка	0,9
Наличие мертвого пространства	0,5

Средняя скорость на вертикалях ( $v_i$ ) при основном (двухточечном) способе определяется по формуле:

$$v_i = (v_{0,2h} + v_{0,8h})/2 \text{ (м/с)}, \quad (2.5)$$

где  $v_{0,2h}$  и  $v_{0,8h}$  скорости в точках наблюдения на глубинах соответственно 0,2 и 0,8 от всей глубины вертикали ( $h$ ). Площадь между скоростными вертикалями определяется путем суммирования площадей между промерными вертикалями.

Если поверхность ложа потока неоднородна по степени шероховатости, то скорость определяется для каждого индивидуального участка. Общий расход находится путем суммирования расходов воды на этих участках по формуле:

$$Q = \sum(\omega_i \cdot v_{i\text{cp}}), \quad (2.6)$$

где  $v_i$  - средняя скорость воды в пределах отдельного участка потока;  $\omega_i$  - площадь водного сечения этого участка.

Расход наносов ( $g_s$ ) (блок 5-9), перемещающихся по дну в форме влечения через единицу ширины русла, равен произведению скорости перемещения частиц ( $v_s$ ) на толщину перемещающегося слоя ( $d_{\text{сл}}$ ), соответствующий диаметру перемещающихся частиц, и на добавочный коэффициент ( $m$ ), который учитывает отсутствие сплошности движения частиц.

$$g_s = m \cdot v_s \cdot d_{\text{сл}}, \quad (2.7)$$

где  $m$  - динамический коэффициент сплошности, который представляет собой отношение движущихся частиц ко всему объему частиц в слое с толщиной  $d_{\text{сл}}$ .

Скорость перемещения частиц, определенная по экспериментальным данным, была также получена по соотношению:

$$v_s = v_{\text{cp}} - v_n, \quad (2.8)$$

где

$v_{\text{cp}}$  - средняя по глубине скорость потока,

$v_H$  – неразмывающая скорость - предельная скорость потока, при которой отлагаются наносы, которая рассчитывается по формуле Г.И. Шамова [24]:

$$v_H = 6d^{1/3}h^{1/6} \quad (2.9)$$

Для оценки динамики донных наносов необходимо знать их гранулометрический состав, плотность отложений ( $\rho_s$ ) и начальное напряжение сдвига частицы ( $\tau_0$ ), которое оценивается при помощи неразмывающей скорости ( $v_H$ ) [72], для чего они были выражены через динамическую скорость  $v_*$ .

Уменьшение динамической скорости, связанное с уменьшением уклона или глубины по длине потока, приводит к уменьшению диаметра частиц грунта, осаждающихся в русле [73].

$$v_* = \sqrt{\tau_0 / \rho_B} \quad (2.10)$$

где  $\rho_B$  - плотность воды (1000 кг/м<sup>3</sup>).

$$v_H = \frac{C}{\sqrt{g}} v_* \quad (2.11)$$

где

$C$  – коэффициент Шези,

$g$  – ускорение свободного падения (9,8 м/с<sup>2</sup>).

Из уравнений (2.10) и (2.11) следует

$$\tau_0 = \rho_B g \frac{v_H^2}{C^2} \quad (2.12)$$

Коэффициент Шези был определен с помощью формулы Маннинга:

$$C = h^{1/6}/n \quad (2.13)$$

где  $n$  – коэффициент шероховатости.

Динамическая скорость  $v_H$  была определена по формуле (2.8) при  $d=d_{cp}$ , т.е. для размера частиц грунта 0,2 мм.

Откуда следует выражение для  $\tau_0$ :

$$\tau_0 = 36 \rho_B g n^2 d^{2/3} \quad (2.14)$$

Плотность донных отложений  $\rho$  зависит от пористости грунта  $\sigma$  (0,3 – 0,36 для песков), и рассчитывается по формуле:

$$\rho = (1 - \sigma)\rho_s + \sigma \rho_v, \quad (2.15)$$

где  $\rho_s$  – насыпная плотность твердой фракции (для мелкого песка 2600 кг/м<sup>3</sup>).

Для анализа полученных данных были построены графические зависимости расходов донных наносов от глубины потока при различных углах между взаимодействующими потоками и при изолированном русловом потоке (блок 10 - 12).

По оси абсцисс откладывались значения максимальной глубины, при которой проводился эксперимент, а по оси ординат – значения измеренных расходов донных наносов, которые соответствовали транспортирующей способности потока.

После нанесения соответствующих точек на координатной плоскости, они были соединены между собой при использовании кубических кривых Безье [74], задаваемых выражением:

$$B(t) = \sum_{i=0}^n P_i b_{i,n}(t), \quad 0 \leq t \leq 1, \quad (2.16)$$

где

$P_i$  - функция компонент векторов опорных вершин;

$b_{i,n}(t)$  – базисные функции кривой Безье.

$$b_{i,n}(t) = \binom{n}{i} t^i (1-t)^{n-i}, \quad (2.17)$$

где  $\binom{n}{i}$  - число сочетаний из  $n$  по  $i$ :

$$\binom{n}{i} = \frac{n!}{i!(n-i)!}, \quad (2.18)$$

где

$n$  – степень полинома,

$i$  – порядковый номер опорной вершины.

В параметрической форме кубическая кривая Безье ( $n = 3$ ) описывается следующим уравнением:

$$B(t) = (1-t)^3 P_0 + 3t(1-t)^2 P_1 + 3t^2(1-t) P_2 + t^3 P_3, \quad t \in [0; 1] \quad (2.19)$$

Четыре опорные точки  $P_0, P_1, P_2$  и  $P_3$ , заданные в 2- или 3-мерном пространстве, определяют форму кривой.

В матричной форме кубическая кривая Безье записывается следующим образом:

$$B(t) = [t^3 \ t^2 \ t \ 1] M_B \begin{bmatrix} P_0 \\ P_1 \\ P_2 \\ P_3 \end{bmatrix} \quad (2.19)$$

где  $M_B$  называется базисной матрицей Безье:

$$M_B = \begin{bmatrix} -1 & 3 & -3 & 1 \\ 3 & -6 & 3 & 0 \\ -3 & 3 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.20)$$

Вместо  $P_i$  подставляются координаты  $i$ -й опорной точки  $(x_i, y_i)$ .

Эти уравнения векторные, то есть для каждой из координат:

$$x = (1-t)^2 x_1 + 2(1-t)t x_2 + t^2 x_3 \quad (2.21)$$

$$y = (1-t)^2 y_1 + 2(1-t)t y_2 + t^2 y_3 \quad (2.22)$$

Вместо  $x_1, y_1, x_2, y_2, x_3, y_3$  подставляются координаты трех опорных точек, а  $t$  определяет направление кривой.

После построения кривых рассчитывались отклонения полученных зависимостей от кривой для изолированного руслового потока (блок 13), представляющие собой значения транспортирующей способности руслового потока при влиянии на него пойменного на различных глубинах (блок 14), и эти данные впоследствии записывались в табличной форме (блок 15), что составляло основу разработанной базы данных экспериментальных исследований.

### 2.3. Структура и содержание базы данных экспериментальных исследований

База данных представляет собой основу для получения закономерностей, которые входят в состав базы знаний геоинформационной системы.

Цель формирования базы данных: обеспечение управленческих решений.

Для этого необходимо собрать в единое информационное поле все результаты экспериментальных исследований по выявлению влияния эффекта взаимодействия руслового и пойменного потоков на транспорт донных наносов.

Задачи: обобщить и систематизировать данные измерений лабораторных экспериментов с возможностью дальнейшего дополнения и расширения БД.

В данной работе на основе поставленной цели были исследованы следующие **закономерности функционирования речных геосистем:**

- изменение транспортирующей способности руслового потока под воздействием на него пойменного;
- выявление влияния эффекта взаимодействия руслового и пойменного потоков при различных углах между их динамическими осями;
- выявление влияния типа подстилающей поверхности поймы на полученные закономерности.

Для выявления этих закономерностей необходимо сформировать данные, представленные в таблице 2.6:

Таблица 2.6 – типы данных

Тип данных	Наименование	Форма представлен ия	Диапазон изменения
Данные полученные из внешних источников	Длина установки	м	6 – 11
	Ширина поймы	м	0 – 2,1
	Ширина русла	м	0,03
	Глубина русла	м	0,005

	Уклон	‰	1 и 3
	Крупность наносов	мм	0,1 – 0,2
	Расход подаваемой воды	м <sup>3</sup> /ч	0,03 – 0,06
	Угол $\alpha$	градусы	5 – 20
	Тип взаимодействия	№ типа	2 и 3
	Тип подстилающей поверхности поймы	№ типа	1 и 2 1 – гладкая 2 – шероховатая
	Размер зерен шероховатости	см	1 и 2
Данные, полученные аналитическим путем	Расход воды	м <sup>3</sup> /с	0,002 – 0,05
	Расход донных наносов	г/с	0 – 500
	Число Фруда		0,2 – 0,6
	Коэффициент Шези		40 – 65
	Неразмывающая скорость потока	м/с	0,16 – 0,22
Данные, полученные в результате эксперимента	Скорость потока	м/с	0,05 – 0,7
	Масса наносов	кг	0,1 – 12
	Уровень воды	м	0,06 – 0,14
	Глубина потока	см	0 – 0,12
	Уровень воды над водосливом	м	0,01 – 0,1
	Скорость перемещения донных гряд	м/с	0,005 – 0,1

	Измеренный расход воды	м <sup>3</sup> /с	0,002 – 0,05
	Транспортирующая способность потока	г/с	0 – 500
Данные, полученные в результате оценки качества экспериментов	Расчет расходов донных наносов по предложенным формулам	кг/м/с	0,00005 – 0,35
	Погрешности расчетов по формулам	%	49 – 200
	Расход воды, определенный по треугольному водосливу	м <sup>3</sup> /с	0,002 – 0,05
	Погрешности расчета расходов воды	%	1 – 3

Основу базы данных составляют хранящиеся в ней результаты экспериментальных исследований, представленные в табличной форме, пример на рис.2.7.

База данных экспериментов								
№эксперимента	Тип взаимодействия	Номер типа	Значение угла	Угол в градусах	Тип поймы	Номер типа поймы	Глубина, см	Расход донных наносов, г/с
1	II (расходящиеся оси)	2	5°		5 гладкая	1	6	9,16
2	II (расходящиеся оси)	2	5°		5 гладкая	1	7	12,23
3	II (расходящиеся оси)	2	5°		5 гладкая	1	8	22,16
4	II (расходящиеся оси)	2	5°		5 гладкая	1	9	29,01
5	II (расходящиеся оси)	2	5°		5 гладкая	1	10	35,87
6	II (расходящиеся оси)	2	5°		5 гладкая	1	11	48,32
7	II (расходящиеся оси)	2	5°		5 гладкая	1	12	60,78
8	II (расходящиеся оси)	2	10°		10 гладкая	1	6	12,32
9	II (расходящиеся оси)	2	10°		10 гладкая	1	7	16,96
10	II (расходящиеся оси)	2	10°		10 гладкая	1	8	33,80
11	II (расходящиеся оси)	2	10°		10 гладкая	1	9	45,98
12	II (расходящиеся оси)	2	10°		10 гладкая	1	10	58,17
13	II (расходящиеся оси)	2	10°		10 гладкая	1	11	79,29
14	II (расходящиеся оси)	2	10°		10 гладкая	1	12	100,41
15	II (расходящиеся оси)	2	15°		15 гладкая	1	6	18,90

Рисунок 2.7 – табличная форма представления информации в базе данных

Для организации управления работой базы данных, в ней были сформированы следующие типы объектов:

Таблицы – содержат данные.

Запросы – позволяют задавать условия для отбора данных и вносить изменения в данные.

Формы – позволяют просматривать и редактировать информацию.

Отчеты – позволяют обобщать и распечатывать информацию.

Макросы – это средство, которое позволяет автоматизировать задачи и добавить функциональные возможности в формы, в виде отчетов и элементов управления.

Принципиальная схема СУБД представлена на рис.2.8,

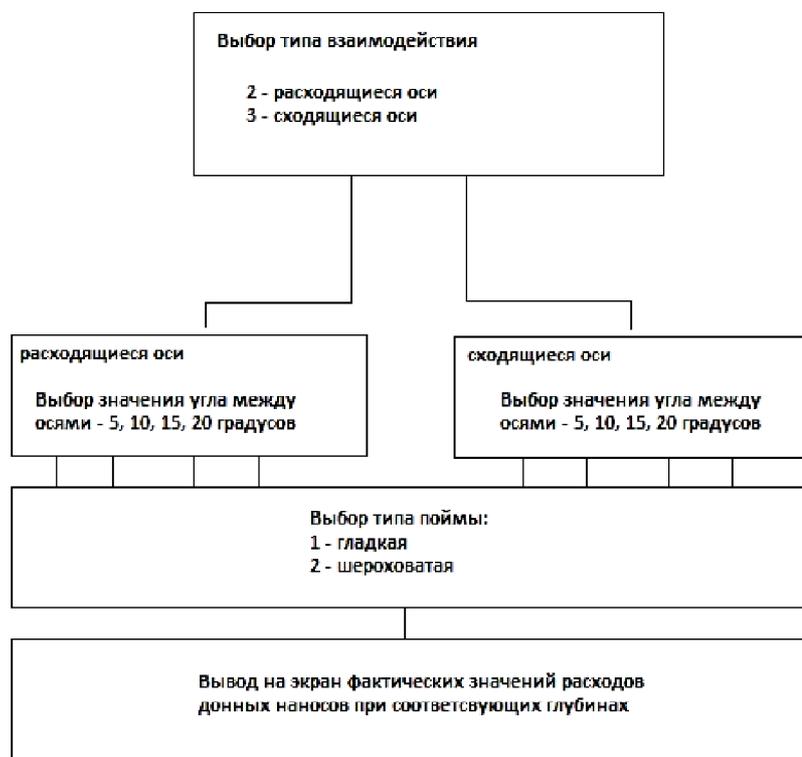


Рисунок 2.8 – Схема СУБД

После осуществления всех запросов данные представляются в табличной форме. На экран выводится отчет с результатами поиска данных, пример которого представлен в таблице 2.7.

Таблица 2.7. Отчет с результатами данных поиска по заданным критериям.

## Результаты

Расход донных наносов, г/с	Тип взаимодействия	Значение угла	Глубина, см	Тип поймы
12,32	II (расходящиеся оси)	10°	6	гладкая
16,96	II (расходящиеся оси)	10°	7	гладкая
33,80	II (расходящиеся оси)	10°	8	гладкая
45,98	II (расходящиеся оси)	10°	9	гладкая
58,17	II (расходящиеся оси)	10°	10	гладкая
79,29	II (расходящиеся оси)	10°	11	гладкая
100,41	II (расходящиеся оси)	10°	12	гладкая

По итогам сравнения с качественными данными предыдущих этапов исследований можно сделать вывод о том, что полученные результаты подтверждают концепцию о значительном влиянии эффекта взаимодействия руслового и пойменного потоков на транспорт донных наносов.

База данных реализована в программном приложении Microsoft Office Access и представлена в табличном виде (Приложение Б).

### Выводы

1. Целями экспериментальных исследований для решения задач диссертации являются:

- оценка влияния эффекта взаимодействия руслового и пойменного потоков на транспортирующую способность руслового потока;
- оценка влияния типа подстилающей поверхности поймы на транспортирующую способность русла.

2. Проведение экспериментальных исследований основывались на **модифицированной методике**, которая основывается на ранее применявшейся в РГГМУ. Совершенствование методики предполагает моделирование шероховатости поймы двух типов.

Полученные результаты позволяют качественно оценить влияние эффекта взаимодействия руслового и пойменного потоков на транспорт донных наносов в стационарных условиях.

3. Для обработки результатов экспериментов разработан **алгоритм**, содержание которого включает:

- расчет расходов воды и наносов по экспериментальным данным
- определение транспортирующей способности руслового потока при его изоляции от пойменного русловом потоке, а также при их взаимодействии;
- оценка погрешностей определяемых величин;
- расчет расходов донных наносов по расчетным формулам, оценка их погрешностей по сравнению с экспериментальными данными;
- построение графических зависимостей транспортирующей способности руслового потока от глубины и типа взаимодействия;
- расчет отклонений полученных зависимостей от кривой для изолированного руслового потока;

Экспериментальные данные были обобщены и представлены в программе визуализации графических зависимостей, разработанной автором

### 3 РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПО ВЫЯВЛЕНИЮ ВЛИЯНИЯ ЭФФЕКТА ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ РУСЛОВОГО И ПОЙМЕННОГО ПОТОКОВ

3.1 Результаты исследования транспортирующей способности руслового потока при гладкой пойме

Первые результаты экспериментальной работы по изучению проблемы влияния эффекта взаимодействия руслового и пойменного потоков на транспорт донных наносов представлены в графической форме на рис.3.1

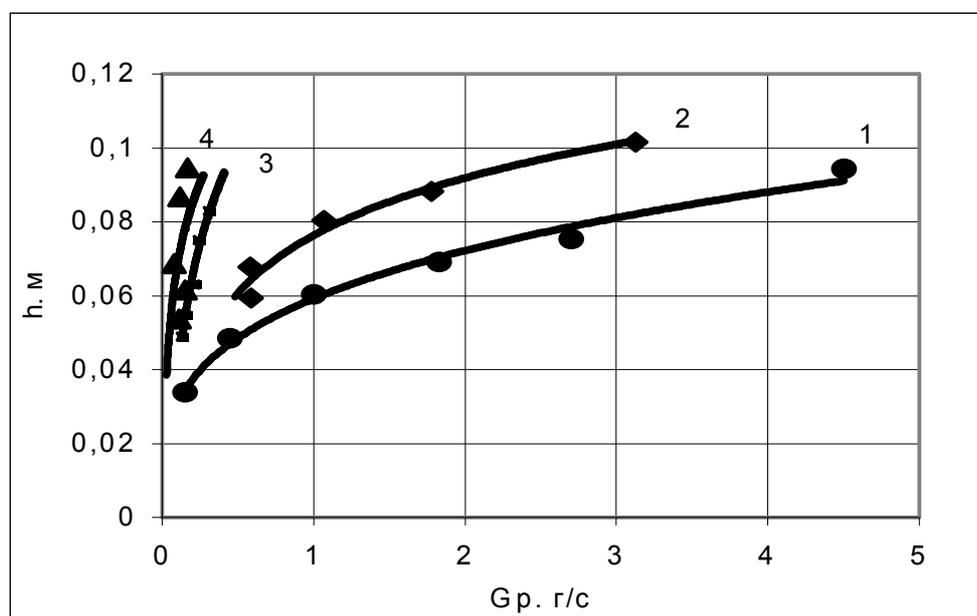


Рисунок 3.1. - Зависимость  $G_p=f(h)$ ,

1 – для условий изолированного руслового потока, 2 – параллельные динамические оси руслового и пойменного потоков, 3,4 – сходящиеся при углах  $20^\circ$  динамические оси для условий гладкой и шероховатой поймы соответственно.

Здесь  $G_p$  – расход наносов в основном русле, г/с,  $h$  – глубина, м.

Из анализа данных, приведенных на рисунке (3.1), следует, что кривая, построенная на основе данных соответствующих условиям взаимодействующих потоков при параллельности их динамических осей, располагается левее от аналогичной кривой, соответствующей условиям изолированного руслового потока. Что означает уменьшение расходов

донных наносов при взаимодействии руслового и пойменного потоков для условий параллельных динамических осей потоков. Причем кривые отображающие зависимости  $G_p=f(h)$  и  $G_p=f(Q)$  располагаются значительно левее по отношению к кривой соответствующей условиям изолированного русла.

Для третьего типа взаимодействия при условиях вторжения пойменного потока в русловую под углом  $20^\circ$ , расход донных наносов уменьшается еще значительней и, соответственно, кривые  $G_p=f(h)$  и  $G_p=f(Q)$  располагаются значительно левее аналогичных кривых, соответствующих условиям параллельности динамических осей.

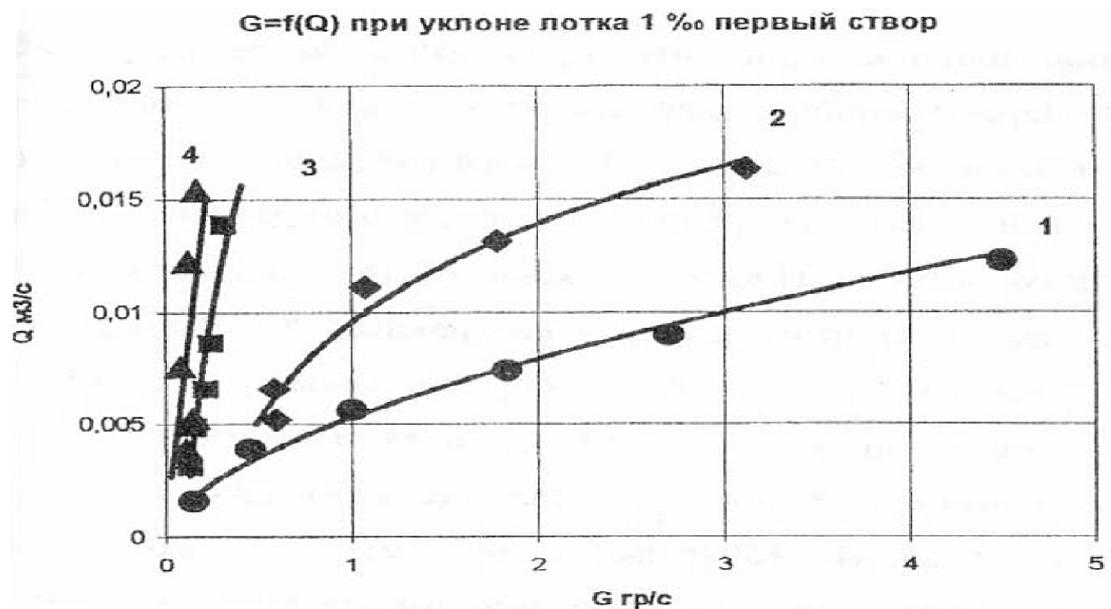


Рисунок 3.2 – Зависимость  $G_p=f(Q)$ , 1 – для условий изолированного руслового потока, 2 – параллельные динамические оси руслового и пойменного потоков, 3,4 – сходящиеся при углах  $20^\circ$  динамические оси для условий гладкой и шероховатой поймы соответственно.

На основании анализа полученных результатов, можно сделать следующие выводы: при параллельности осей взаимодействующих потоков, транспортирующая способность руслового потока уменьшилась приблизительно в 1,5 раза, в случае схождения динамических осей потоков под углом  $20^\circ$  она уменьшилась в 15 раз при гладкой пойме, и в 22 раза при шероховатой пойме.

Следующий этап экспериментальной работы состоял в выявлении влияния эффекта взаимодействия потоков на транспортирующую способность руслового потока при расхождении их осей под углом  $20^\circ$ .

На основе полученных данных о расходах воды и наносов и скоростях течения были построены графические зависимости вида  $G_p/G_{p.б.} = f(h_p/h_{p.б.})$ ,  $G_p/G_{p.б.} = f(Q_p/Q_{p.б.})$ ,  $G_p/G_{p.б.} = f(v_p/v_{p.б.})$ . В качестве примера на рис.3.3 приведена зависимость  $G_p/G_{p.б.} = f(h_p/h_{p.б.})$ .

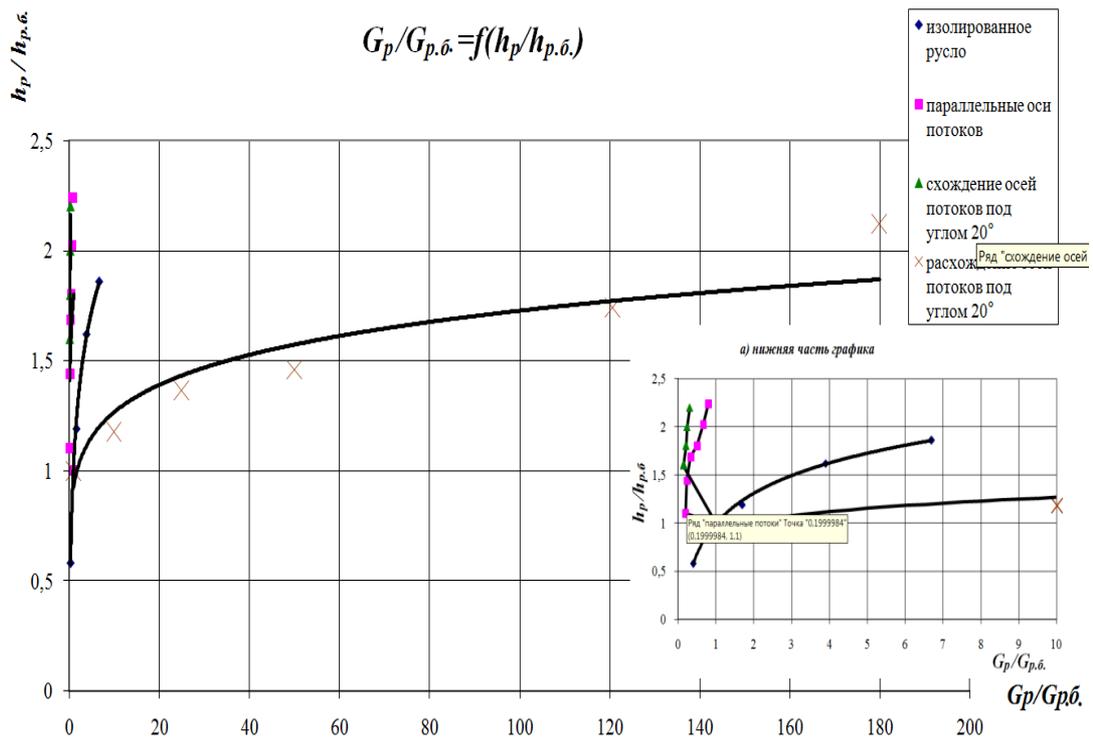


Рисунок 3.3 – Зависимость  $G_p/G_{p.б.} = f(h_p/h_{p.б.})$

Здесь  $G_p$  и  $G_{p.б.}$  – расходы донных наносов в основном русле и при уровне затопления бровки русла,  $h_p$  и  $h_{p.б.}$  – глубины воды в русле и при уровне затопления бровки русла, м.

Следует отметить, что кривая соответствующая зависимости  $G_p/G_{p.б.} = f(h_p/h_{p.б.})$  для условий изолированного руслового потока является однозначной, причем отклонение исходной информации от расчетной кривой не превышает 5%. Тогда как кривые, построенные на основе данных, полученных при условии взаимодействия руслового и пойменного потоков, значительно отклоняются от кривой для изолированного руслового потока. Причем, при расходящихся динамических осях под

углом  $20^\circ$ , что соответствует 2 типу взаимодействия, кривая зависимости  $G_p/G_{p.б.} = f(h_p/h_{p.б.})$  отклоняется в сторону существенного увеличения транспортирующей способности потока (приблизительно в 100 раз), что наглядно продемонстрировано на рисунке 3.3.

Для условий взаимодействия потоков при расхождении динамических осей характерно значительное увеличение скоростей руслового потока при выходе воды на пойму, на которой при этом наблюдалось поступление наносов из основного русла. По мере увеличения оттока воды на пойму и соответствующего уменьшения скоростей и транспортирующей способности русловой составляющей потока, в русле началось формирование переката. Также с учетом регулярной подачи наносов в головной части экспериментальной модели наносы стали перемещаться в донно-грядовом режиме по дну потока.

Существенное уменьшение скорости течения наблюдалось в створе 2 (5 м от входа установки), из-за того, что значительная часть руслового потока вышла на пойму, это обусловило существенное уменьшение скорости потока на нижерасположенном створе и, как следствие, привело к интенсивному отложению наносов в основном русле. Большая часть поступивших на пойму наносов стала перемещаться по ней.

Завершением этого этапа экспериментальных исследований на модели большого размера в лаборатории водных исследований РГГМУ при втором типе взаимодействия руслового и пойменного потоков стала постановка задачи исследования при других типах взаимодействия. Анализ полученных данных подтвердил значимость эффекта взаимодействия и положил основу для дальнейшей многолетней работы.

Основной задачей последующего этапа работы стала количественная оценка степени влияния вышеупомянутого эффекта на транспорт донных наносов русловым потоком, так как данная проблема имеет не только научное, но и большое практическое значение. В 2007 году началась масштабная экспериментальная работа с целью изучения особенности

влияния эффекта взаимодействия руслового и пойменного потоков на транспорт донных наносов в русловом потоке непосредственно при втором типе взаимодействия при различных углах расхождения динамических осей.

На основе проведенных экспериментов, были получены данные о расходах воды и наносов, а также скоростях течения. Результаты обработки этих данных позволили построить графические зависимости, которые представлены на рисунке 3.4 кривыми зависимостей вида  $G_p/G_{p.б.} = f(h_p/h_{p.б.})$ , при расходящихся динамических осях и углах расхождения  $5^\circ$ ,  $10^\circ$  и  $20^\circ$ , совмещенные с данными, полученными в предыдущих этапах экспериментальной работы. Как видно на рисунке, в соответствии с различными углами  $\alpha$ , эти зависимости образуют самостоятельные кривые и располагаются на различных расстояниях от расчетной кривой, построенной для условий изолированного руслового потока.

$$G_p/G_{pб} = f(h_p/h_{pб})$$

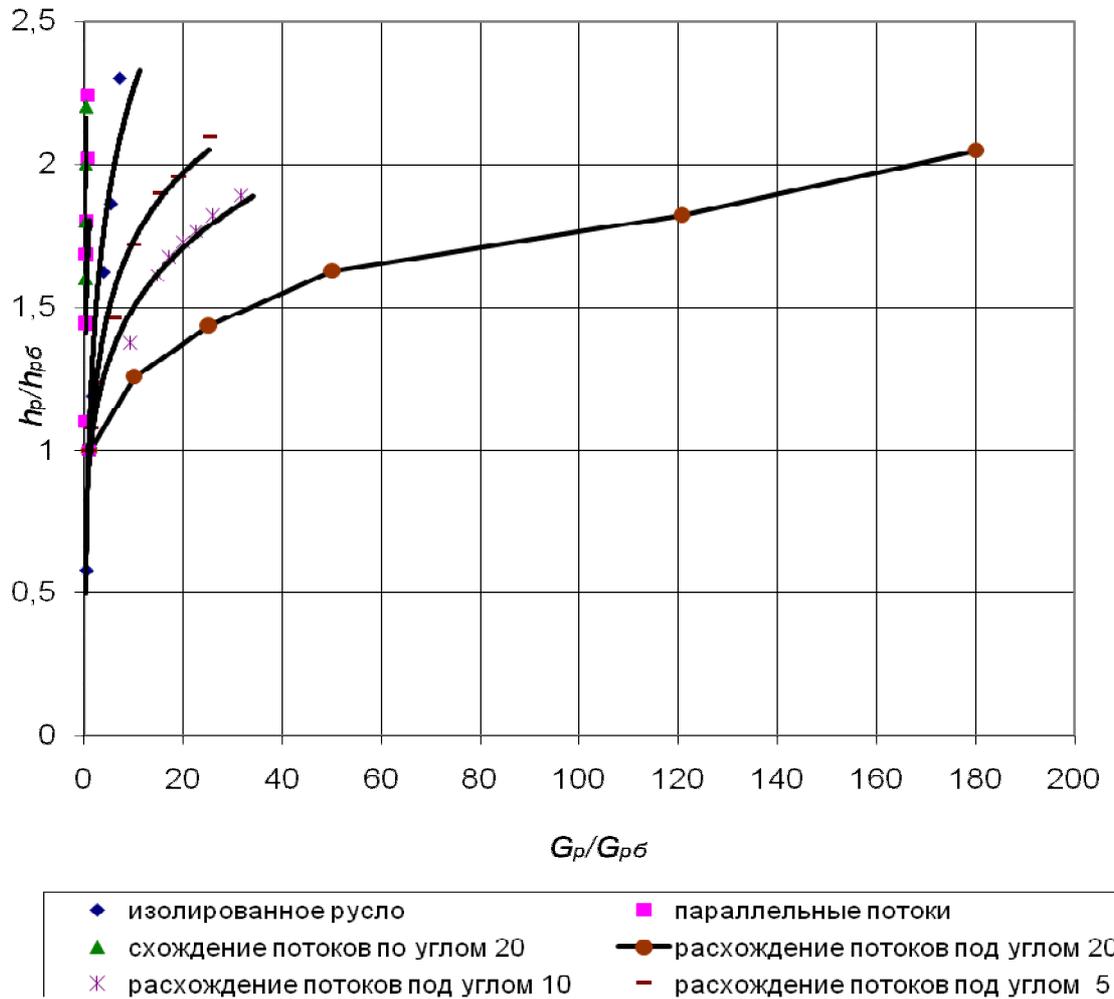


Рисунок 3.4 – Зависимости  $G_p/G_{pб} = f(h_p/h_{pб})$

Кривые, соответствующие зависимостям для условий расходящихся осей, располагаются намного правее расчетной кривой для условий изолированного потока, что свидетельствует о том, что при этих условиях резко возрастает транспортирующая способность руслового потока. Такой характер расположения расчетных кривых объясняется значительным изменением уклонов водной поверхности, обусловленный взаимодействием потоков.

На рисунке 3.5 представлено поле скоростей, полученное по данным измерений. Наибольшее уменьшение скоростей наблюдается на участке расположенном на расстоянии пять метров от входа на модель.

Уменьшение скоростей обусловлено тем, что значительная часть руслового потока вышла на пойму. Этот процесс сопровождался уменьшением уклонов водной поверхности по длине руслового потока, что приводило, в свою очередь, к интенсивному отложению наносов в русле, благодаря чему были сформированы перекаты, и значительная часть наносов стала перемещаться на пойму. Часть поступивших на пойму наносов либо оседала на ней, либо продолжала перемещаться по ней в донно-грядовой форме.

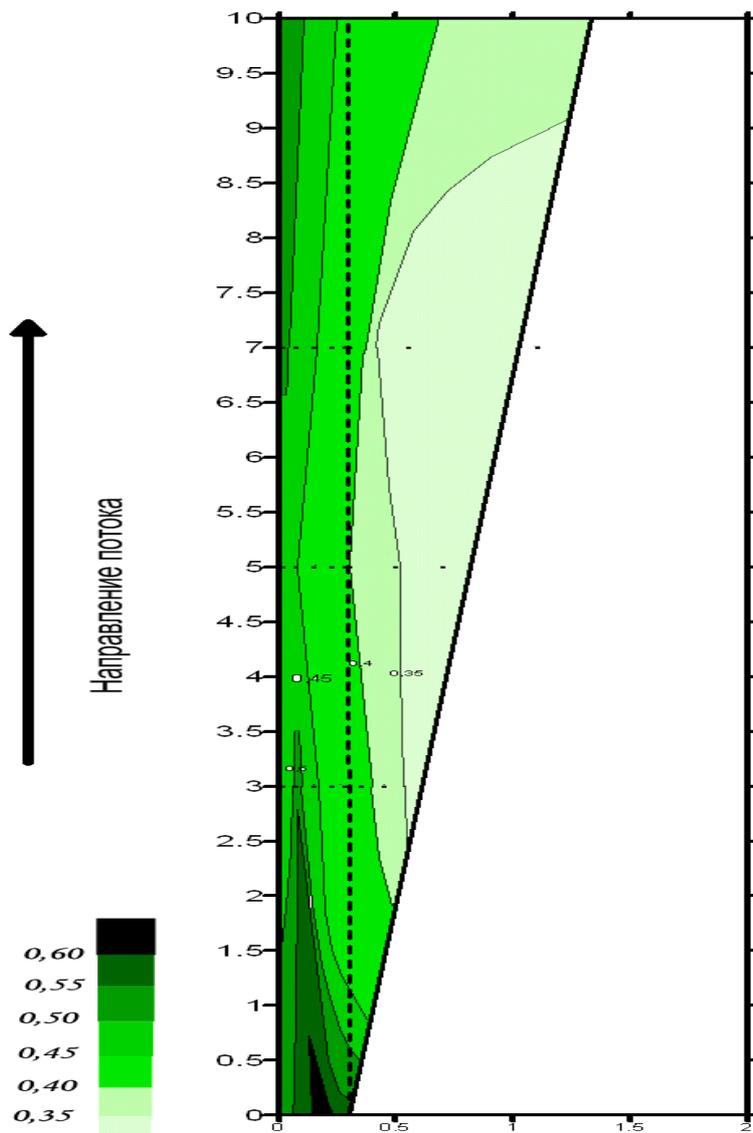


Рисунок 3.5 – Поле скоростей потока при расхождении динамических осей под углом  $20^\circ$  (2-ой тип взаимодействия)

В 2008 году были продолжены исследования по выявлению влияния эффекта взаимодействия руслового и пойменного потоков на транспортирующую способность руслового потока на физической модели русла с односторонней поймой. Теперь объектом исследований стал третий тип взаимодействия, т.е. при условии схождения динамических осей потоков под различными углами –  $5^\circ$ ,  $10^\circ$ ,  $15^\circ$  и  $20^\circ$  при гладкой пойме.

Как и в предыдущей серии экспериментов, на основе экспериментальных данных были построены зависимости вида  $G_p = f(h_p)$ ,  $G_p = f(Q_p)$ ,  $G_p = f(v_p)$  как в абсолютных, так и в относительных координатах.

Из анализа данных, представленных на рисунке 3.6 следует, что кривая зависимости  $G_p = f(h_p)$  при схождении динамических осей взаимодействующих потоков существенно отклоняется от кривой для условий изолированного руслового потока. Причем, вся серия этих кривых при разных значениях углов  $\alpha$  отклоняется влево, т.е. в сторону уменьшения транспортирующей способности руслового потока. Также следует отметить, что величина этого отклонения возрастает при увеличении угла схождения осей потоков.

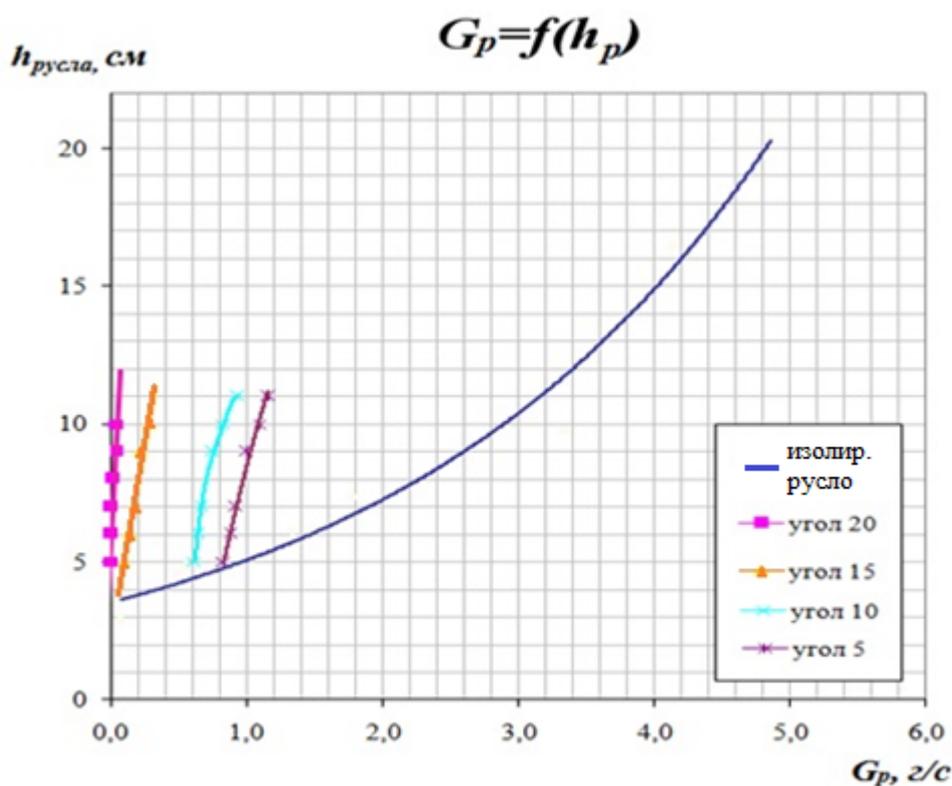


Рисунок 3.6 – Зависимость  $G_p=f(h_p)$  для условий сходящихся осей потоков

По данным, полученным по этим кривым, для фиксированных значений глубин руслового потока  $h = 6\text{см}, 8\text{см}, 10\text{см}$  были определены значения расходов донных наносов  $G_{\text{изм}}$ , на основе которых были построены зависимости вида  $\Delta G=f(\alpha)$ , где  $\Delta G=G- G_{\text{изм}}$ ,

где  $G$  – транспортирующая способность изолированного от поймы руслового потока.

Полученные нелинейные зависимости были скорректированы линейным трендом и представлены на рис.3.7. Угол, которые образуют линии тренда с осью абсцисс равен  $26^\circ$ . На рисунке видно, что при глубинах от 6 до 8 см значения расходов донных наносов изменились на 1,5 г/с, а для глубин от 8 до 10 см эта разница уже составляла 2,1 г/с.

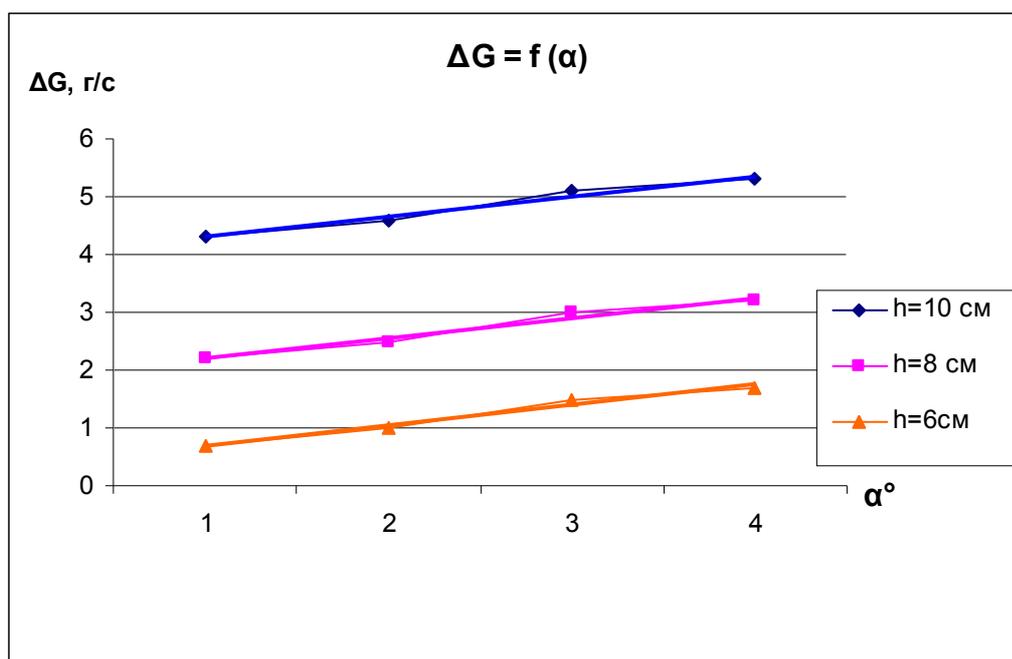


Рисунок 3.7 – Зависимости  $\Delta G=f(\alpha)$

Кривые на рисунке 3.8 наглядно демонстрируют тормозящий эффект, который возникает при вторжении пойменного потока в русловую. Причем наблюдается резкое уменьшение скоростей руслового потока, что, в свою очередь, влечет за собой уменьшение транспортирующей способности руслового потока.

Выполнен анализ изменения средних скоростей руслового потока под воздействием пойменного потока при различных углах схождения динамических осей этих потоков (рис.3.8). Как видно на рисунке, скорости русловой составляющей резко уменьшаются по сравнению с аналогичным потоком, но в условиях его изоляции от пойменного потока. При этом прослеживается четкая зависимость уменьшения этих скоростей при увеличении угла  $\alpha$ . Действительно, величина уменьшения средней скорости руслового потока при  $h=8$  см и угле  $\alpha=10^\circ$  составляет 0,27 см/с, а при угле  $\alpha=20^\circ$  соответственно 0,45 см/с, т.е. в 2 раза больше.

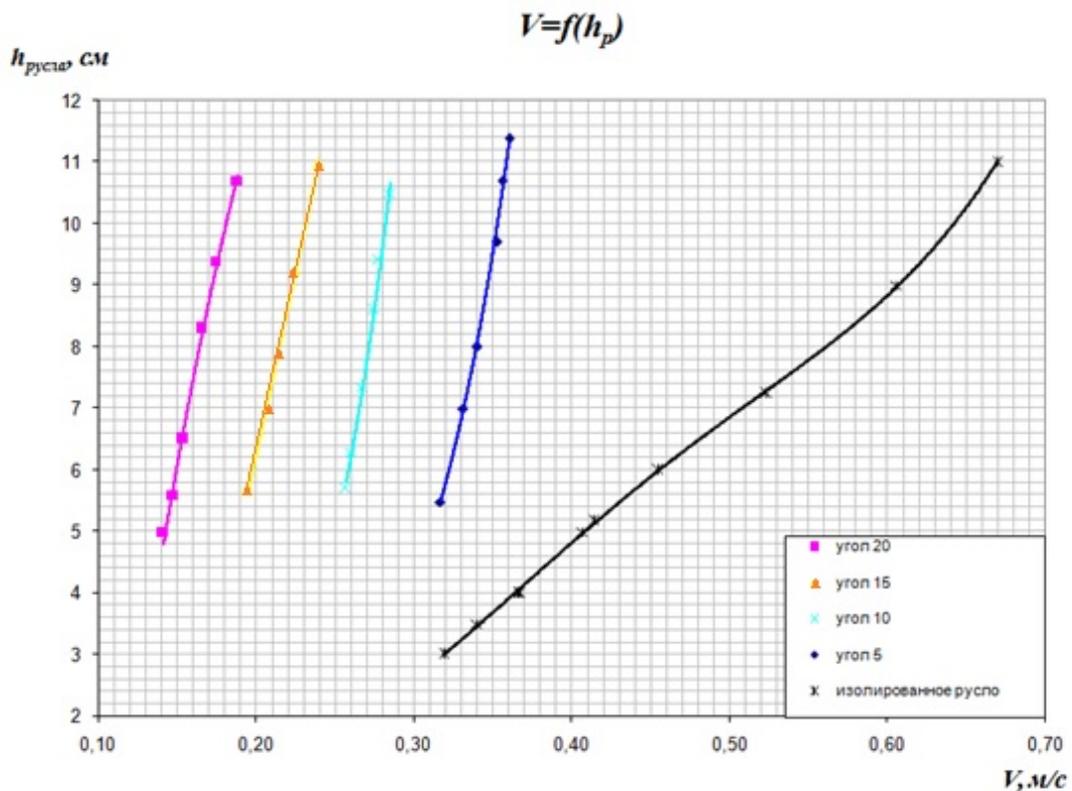


Рисунок 3.8 – Зависимость  $v=f(h_p)$  при условии сходящихся динамических осей при гладкой пойме.

Общая концепция о резком снижении транспортирующей способности руслового потока под влиянием пойменного для условий схождения динамических осей потоков, т.е. при третьем типе взаимодействия, также подтверждается зависимостями вида  $G_p/G_{p.б.}=f(h_p/h_{p.б.})$  и  $G_p/G_{p.б.}=f(Q_p/Q_{p.б.})$ , приведенными на рисунках 3.9 и 3.10. Таким образом, величина

уменьшения транспортирующей способности руслового потока находится в прямой зависимости от угла схождения динамических осей потоков.

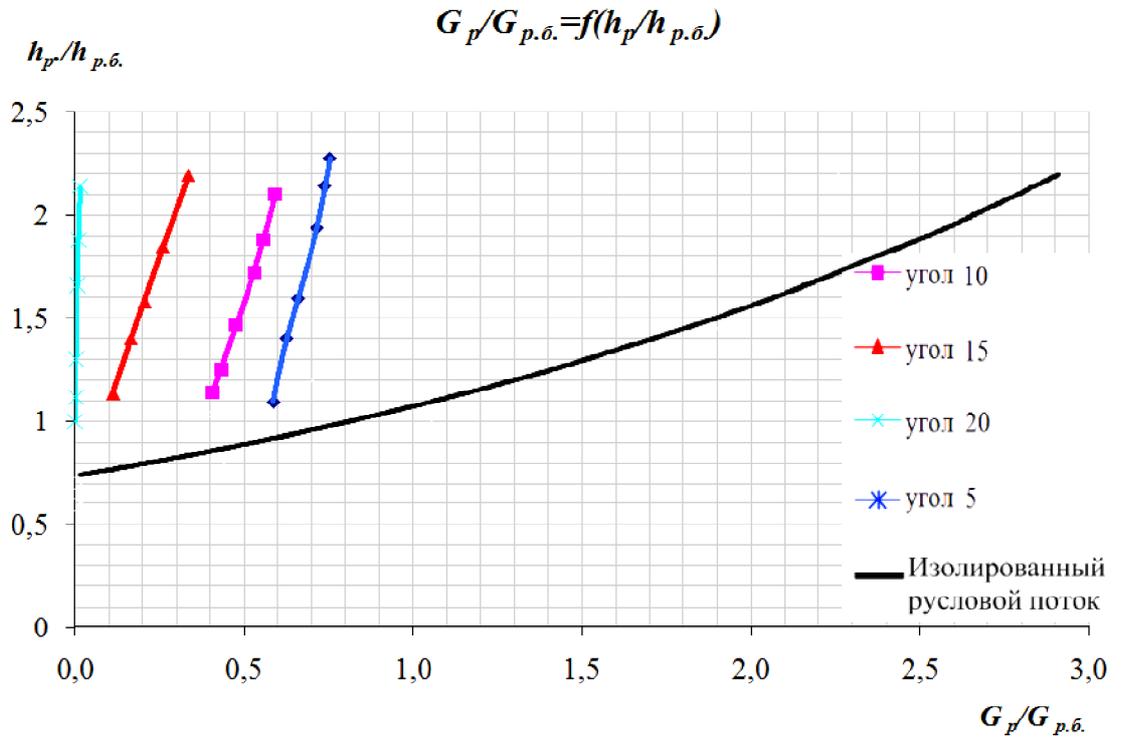


Рисунок 3.9 – Зависимости  $G_p/G_{p.б.} = f(h_p/h_{p.б.})$ , 3 тип взаимодействия (сходящиеся динамические оси), гладкая пойма.

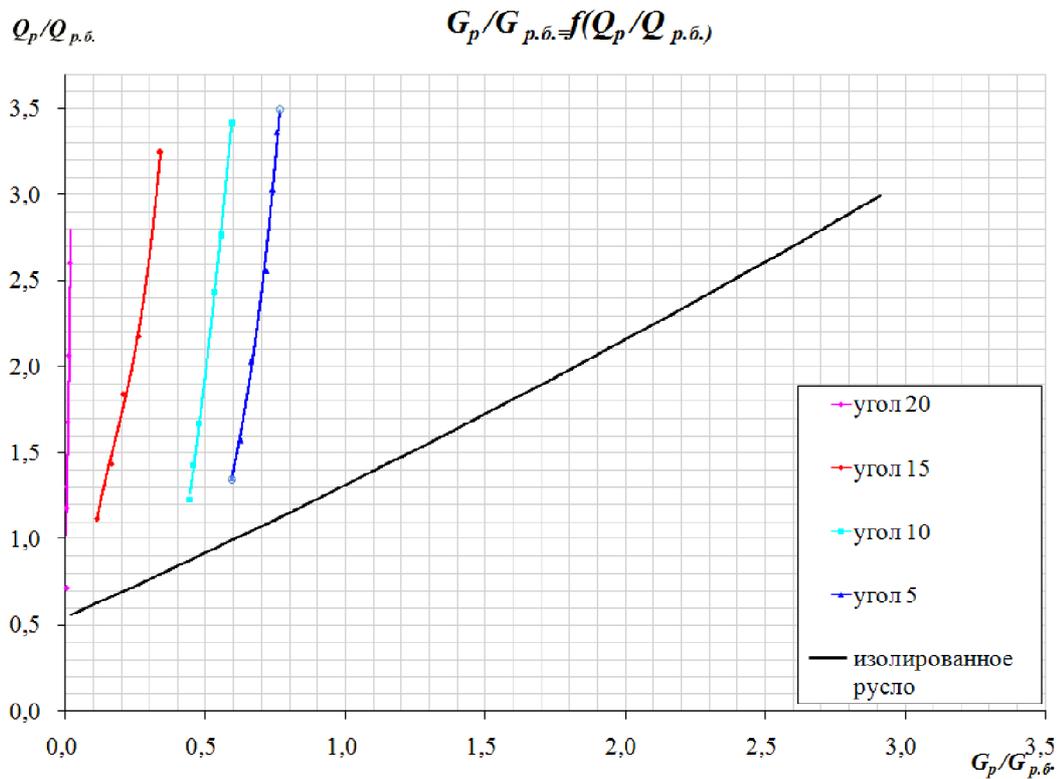


Рисунок 3.10 - Зависимости  $G_p/G_{p.б.} = f(Q_p/Q_{p.б.})$ , 3 тип взаимодействия (сходящиеся динамические оси), гладкая пойма

Результаты предыдущих этапов экспериментальной работы для второго типа взаимодействия потоков были совмещены с данными для третьего типа, что позволило построить общий для двух типов график зависимостей вида  $G_p/G_{p.б.} = f(h_p/h_{p.б.})$ , представленный на рисунке 3.11.

На рисунке 3.11 видно, что зависимость вида  $G_p/G_{p.б.} = f(h_p/h_{p.б.})$  для условий изолированного руслового потока является однозначной, тогда как кривые, построенные на основе зависимостей, полученных по данным при различных условиях взаимодействия потоков, значительно отклоняются от кривой для изолированного руслового потока, образуя таким образом самостоятельные кривые.

Кривые для условий расходящихся динамических осей расположены вправо от кривой, соответствующей изолированному русловому потоку, что свидетельствует об увеличении транспортирующей способности руслового потока за счет растекания масс руслового потока по пойме, причем тем больше, чем больше угол расхождения между динамическими осями этих потоков.

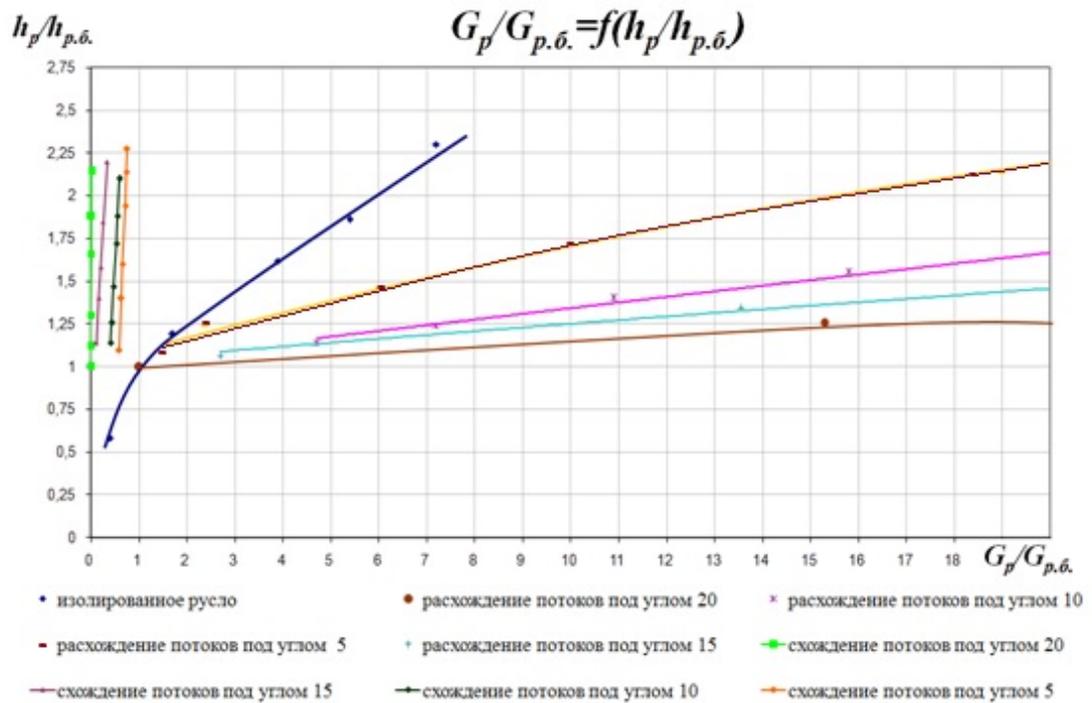


Рисунок 3.11 – Зависимости  $G_p/G_{p.б.} = f(h_p/h_{p.б.})$  для условий 2 и 3 типов взаимодействия потоков, гладкая пойма.

Важным также является и то, что помимо уменьшения средних скоростей руслового потока при схождении динамических осей этих потоков, происходит значительная трансформация полей скоростей руслового потока, что также приводит к значительному уменьшению его транспортирующей способности.

Анализ полей скоростей русловых потоков позволил сделать следующие выводы: трансформация полей скоростей привела к тому, что ядро руслового потока сместилось к противоположному от поймы берегу. Интенсивность этого смещения тем больше, чем больше глубины потока. Из анализа эпюр распределения скоростей руслового потока по глубине следует, что при третьем типе взаимодействия и одинаковых значениях средних скоростей, наблюдается трансформация эпюры скоростей, характеризующаяся их выравниванием по глубине потока и, что особенно важно, увеличением значений донных скоростей. Это свидетельствует о

существенном влиянии эффекта взаимодействия на скоростное поле руслового потока.

Однако, при соотношении ширины потока к его глубине  $B/h=6$  при уровнях равных уровням выхода воды на пойму и выше, на распределение скоростей также должен оказывать влияние «эффект пространственности» [19], при котором донные скорости должны были увеличиваться.

Тем не менее, несмотря на то, что «эффект пространственности» должен приводить к существенному увеличению транспортирующей способности потока, влияние эффекта взаимодействия при третьем типе не только нейтрализует влияние «эффекта пространственности», но и уменьшает транспортирующую способность руслового потока по сравнению с условиями для изолированного руслового потока. Из этого следует, что недоучет эффекта взаимодействия потоков может приводить к существенному завышению расчетного значения расхода донных наносов.

Таким образом, основные закономерности транспортирующей способности при гладкой пойме представляют собой:

- при расходящихся динамических осях потоков, особенно под углом  $\alpha=20^\circ$ , наблюдается значительное увеличение транспортирующей способности руслового потока. При этом происходит более чем стократное увеличение транспортирующей способности руслового потока по сравнению с изолированным русловым потоком. Противоположное явление наблюдается при сходящихся динамических осях потоков, т.е. значительное уменьшение транспортирующей способности руслового потока в десятки и более раз при вторжении в него пойменного. Величина этого уменьшения значительно больше, чем для условий параллельности динамических осей этих потоков.

### 3.2 Результаты исследований транспортирующей способности руслового потока при шероховатой пойме

Подъем уровней в естественных условиях сопровождается значительным увеличением скорости руслового потока, что соответствует

второму типу взаимодействия руслового и пойменного потоков. Для этого типа взаимодействия характерно расширение поймы ниже расчетного створа. Такое явление довольно часто встречается в природных условиях, в период прохождения паводков и половодий, когда в русла рек поступает основная масса наносов, именно в эти периоды при затоплении поймы и наблюдается эффект взаимодействия руслового и пойменного потоков, аналогичный второму типу. Тогда как при спаде уровней, наблюдается противоположное явление, при котором пойменные воды поступают в русло под различными углами. Таким образом, пойменный поток тормозит русловой, уменьшая тем самым его транспортирующую способность, что характерно для третьего типа взаимодействия потоков. Установлено, что в периоды подъема уровней подсистема русловой поток – русло перестраивается таким образом, чтобы увеличить пропускную способность русла. Соответственно при спаде уровней, когда в русла рек из их бассейнов поступает минимальное количество наносов, подсистема снова перестраивается за счет эффекта взаимодействия потоков таким образом, что пропускная способность русловой составляющей потока значительно уменьшается [75,76]. Однако, не до конца изученным остается вопрос о влиянии шероховатости поймы на транспортирующую способность руслового потока при влиянии на него пойменного.

Анализ проведенных экспериментальных исследований позволил вскрыть особенности эффекта взаимодействия потоков при разных размерах шероховатости, т.е. при влиянии факторов подстилающей поверхности.

Основным выводом из результатов проведенной экспериментальной работы стала оценка влияния эффекта взаимодействия руслового и пойменного потоков на транспорт донных наносов русловым потоком при условиях различной шероховатости поймы.

В 2009 году в лаборатории водных исследований был проведен очередной этап экспериментальной работы, направленной на изучение особенностей влияния эффекта взаимодействия при втором типе

взаимодействия потоков, но на модели русла с односторонней шероховатой поймой. В данной работе была смоделирована шероховатость в виде кусков гравия высотой 1 и 2 см.

По результатам экспериментов были определены скорости течения, на основе которых потом были рассчитаны значения расходов воды. Как и на предыдущих этапах экспериментальной работы с помощью весового метода определены значения расходов донных наносов в русловом потоке. На основе полученных данных были построены графические зависимости расходов донных наносов от определяющих их факторов.

На рисунке 3.12 приведены зависимости вида  $G_p = f(h_p, \alpha)$ , которые наглядно демонстрируют, как эффект взаимодействия руслового и пойменного потоков влияет на транспортирующую способность руслового потока при втором типе взаимодействия, т.е. при расходящихся осях потоков и наличии шероховатой поймы. В результате анализа кривых зависимостей  $G_p = f(h_p, \alpha)$ , приведенных на рисунке 3.12, можно сделать вывод о том, что при наличии шероховатой поймы эти кривые отклоняются вправо, т.е. в сторону увеличения транспортирующей способности руслового потока. При этом, следует отметить, что наличие шероховатости уменьшает величину отклонения кривых для расходящихся осей потоков от кривой для изолированного руслового потока. Величина этого отклонения тем больше, чем больше угол расхождения осей потоков. Т.е. увеличение транспортирующей способности руслового потока наблюдается при расхождении осей потоков по отношению к кривой для изолированного руслового потока, но оно значительно меньше, чем при наличии гладкой поймы.

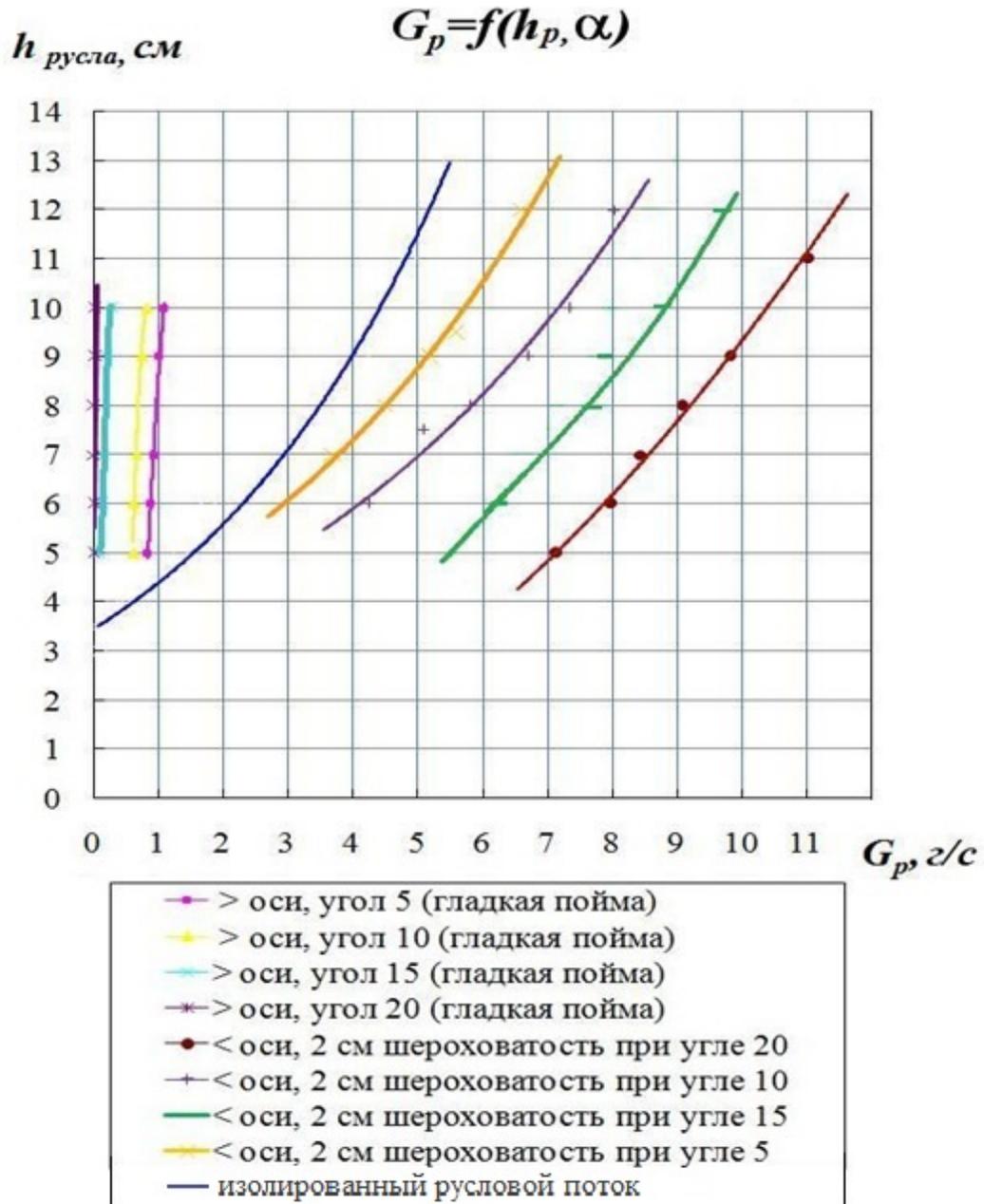


Рисунок 3.12 – Зависимости  $G_p = f(h_p, \alpha)$  для условий расходящихся осей потоков и при наличии шероховатой поймы, и для условий сходящихся осей и наличии гладкой поймы.

Для удобства в обозначения были введены символы  $<$  для условий расходящихся осей и  $>$  для условий сходящихся осей.

Далее на основе полученных данных также были построены зависимости вида  $\Delta G = f(h_p, \alpha)$  для руслового потока и характерных глубин от 5 до 10 см, с шагом 1 см, которые представлены на рисунке 3.13.

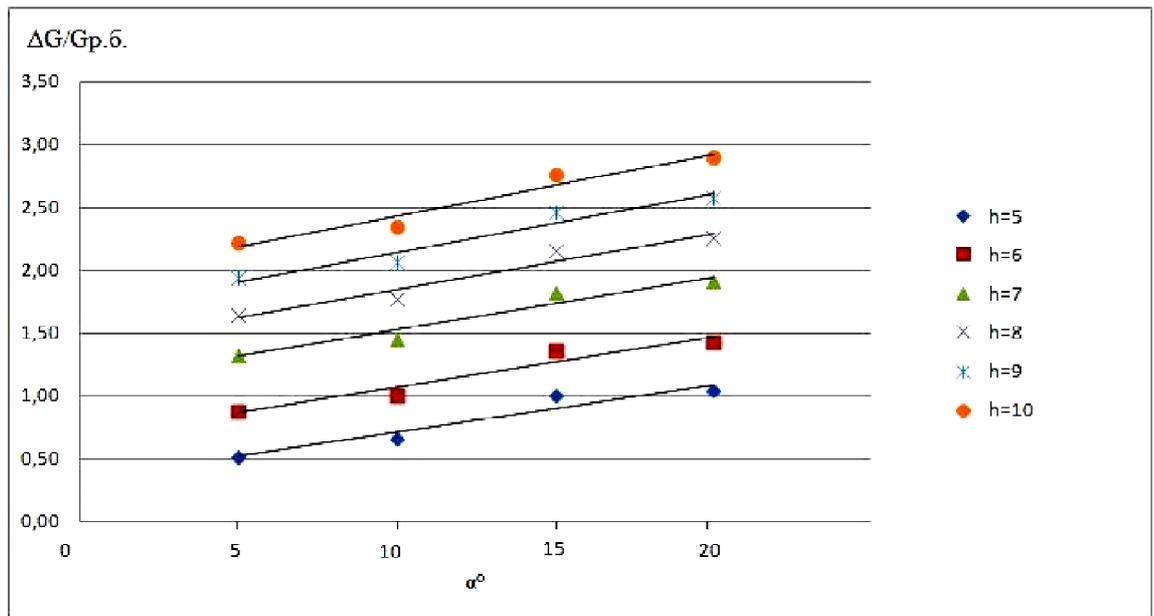


Рисунок 3.13 – Зависимости  $\Delta G=f(h_p, \alpha)$  в относительных координатах, для условий расходящихся осей при шероховатой пойме

Каждая из полученных зависимостей была аппроксимирована линейным трендом. Таким образом, все прямые вида  $\Delta G=f(h_p, \alpha)$  имеют отклонение от оси абсцисс под углом приблизительно равным  $35^\circ$ .

Данные линейные зависимости наглядно иллюстрируют, как увеличивается расхождение значений расходов донных наносов при увеличении глубины потока и угла  $\alpha$ . На основе графика, представленного на рисунке 3.13, были получены уравнения прямой вида  $y=ax+b$ , при фиксированных глубинах русла от 5 до 10 см.

В 2011 году были проведены эксперименты для условий сходящихся динамических осей взаимодействующих потоков при наличии шероховатой поймы. На основе этих данных были построены зависимости вида  $G_p=f(h_p, \alpha)$ , совмещенные с данными для сходящихся осей, при наличии гладкой поймы.

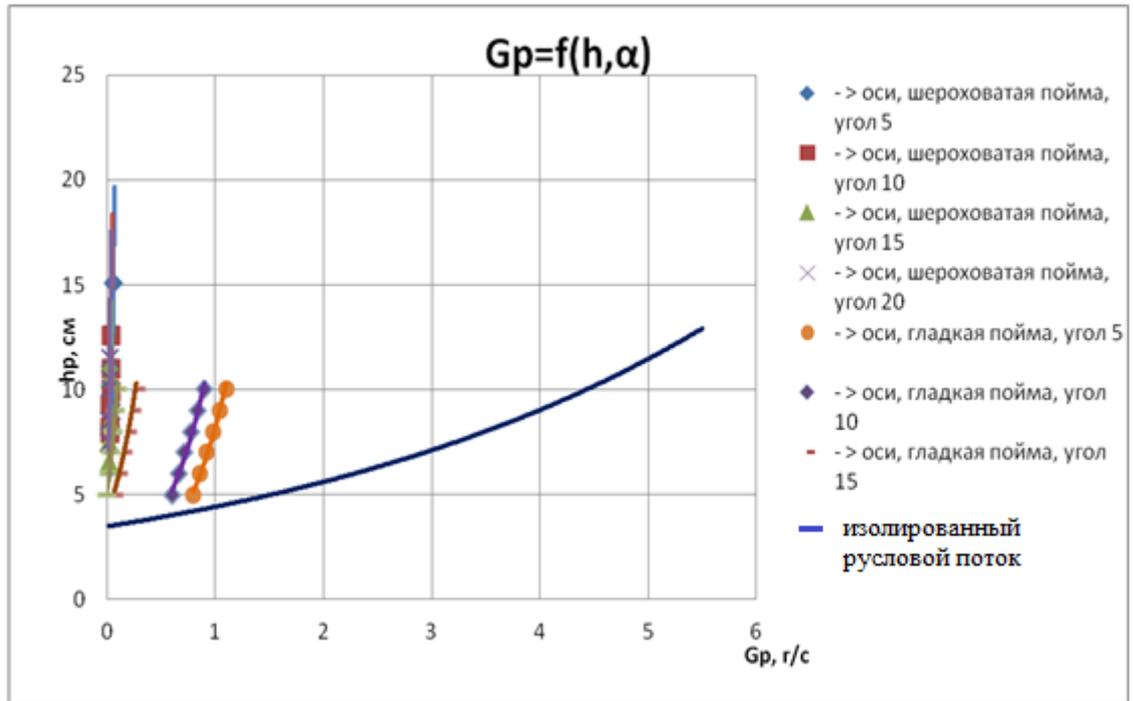


Рисунок 3.14 – Зависимости  $G_p = f(h_p, \alpha)$  для условий сходящихся динамических осей взаимодействующих потоков (3 тип), при гладкой и шероховатой пойме

К сожалению, как видно на рисунке, зависимости, полученные для условий сходящихся динамических осей потоков, настолько отклоняются от кривой для изолированного руслового потока, что кривые, демонстрирующие эти зависимости, подходят к оси ординат практически вплотную. Дело в том, что значения расходов наносов при вторжении пойменного потока в русловый при шероховатой пойме настолько малы, что составляют всего лишь несколько г/с.

При построении линейных трендов для функции  $\Delta G = f(h_p, \alpha)$  на основе данных для шероховатой поймы при условиях третьего типа взаимодействия было выявлено, что эта зависимость слабо выражена, хотя прослеживается четкая зависимость от глубины потока. Графическое отображение данной зависимости представлено на рисунке 3.15.

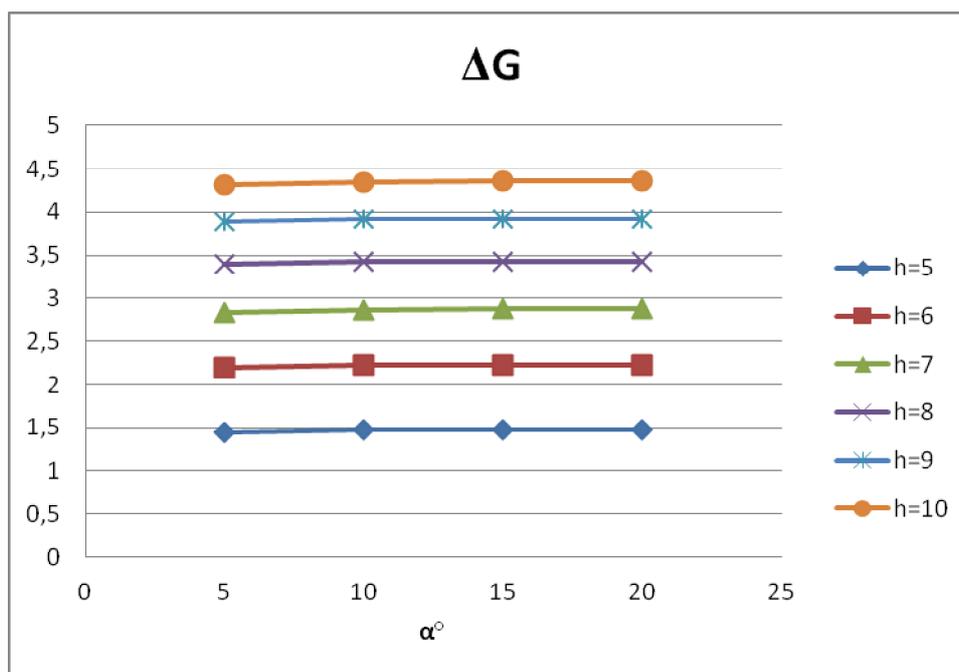


Рисунок 3.15 – Зависимости  $\Delta G = f(h_p, \alpha)$  при сходящихся осях и шероховатой пойме.

Для анализа обобщенных за весь период экспериментальных исследований был построен график зависимостей  $G_p/G_{p.б.} = f(h_p/h_{p.б.})$ , полученных как при сходящихся, так и при расходящихся динамических осях взаимодействующих потоков при гладкой и шероховатой пойме. Так как расходы донных наносов при втором и третьем типах взаимодействия потоков различаются на 2-3 порядка для большей информативности график зависимости вида  $G_p = f(h_p, \alpha)$  был построен в полулогарифмических координатах.

Как и на предыдущих этапах исследований, кривая, полученная на основе зависимости  $G_p = f(h_p, \alpha)$  для условий изолированного потока является однозначной. Кривые же, полученные для условий взаимодействия потоков, значительно отклоняются от искомой кривой изолированного русла. При сходящихся осях потоков кривые зависимостей  $G_p/G_{p.б.} = f(h_p/h_{p.б.})$  и соответственно исходная информация отклоняются в сторону уменьшения значений расходов наносов, причем эти отклонения значительнее, чем при условии параллельности осей потоков, и образуют самостоятельные кривые для данных, полученных при углах  $5^\circ$ ,  $10^\circ$ ,  $15^\circ$  и

20° соответственно. Третий тип взаимодействия потоков соответствует стадии спада уровней в природных условиях, когда в русла рек поступают пойменные воды, тормозящие русловой поток, что приводит к уменьшению не только скоростей руслового потока, но и уклонов водной поверхности. Все это неизбежно влечет за собой уменьшение средних скоростей и транспортирующей способности руслового потока под воздействием потока поймы.

Кривые, зависимостей для условий расходящихся динамических осей как при гладкой, так и при шероховатой пойме, расположены правее кривой для изолированного руслового потока, т.е. в сторону увеличения значений расходов наносов, причем эти отклонения увеличиваются при возрастании угла расхождения осей потоков.

Как видно на рисунке 3.16 при расхождении динамических осей взаимодействующих потоков и наличии шероховатой поймы, транспортирующая способность руслового потока возрастает в десятки раз, тогда как при наличии гладкой поймы она увеличивается в сотни раз по сравнению с изолированным русловым потоком [77].



На рисунке 3.17 изображено семейство кривых, показывающих, как изменяется транспортирующая способность потока при различных углах  $\alpha$  для фиксированных значений глубины. Здесь  $\Delta(G_p./G_{p.б.})$  – разность значений транспортирующей способности русловой составляющей потока, находящегося под воздействием пойменного, и при уровне затопления бровки прируслового вала ( $G_{p.б.}$ ). Справа данные при расходящихся осях потоков (3-ий тип) Таким образом, из графика видно, что увеличение транспортирующей способности наблюдается как за счет увеличения глубин, так и за счет эффекта взаимодействия потоков.

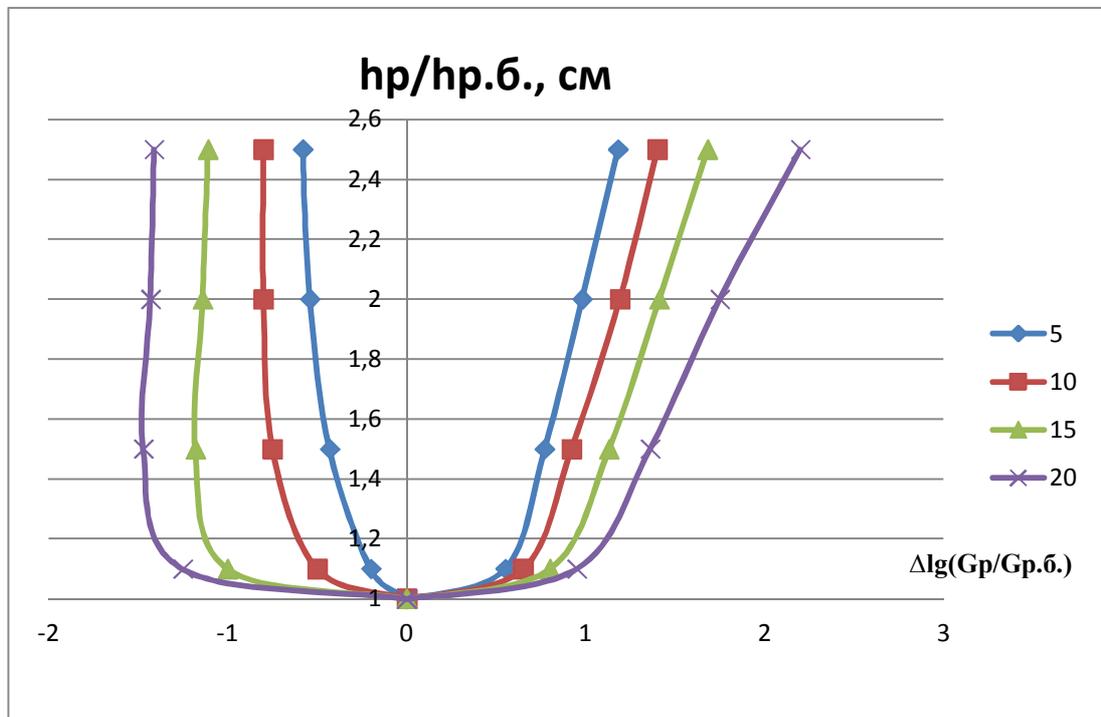


Рисунок 3.18 – Кривые зависимости  $\Delta G_p./G_{p.б.} = f(h_p./h_{p.б.})$

На рисунке 3.18 представлены зависимости, характеризующие воздействие эффекта взаимодействия в явном виде, но включающее в себя также погрешности измерений и погрешности принятой методики расчетов.  $\Delta G_p.$  – разность значений транспортирующей способности русловой составляющей потока при его взаимодействии с потоком поймы и при его изоляции.

Несмотря на такие допущения, как подача постоянных расходов воды, возможное попадание в ловушку взвешенных наносов и пр., полученные результаты дают возможность охарактеризовать величину изменения транспортирующей способности руслового потока в периоды подъема и спада уровней.

Таким образом, были выявлены следующие закономерности:

- при расхождении динамических осей взаимодействующих потоков и наличии шероховатой поймы, транспортирующая способность руслового потока возрастает в десятки раз, тогда как при наличии гладкой поймы она увеличивается в сотни раз по сравнению с изолированным русловым потоком.

### 3.3 Обоснование структуры базы знаний ГИС для прогнозирования русловых деформаций

Научные и технические задачи для народного хозяйства состоят, в первую очередь, в том, чтобы обеспечить потребителя информацией, контролем и поддержкой принятия управленческих решений в сфере планирования и проектирования гидротехнических сооружений, а также в предупреждении и уменьшения ущерба от чрезвычайных ситуаций.

В состав исследовательской работы входит изучение общих свойств и закономерностей, связанных с выявлением влияния эффекта взаимодействия руслового и пойменного потока на транспорт донных наносов русловым потоком. Также даны рекомендации по созданию методики накопления, обработки и использования экспериментальных данных, полученных для данной предметной области, а также развитие теории, методологии и технологий создания геоинформационных систем с целью сбора, систематизации, хранения, анализа, преобразования, отображения и распространения обработанных экспериментальных данных.

Для современных экспериментальных исследований характерны: длительность, сложность и использование больших объемов данных, что крайне затрудняет воссоздаваемость эксперимента, и может даже поставить

под сомнение достоверность полученных результатов. Работа с большими объемами данных – это отличительная черта современной науки. В условиях роста объема получаемых данных экспериментов, возникает необходимость в наличии единого онтологического хранилища, в котором экспериментальные данные были бы объединены в единую структуру. Более того, исходным данным и сопутствующей им информации необходимо храниться десятилетиями, а также иметь возможность дополнения и усовершенствования.

Нередко современные исследователи сталкиваются с проблемами организации доступа и управления данными, причем не только научными, но и колоссальными объемами вспомогательных сведений обо всех этапах научных исследований. Без организации связности между экспериментальными данными, описывающими этапы их обработки и анализа, нарушается воспроизводимость научных результатов, что является важнейшим критерием истинности научного знания.

Данная проблема существовала всегда, однако, в настоящее время ее масштабы значительно возросли. Многие исследователи сталкивались с затруднениями при воспроизведении результатов своих собственных экспериментов, тогда как воспроизведения чужих результатов вообще представляется невозможным [78].

В работе рассмотрена ретроспектива экспериментальных исследований, на основе которых была произведена попытка обобщить обработанные экспериментальные данные на начальном этапе при помощи интегрированной среды разработки программного обеспечения Visual Studio 2015 от компании Microsoft.

Сначала были определены наборы данных, на основе которых было проведено исследование, потом была разработана программа, обеспечивающая графическую визуализацию полученных зависимостей. В совокупности они составляют модуль базы научных знаний, представляющий собой платформу, которая позволяет интегрировать данные

экспериментальной работы из различных этапов эксперимента и имеет удобный интерфейс, который позволяет их систематизировать для удобного хранения и доступа на всех этапах экспериментальных исследований, также предусмотрена и возможность дополнения.

Разработка данного программного продукта была осуществлена с целью построения графических зависимостей на основе обработанных данных экспериментальной работы по выявлению влияния эффекта взаимодействия руслового и пойменного потоков на транспорт донных наносов и реализована на языке программирования C#.

Основные задачи, которые были решены при разработке данного программного продукта:

- Наглядно представить графические зависимости вида  $G_p/G_{p.б.} = f(h_p/h_{p.б.}, \alpha)$  и  $G_p/G_{p.б.} = f(Q_p/Q_{p.б.}, \alpha)$  – т.е. зависимости, отражающие, какое количество наносов может переносить русловой поток при различных глубинах затопления поймы, фиксированном значении угла  $\alpha$  и различных типах взаимодействия.

- Генерировать различные комбинации графических зависимостей на усмотрение пользователя для качественной оценки процессов, происходящих при взаимодействии руслового и пойменного потоков.

В качестве исходных данных при разработке программного обеспечения, были использованы результаты лабораторных измерений. Данные представляют собой измеренные расходы воды и донных наносов при фиксированном значении глубины, угле схождения/расхождения динамических осей потоков ( $\alpha$ ), при наличии/отсутствии шероховатости на пойме.

Фрагмент таблицы Excel с обработанными данными представлен в таблице 3.1, полная версия которой размещена в приложениях.

Таблица 3.1. – Обобщенные экспериментальные данные.

№эксперимента	Тип взаимодействия	Номер типа	Значение угла	Угол в градусах	Тип поймы	Номер типа	Глубина, см	Расход донных наносов, г/с
23	II (расходящиеся оси)	2	20°	20	гладкая	1	7	44,78
24	II (расходящиеся оси)	2	20°	20	гладкая	1	8	110,08
25	II (расходящиеся оси)	2	20°	20	гладкая	1	9	160,64
26	II (расходящиеся оси)	2	20°	20	гладкая	1	10	211,20
27	II (расходящиеся оси)	2	20°	20	гладкая	1	11	396,40
28	II (расходящиеся оси)	2	20°	20	гладкая	1	12	581,61
29	II (расходящиеся оси)	2	5°	5	шероховатая	2	6	3,00
30	II (расходящиеся оси)	2	5°	5	шероховатая	2	7	3,80
31	II (расходящиеся оси)	2	5°	5	шероховатая	2	8	4,47
32	II (расходящиеся оси)	2	5°	5	шероховатая	2	9	5,15
33	II (расходящиеся оси)	2	5°	5	шероховатая	2	10	5,70
34	II (расходящиеся оси)	2	5°	5	шероховатая	2	11	6,20

Алгоритм вычислений данного программного обеспечения представлен в виде блок-схемы на рис.3.19 и полностью отражает принцип его работы. Полный листинг кода программы размещен в приложениях.

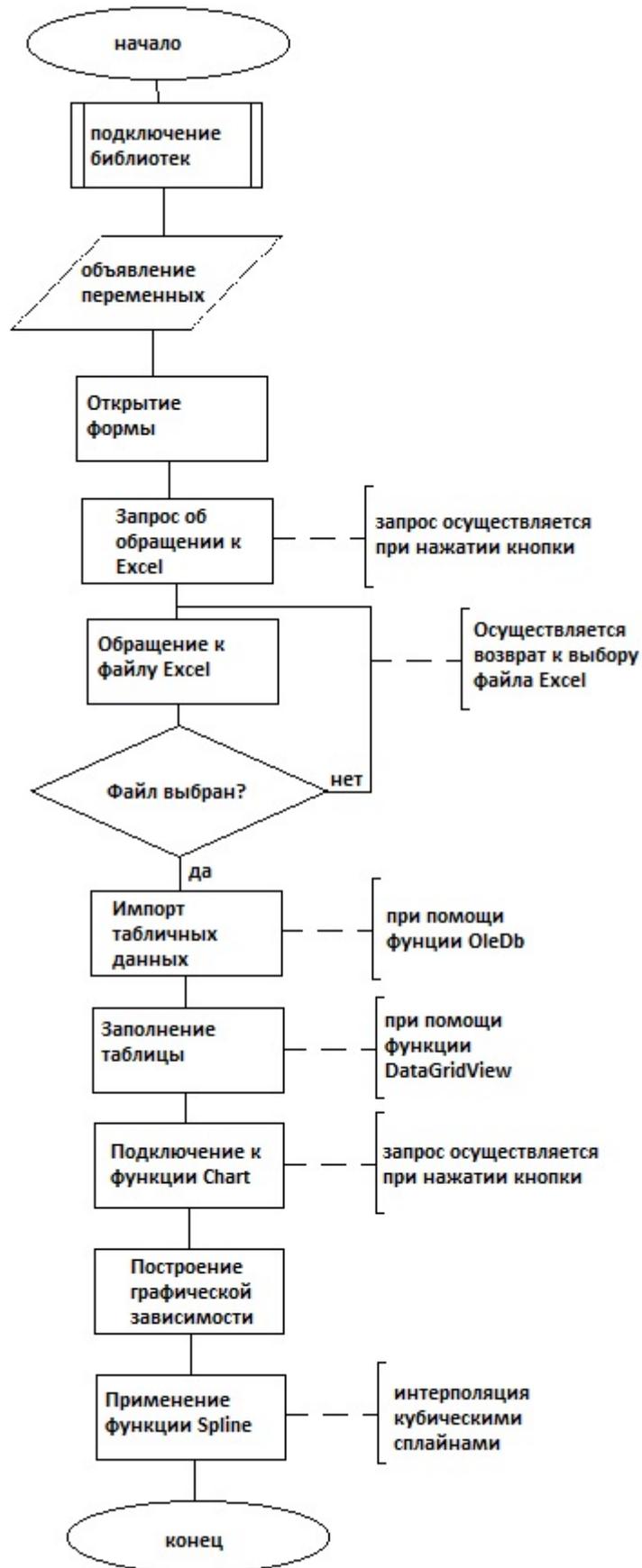


Рисунок 3.19 – Блок-схема алгоритма построения графических зависимостей

Исходные данные для данной программы получены из разработанной автором базы данных экспериментальных измерений в программе Microsoft Access – системе управления базами данных (СУБД), предназначенной для создания и обслуживания баз данных, обеспечения доступа к данным и их обработки, которая обобщает накопленную информацию за все этапы проведения лабораторных исследований по данной тематике.

Результаты и формы представления данных в программе:

- основным результатом, полученным по итогам разработки данного программного обеспечения, является создание единого информационного пространства, включающего в себя все экспериментально полученные результаты по учету стока донных наносов и изменения транспортирующей способности руслового потока под действием на него пойменного, что представляет собой начальный этап формирования базы знаний по данной проблематике. Архитектура этой базы может быть адаптирована к множеству еще не рассмотренных условий взаимодействия потоков;

- графические зависимости качественно подтверждают концепцию о том, что влияние эффекта взаимодействия руслового и пойменного потоков является значительным при оценке стока донных наносов.

На данный момент программа находится в стадии разработки. При запуске программы пользователю предоставляется возможность по нажатию кнопки выбрать файл с результатами экспериментов (расширение .xls, .xlsx) по запросу программы, которая генерирует графическую зависимость на основе этих данных. Программа предполагает оперирование графическими зависимостями на усмотрение пользователя. Таким образом, данные экспериментов можно в любой последовательности графически воспроизвести, без наличия обобщенных и громоздких визуализаций. Банк с результатами экспериментов остается в формате рядов данных, тогда как

пользователь может выбрать любую их комбинацию для графического отображения. Интерфейс программы представлен на рисунке 3.20.

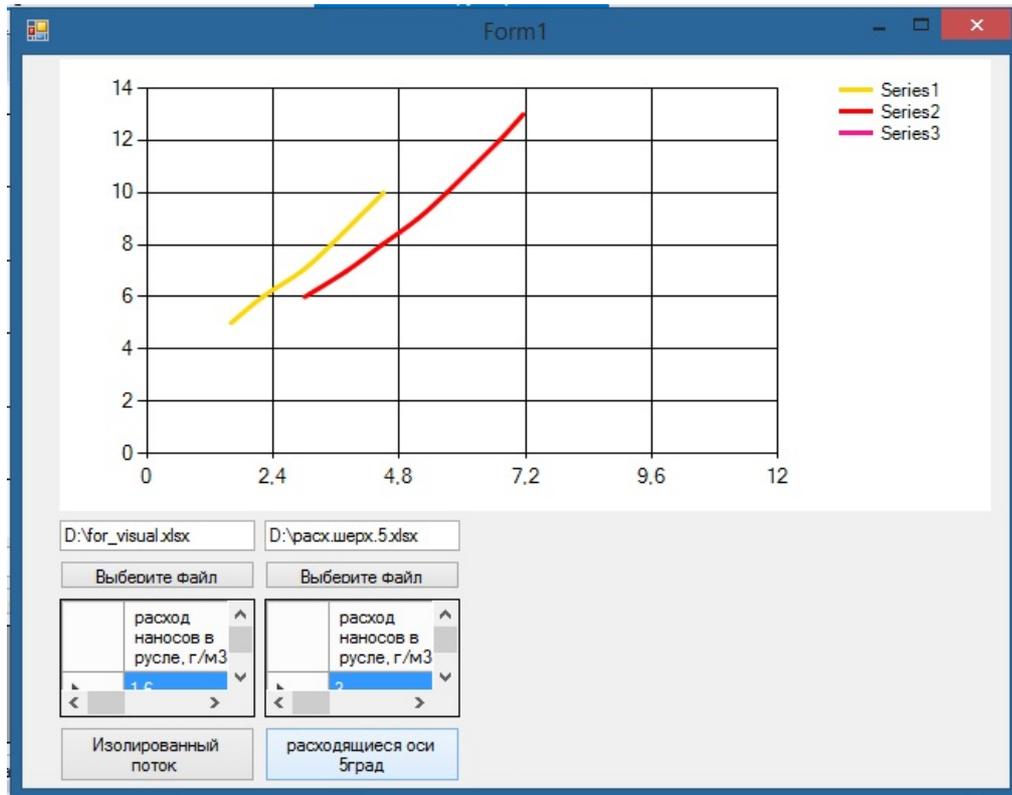


Рисунок 3.20 – интерфейс программы обобщения экспериментальных данных в разработке

Таким образом, база знаний должна включать в себя:

- закономерности, выявленные на основе экспериментальных данных, характеризующие изменение транспортирующей способности руслового потока под действием на него пойменного

- рекомендации по учету представленных закономерностей при разработке прогнозов русловых деформаций

#### **Выводы:**

- экспериментальным методом установлена четкая зависимость между транспортирующей способностью потока и углом между динамическими осями взаимодействующих потоков –  $\alpha$ ;

- диапазон изменения угла  $\alpha$  был ограничен  $20^\circ$  из-за размеров установки;

- при расходящихся осях взаимодействующих потоков ниже расчетного створа, а также при увеличении глубин и углов  $\alpha$  происходит значительное увеличение транспортирующей способности русловой составляющей потока. Величина этого увеличения находится в прямой зависимости от величины угла  $\alpha$  и глубины потока;
- для сходящихся осей потоков транспортирующая способность руслового потока уменьшается при увеличении угла  $\alpha$  и увеличивается при увеличении глубины потока;
- при наличии шероховатой поймы для случаев со всеми рассматриваемыми углами при стационарном режиме и постоянном расходе, наносы перемещались вдоль по руслу в донно-грядовой форме;
- отсутствие полноценной комплексной структуры обобщения данных экспериментальных исследований значительно тормозит развитие данного направления;
- применение ГИС при обработке натуральных данных позволило бы усовершенствовать методику прогнозирования русловых деформаций;
- выполнен анализ полученных экспериментальных данных, проведено обобщение экспериментальных данных за все периоды проведения экспериментальных исследований на данной лабораторной модели. Разработано программное обеспечение по визуализации экспериментальных данных.

#### 4 ПРАКТИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО УЧЕТУ ВЛИЯНИЯ ЭФФЕКТА ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ РУСЛОВОГО И ПОЙМЕННОГО ПОТОКОВ НА ТРАНСПОРТ ДОННЫХ НАНОСОВ В УПРАВЛЕНИИ РЕЧНОЙ ГЕОСИСТЕМОЙ

Результаты многолетней экспериментальной работы в целом подтверждают концепцию РГГМУ о значительном влиянии эффекта взаимодействия руслового и пойменного потоков на транспорт донных наносов, что подкреплено выводами каждого этапа исследовательской работы, посвященной выявлению влияния данного эффекта при различных типах взаимодействия потоков.

Следует отметить также, что в период проведения экспериментов на пойме возникали водоворотные зоны, которые были зафиксированы при помощи опилок. На границе раздела руслового и пойменного потоков на уровне бровки русла было отмечено образование и перемещение вихрей.

На основании данных измерений были рассчитаны расходы воды и средние скорости как отдельно для руслового и пойменного потоков, так и для потока в целом, для каждого из створов измерений.

Наносы в русловую часть установки подавались вручную таким образом, чтобы компенсировать их перенос русловым потоком, т.е. измерялся расход наносов, равный транспортирующей способности потока. Для регулирования уровня воды в конце установки в русле были установлены жалюзи. Методика проведения экспериментов была основана на разработанной на кафедре концепции, основанной на сравнении результатов экспериментов в изолированном от пойменного потока русловом потоке с данными, полученными при взаимодействии руслового и пойменного потоков.

Во всех экспериментах, как при исследовании гидравлики потоков, так и при изучении влияния эффекта взаимодействия потоков на транспорт наносов, числа Фруда всегда были меньше единицы, т.е. эксперименты проводились при спокойном турбулентном режиме ( $Fr < 1,0$ ).

При взаимодействии потоков, при расхождении их осей, скорости руслового потока при выходе воды на пойму были более 1 м/с. При увеличении скоростей наносы начинали смываться со дна русла, и при их постоянной подаче в русле стали формироваться гряды. В створе, расположенном в пяти метрах от входа, скорости потока существенно уменьшились из-за того, что значительная часть руслового потока поступала на пойму. Это сопровождалось уменьшением уклонов водной поверхности по длине установки, что привело к интенсивному отложению наносов в русле (т.е. к формированию переката) и перемещению значительной их части на пойму. Последние отлагались на пойме или перемещались по ней в донногрядовой форме.

Так как поймы служат не только для пропуска паводочного стока, но и для его регулирования, необходимо рассмотреть, каким образом этот процесс осуществляется. В период подъема уровней в речные русла и на поймы с их бассейнов начинают поступать большие объемы воды. Так как вода по руслу движется быстрее, чем по пойме, то из русла на пойму также поступает большое количество воды, которое и определяет объем регулирования стока. Система речной поток – русло перестраивается таким образом, что значительно увеличивает пропускную способность русла, и пойма начинает аккумулировать паводочный сток. Данный процесс саморегулирования приводит к трансформации гидрографа паводочного стока. Известно, что поймы способны аккумулировать до 90 % паводочного стока, отдавая его в период спада уровней, уменьшая тем самым максимальные расходы воды и увеличивая его продолжительность. Эффект взаимодействия руслового и пойменного потоков также является фактором регулирования паводочного стока, так как при подъеме уровней происходит растекание масс жидкости по пойме, что соответствует 2 типу взаимодействия потоков для стационарных условий, что характеризуется увеличением уклонов свободной поверхности и скоростей руслового потока. При спаде уровней массы пойменного потока тормозят русловой поток, поступая в него, т.е. система речной поток - русло

снова перестраивается таким образом, что значительно уменьшается пропускная способность русла, а за счет разгрузки поймы увеличивается продолжительность паводков и половодий.

Поймы осуществляют регулирование стока наносов, что является более сложным процессом, чем регулирование жидкого стока. В периоды подъема уровней и пропуска паводков и половодий по затопленным поймам в реки поступает наибольшее количество наносов с территорий речных бассейнов, причем значительная их часть, которая перемещается во взвешенном состоянии, поступает на поймы, где скорости течения значительно меньше, чем в русловом потоке. Все это приводит к осаждению наносов на поймах, нивелируя тем самым их рельеф. Наносы откладываются большей частью в пойменных озерах, старицах и на тех участках поймы, где площади поперечного сечения увеличиваются, в основном за счет увеличения глубин, а скорости течения уменьшаются.

Поймы регулируют также и сток донных наносов, так как между пойменными массивами в паводочные периоды наблюдается обмен донными наносами. Донные наносы перемещаются от пойменного массива у одного берега к пойменному массиву, расположенному у противоположного берега. Причем в периоды наибольшего поступления наносов в руслах рек формируются гряды и другие русловые образования, длины которых могут достигать на больших реках сотен метров или даже километров. При спаде уровней эти русловые образования могут присоединяться к пойменным массивам, формируя таким образом их рельеф.

При размыве низовых частей пойменных массивов продукты размыва откладываются на нижерасположенных пойменных массивах. По данным Н.И. Маккавеева [79] объемы этих размывов сопоставимы с объемами годового стока донных наносов. Так, например, объемы образовавшихся перекаатов на р. Волге составляют 36 млн. тонн в год, а на р. Миссисипи – 55 млн. тонн, что значительно превышает объемы годового стока этих рек.

При интенсивном поступлении наносов в русла рек во время подъема уровней и затоплении пойм, система речной поток – русло перестраивается так, чтобы быстрее пропустить основные массы воды и наносов, а в периоды спада уровней, когда объемы поступления воды и наносов существенно сокращаются, русловой поток затормаживается, таким образом, наблюдается обратное явление. Скорость и транспортирующая способность потока уменьшаются.

Следует отметить, что любое строительство на поймах снижает эффективность процесса саморегулирования, создавая дополнительные сопротивления движению пойменного потока, что приводит к увеличению максимальных уровней воды и переотложению наносов [80].

В целом полученные результаты могут, хотя бы качественно, подтвердить выводы, полученные на основе анализа формул для расчета транспортирующей способности потока.

Анализ трансформации полей скоростей позволил установить, что ядро руслового потока смещается к противоположному пойме берегу. Интенсивность этого смещения увеличивается при увеличении глубин. Это свидетельствует о значительном влиянии эффекта взаимодействия потоков. Действительно, при соотношении  $B/h=6$  (при уровне выхода воды на пойму и более высоких уровнях) должно проявляться влияние «эффекта пространственности», при котором донные скорости должны увеличиваться.

Учитывая, что при выводе формул вида:

$$G = \alpha \left( \frac{v}{v_k} \right)^{m-1} (v - v_k) , \quad (4.1)$$

априори принимают, что между средней и донной скоростями должна быть логарифмическая зависимость, т.е.

$$u_{\Delta} = \frac{1,25v}{lg \frac{8,8h}{k_5}} . \quad (4.2)$$

Тогда как эффект пространственности должен приводить к существенному увеличению транспортирующей способности потока (по

данным В. Н.Гончарова примерно в 1,8 раз). Однако влияние эффекта взаимодействия потоков при третьем типе не только нейтрализует воздействие этого эффекта, но и уменьшает транспортирующую способность потока по сравнению с изолированным русловым потоком.

Учитывая, что параметр  $m$  принимается примерно равным 4 [15,23 и др.], недоучет эффекта взаимодействия потоков при III его типе [53] может привести к значительному завышению расчетного значения расхода донных наносов.

Так, в качестве примера приведем данные, полученные в результате эксперимента и рассчитанные по формулам (1.7, 1.13 и 1.14) значения расхода наносов для второго створа (табл. 4.1).

Таблица 4.1 - Данные о расходах наносов, полученные по экспериментальным исследованиям и вычисленные по формулам.

Методика расчетов	Изолированное русло		Расхождение осей потоков (угол $\alpha=20^0$ )	
	$G$ кг/м/с	погрешность в %	$G$ кг/м/с	погрешность в %
Измеренные расходы	<b>0,00450</b>	-	<b>0,21120</b>	-
По формуле ГГИ	<b>0,00005</b>	<b>196</b>	<b>0,00007</b>	<b>200</b>
По формуле Шамова	<b>0,08798</b>	<b>180</b>	<b>0,35342</b>	<b>50</b>
По формуле Гончарова	<b>0,03132</b>	<b>150</b>	<b>0,12815</b>	<b>49</b>

Эксперименты на лабораторных моделях всегда схематизируют процесс, который значительно отличается от натурального. Известно, что в естественных условиях тип и ширина пойменного массива по длине реки может существенно изменяться. Например, на р. Оке на относительно коротком участке изменение ширины поймы было зафиксировано от 0,4 до 12 км. Как и ширина, так и другие характеристики поймы изменяются по ширине реки. Следует также отметить, что лабораторные исследования производятся при квазиравномерном режиме, характеризующимся установившимся режимом потока. В натуральных условиях катастрофические паводки, затопляющие пойму, проходят при неустановившемся режиме. Что касается поступления наносов, то их динамика не всегда соответствует транспортирующей способности потока. Таким образом, для разработки научно обоснованных рекомендаций по учету транспортирующей способности недостаточно данных лабораторных экспериментов, необходимым также является проведение масштабных натуральных исследований.

Наблюдения за затоплением пойменных массивов были проведены в ГГИ в 60-х годах прошлого столетия, в основном это касалось рек свободного меандрирования (Луга, Ока, Обь, Полометь и др.). Исследования проводились в период прохождения паводков различной обеспеченности. Затопление пойменных массивов осуществлялось сначала через низовые прорвы, а при более высоких уровнях – и через верховые прорвы. Транзитный поток на пойме наблюдался при максимальных уровнях, существенно превышающих уровни редкой обеспеченности. Практически на всех исследованных реках, при высоких уровнях, наблюдалось поступление наносов из русел на поймы. Причем наблюдалось это именно в тех местах, где динамические оси руслового и пойменного потоков пересекались под наибольшими углами и где в русле располагались перекатные участки. Особенно четко это отражено в работе З.М. Великановой и Н.А. Ярных [62] на примере пойменного массива на р. Оби у г. Барнаула (см. рис.4.1).

На рис.4.1 указаны зоны отложения наносов на пойме в верхней части массива, достигающие 1,5 м толщины. Наносы откладывались в виде конусов выноса, наибольшая длина которых достигала 150—200 м (от бровки). При этом в верхней части пойменного массива отмечено осаждение русловых наносов. Приведенные в работе [62] данные о средней крупности наносов позволяют считать, что в верхней части пойменного массива отмечено осаждение русловых наносов ( $\bar{k} \approx 0,16-0,24$  мм).

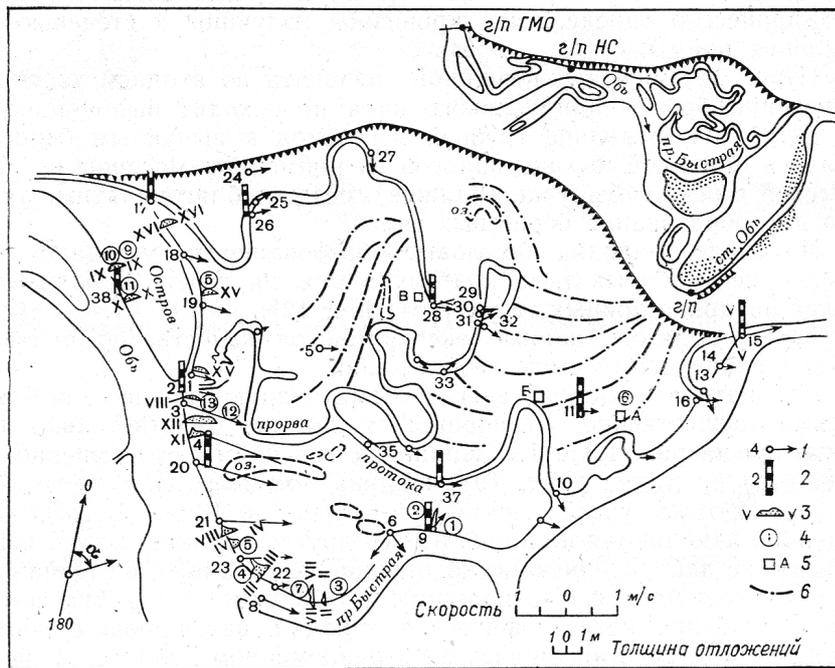


Рисунок 4.1. План пойменного массива и схема всего участка р. Оби.

1 - векторы поверхностных скоростей на пике половодья, 2 - водомерные посты, 3 - характерные профили отложения наносов на пойме, 4 - места отбора проб донных отложений, 5 - границы полигонов, 6 - береговые валы. Римские цифры I–XVI обозначают зоны выноса наносов из русла на пойму.

К сожалению, сведения о глубинах в основном русле в местах интенсивного выноса русловых наносов на пойму не опубликованы, возможно промеры глубин не производились. Анализ лоцманских карт, которые составляются по данным промеров в меженный период, позволил установить, что, как правило, именно в этих местах располагаются перекатные участки. Учитывая, что рядом исследователей [81, 82 и др.] уже давно установлен факт интенсивного роста отметок дна на большинстве

перекатов в период подъема паводка или половодья и их снижение на спаде половодья и в меженный период, можно считать, что в этих местах на подъеме половодья наблюдается интенсивное отложение наносов.

Таким образом, натурные данные качественно подтверждают и уточняют экспериментальные, полученные на полужестких моделях.

Проведенный анализ и расчеты позволяют сделать некоторые предварительные выводы и предложения:

Крайне малый объем натурной информации, особенно в паводочный период на пойменных створах, о расходах донных наносов обусловил резкое увеличение количества формул и методов для расчетов расходов донных наносов, основанных на данных лабораторных измерений в узких лотках:

–точность и надежность этих формул недостаточная, особенно для условий бесструктурной формы перемещения наносов;

–в этих формулах и методах не учитывается воздействие эффекта взаимодействия русловых и пойменных потоков, которое изменяет транспортирующую способность потока в десятки и даже сотни раз;

–данная проблема, к сожалению, еще далека от решения. Для ее решения необходимы комплексные натурные исследования, охватывающие измерения не только в руслах и поймах, но и на речных водосборах.

Для качественной оценки явления эффекта взаимодействия руслового и пойменного потоков были проведены экспериментальные исследования, которые позволили сделать следующие заключения:

- установлено, что при сходящихся осях взаимодействующих потоков наблюдается торможение руслового потока пойменным при его вторжении в русловой поток во время разгрузки поймы. Это приводит к значительному уменьшению пропускной способности пойменных русел и, что особенно важно, к еще более резкому (в десятки раз) уменьшению расходов донных наносов. При расходящихся осях потоков наблюдается противоположное явление;

- скорости пойменного потока значительно уменьшаются при наличии пойменной шероховатости, что, в свою очередь, оказывает влияние на скорости руслового потока, и, как следствие, на транспорт донных наносов русловым потоком;

- увеличение скоростей руслового потока при 2-ом типе взаимодействия потоков и шероховатой пойме, значительно меньше, чем при растекании потока по гладкой пойме, но также приводит к существенному увеличению расходов донных наносов.

- Теоретические предложения:

Не нарушая общности рассуждений, основанных на фундаментальности настоящего подхода, демонстрируются потенциальные возможности технологии управления с использованием ГИС русловыми процессами с учетом взаимодействия руслового и пойменного потоков при наличии изменяющегося характера подстилающей поверхности.

Разработана методика обоснования целесообразности использования ГИС в интересах совершенствования управления русловыми процессами с последующей реализацией в подразделениях органов Ростехнадзора

Прикладные предложения:

- Данные научно-практические результаты целесообразно использовать в технологиях оперативного управления русловыми процессами в части проектирования и строительства гидротехнических сооружений, при прокладке трубопроводов, расчетах русловых карьеров, как методика организации деятельности проектных организаций.

- Разработать СНиП по автоматизации процессов управления на основе применения современных ГИС-технологий.

Практическая значимость и пути дальнейшего развития.

- предотвращение таких явлений, как размыв мостовых опор и нижних бьефов дамб ГЭС;

- научно-обоснованное проведение дноглубительных работ, с учетом транспортирующей способности потока для улучшения судоходства;

- строительство объектов различных категорий на берегах рек на основании прогноза о русловых деформациях, что гарантирует безопасную эксплуатацию данных объектов;

- экономически выгодное использование пойменных территорий для сельского хозяйства и др. целей;

- развитие рекреационных зон на поймах рек.

К перспективам развития следует отнести следующие направления:

- дальнейшие лабораторные исследования данного эффекта и модификация существующей методики проведения экспериментов;

- внедрение полученных результатов в методики учета стока донных наносов;

- создание ГИС участка реки с поймой и фактическими значениями расходов донных наносов с учетом поправок на влияние эффекта взаимодействия;

- разработка поправочного коэффициента в существующие формулы для расчета расходов донных наносов, учитывающего эффект взаимодействия руслового и пойменного потоков.

## **Выводы**

Анализ обобщенных экспериментальных натуральных и лабораторных данных, а также результатов теоретических разработок посвященных проблеме изучения влияния эффекта взаимодействия руслового и пойменного потоков, позволяет получить новые научные результаты, выносимые на защиту: ***структура и содержание базы знаний для прогнозирования русловых деформаций, включающая в себя закономерности воздействия эффекта взаимодействия руслового и пойменного потоков на транспортирующую способность руслового потока в стационарных условиях.***

Выявленные закономерности включают:

- итоговые расчеты, выполненные по формулам, рекомендованным для расчетов расходов донных наносов, - формула ГГИ, формула Гончарова, формула Шамова и др., показали, что погрешности расчетов по ним значительно превышают допустимые пределы. Это, по нашему мнению, обусловлено неучетом в данных формулах эффектов пространственности и взаимодействия руслового и пойменного потоков;

- экспериментальная работа проводилась при стационарном режиме потока, тогда как в натуральных условиях процесс является нестационарным, а плавно изменяющимся. Неучет нестационарности процесса, а также отсутствие натурной информации являются факторами, осложняющими прогнозирование русловых деформаций;

- экспериментально было подтверждено влияние эффекта пространственности на транспортирующую способность руслового потока, суть которого заключается в трансформации скоростных полей руслового потока, которая на малых реках приводит к увеличению донных скоростей при тех же значениях средних, а, следовательно, и к увеличению транспортирующей способности потока;

- установлено, что при сходящихся осях взаимодействующих потоков наблюдается торможение руслового потока пойменным при его вторжении в русло во время разгрузки поймы. Это приводит к значительному уменьшению пропускной способности пойменных русел и, что особенно важно, к еще более резкому (в десятки раз) уменьшению расходов донных наносов. При расходящихся осях потоков наблюдается противоположное явление;

- скорости пойменного потока значительно уменьшаются при наличии пойменной шероховатости, что, в свою очередь, оказывает влияние на скорости руслового потока. Увеличение скоростей руслового потока при шероховатой пойме и 2-ом типе взаимодействия потоков значительно меньше, чем при гладкой пойме, но также приводит к существенному увеличению его транспортирующей способности;

- натурные данные, полученные сотрудниками ГГИ на участке р.Оби у г. Барнаула при пропуске паводка редкой обеспеченности подтверждают выводы о влиянии эффекта взаимодействия руслового и пойменного потоков на транспортирующую способность руслового потока;
- результаты анализа натуральных и лабораторных данных подтверждают наличие принципа саморегулирования в системе речной поток – русло.

***Разработаны практические рекомендации по применению полученных закономерностей при оценке транспортирующей способности руслового потока.***

Рекомендации включают:

- Теоретические основы применения полученных закономерностей в форме методики обоснования целесообразности использования ГИС в интересах совершенствования управления русловыми процессами с последующей реализацией в подразделениях органов Ростехнадзора.
- Прикладные предложения по использованию полученных научных результатов в технологиях оперативного управления русловыми процессами в части проектирования и строительства гидротехнических сооружений, при прокладке трубопроводов, расчетах русловых карьеров, как методика организации деятельности проектных организаций:
  - в СНиПах по автоматизации процессов управления на основе применения современных ГИС-технологий;
  - при создании инженерно-технических сооружений в геосистемах.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В процессе достижения поставленной в диссертации цели получены новые научные результаты, которые выносятся на защиту.

### **1. Выполнен анализ современного состояния проблемы учета расходов и стока донных наносов в структуре речной геосистемы:**

- структура геосистемы является сложносоставной, включает в себя вертикальную и горизонтальную составляющие, предполагающие не только взаимное расположение составных частей, но и способы их соединения. Вертикальная структура образуется компонентами, а горизонтальная отвечает за сочетание систем более низкого ранга. Непрерывные деформации, которым подвержено речное русло и поймы под действием текучей воды называются русловым процессом, который проявляется в виде размыва русла и поймы, а также переноса и аккумуляции наносов. Направленность этого процесса определяется соотношением между расходом наносов и транспортирующей способностью потока, в чем проявляется связь с комплексом природных условий всего водосбора

- недостатками методического аппарата исследования наносов, как компонента речной геосистемы, и расчетных формул являются: отсутствие или высокая стоимость, а также низкое качество натурной информации о стоке донных наносов; высокие погрешности величины расходов донных наносов, полученных при использовании расчетных формул; неучет в формулах эффектов взаимодействия руслового и пойменного потоков и пространственности; отсутствие однозначной терминологии в определении искомой величины в расчетных формулах – расход наносов или транспортирующая способность;

- взаимодействие руслового и пойменного потоков характеризуется: взаимным расположением динамических осей руслового и пойменного потоков, образующим угол  $\alpha$ ; вторжением пойменного потока в русловую при

спаде уровней; растеканием водных масс руслового потока по пойме при поднятии уровней.

- недостатки методического аппарата оценки эффекта взаимодействия руслового и пойменного потоков на транспортирующую способность руслового потока: экспериментальные исследования этого эффекта проводились на лабораторных установках малых размеров; в лабораторных исследованиях не учитывался различный тип подстилающей поверхности поймы.

- систематизация результатов исследований взаимодействия руслового и пойменного потоков на транспортирующую способность руслового потока требует обобщения полученных данных и приведения зависимостей и других закономерностей в единое информационное пространство, что предлагается реализовать в форме базы знаний геоинформационной системы. В результате анализа сформулирована научная задача исследований: *систематизации и анализа пространственно-координированных данных о характеристиках русловых и пойменных потоков в геоинформационной системе для совершенствования методики прогнозирования русловых деформаций.*

## **2. Разработана модифицированная методика экспериментальных исследований взаимодействия руслового и пойменного потоков.**

Модификация методики, которая основывается на ранее применявшейся в РГГМУ, предполагает моделирование шероховатости поймы трех типов.

Целями экспериментальных исследований для решения задач диссертации являются:

- выявление влияния эффекта взаимодействия руслового и пойменного потоков на транспортирующую способность руслового потока;

- оценка влияния типа подстилающей поверхности поймы на транспортирующую способность русла.

Полученные результаты позволяют качественно оценить влияние эффекта взаимодействия руслового и пойменного потоков на транспорт донных наносов в стационарных условиях.

### **3. Разработан алгоритм обработки экспериментальных данных и программное обеспечение по визуализации полученных зависимостей.**

Содержание данного алгоритма включает в себя:

- расчет расходов воды и наносов по экспериментальным данным
- определение транспортирующей способности руслового потока при изолированном от пойменного русловом потоке, а также при их взаимодействии;
- оценка погрешностей определяемых величин;
- расчет расходов донных наносов по расчетным формулам, оценка их погрешностей по сравнению с экспериментальными данными;
- построение графических зависимостей транспортирующей способности руслового потока от глубины и типа взаимодействия;
- расчет отклонений полученных зависимостей от кривой для изолированного руслового потока;

Экспериментальные данные были обобщены и представлены в программе визуализации графических зависимостей, разработанной автором, которая имеет авторское свидетельство.

### **4. Обоснованы структура и содержание базы знаний для прогнозирования русловых деформаций на основании результатов экспериментальных исследований.**

База знаний включает в себя обобщенные закономерности, выявленные экспериментальным путем о поведении взаимодействующих потоков, выраженные в форме математических зависимостей для данных условий.

- экспериментальным методом установлена четкая зависимость между транспортирующей способностью потока и углом между динамическими осями взаимодействующих потоков –  $\alpha$ ; диапазон изменения угла  $\alpha$  был ограничен  $20^\circ$  из-за размеров установки;

- при расходящихся осях взаимодействующих потоков ниже расчетного створа, а также при увеличении глубин и углов  $\alpha$  происходит значительное увеличение транспортирующей способности русловой составляющей потока. Величина этого увеличения находится в прямой зависимости от величины угла  $\alpha$  и глубины потока;

- при условиях для сходящихся осей потоков транспортирующая способность руслового потока уменьшается при увеличении угла  $\alpha$  и увеличивается при увеличении глубины потока;

- при наличии шероховатой поймы для случаев со всеми рассматриваемыми углами при стационарном режиме и постоянном расходе, наносы перемещались вдоль по руслу в донно-грядовой форме;

- анализ результатов итоговых расчетов транспортирующей способности, выполненных по формулам, рекомендованным для расчетов расходов донных наносов, - формула ГГИ, Гончарова, Шамова и др., показал, что полученные погрешности расчетов значительно превышают допустимые пределы. Это, по нашему мнению, обусловлено неучетом в данных формулах эффектов пространственности и взаимодействия руслового и пойменного потоков;

- экспериментальная работа проводилась при стационарном режиме потока, тогда как в натуральных условиях процесс является нестационарным, а плавно изменяющимся. Неучет нестационарности процесса, а также дорогостоящая натурная информация являются факторами, осложняющими прогнозирование русловых деформаций;

- экспериментально было подтверждено влияние эффекта пространственности на транспортирующую способность руслового потока, суть которого заключается в трансформации скоростных полей руслового потока, которая на малых реках приводит к увеличению донных скоростей при тех же значениях средних, а, следовательно, и к увеличению транспортирующей способности потока;

- установлено, что при сходящихся осях взаимодействующих потоков наблюдается торможение руслового потока пойменным при его вторжении в русло во время разгрузки поймы. Это приводит к значительному уменьшению пропускной способности пойменных русел и, что особенно важно, к еще более резкому (в десятки раз) уменьшению расходов донных наносов. При расходящихся осях потоков наблюдается противоположное явление;

- скорости пойменного потока значительно уменьшаются при увеличении пойменной шероховатости, что, в свою очередь, оказывает влияние на скорости руслового потока. Увеличение скоростей руслового потока при шероховатой пойме и 2-ом типе взаимодействия потоков значительно меньше, чем при гладкой пойме, но также приводит к существенному увеличению его транспортирующей способности;

- натурные данные, полученные сотрудниками ГГИ на участке р.Оби у г. Барнаула при пропуске паводка редкой обеспеченности подтверждают выводы о влиянии эффекта взаимодействия руслового и пойменного потоков на транспортирующую способность руслового потока;

- результаты анализа натуральных и лабораторных данных подтверждают наличие принципа саморегулирования в системе речной поток – русло.

#### **5. Разработаны практические рекомендации по учету влияния эффекта взаимодействия руслового и пойменного потоков при оценке транспортирующей способности руслового потока в управлении речной геосистемой.**

- Теоретические предложения: методика обоснования целесообразности использования ГИС в интересах совершенствования управления русловыми процессами с последующей реализацией в подразделениях органов Ростехнадзора

- Прикладные предложения: данные научно-практические результаты целесообразно использовать в технологиях оперативного

управления русловыми процессами в части проектирования и строительства гидротехнических сооружений, при прокладке трубопроводов, расчетах русловых карьеров, как методика организации деятельности проектных организаций

- Разработать СНиП по автоматизации процессов управления на основе применения современных ГИС-технологий.

- Для оценки транспортирующей способности необходимо учитывать, что при сходящихся осях взаимодействующих потоков наблюдается торможение руслового потока пойменным при его вторжении в русловую во время разгрузки поймы, что приводит к значительному уменьшению данной характеристики, а при расходящихся осях потоков наблюдается противоположное явление;

- целесообразным является дальнейшее проведение экспериментальных исследований на моделях больших размеров, для расширения диапазонов входных параметров;

- необходимо дополнить модель натурными данными для усовершенствования методики прогнозирования русловых деформаций при разных условиях и на конкретных объектах;

- требующей своего решения является проблема совершенствования методов расчетов стока донных наносов. Она осложнена отсутствием не только данных натуральных измерений, но даже и самой методики их измерений. Поэтому в настоящее время был использован метод физического моделирования. Несмотря на то, что модельные испытания не могут окончательно решить проблему, они позволяют наметить пути ее решения, в частности, вскрыть закономерности сложного процесса взаимодействия руслового и пойменного потоков, и выявить его влияние на транспорт донных наносов при движении воды по затопленным поймам.

- перспективой развития направления по разработке прогнозов русловых деформаций является создание геоинформационной системы, где будет учтено влияние этого эффекта.
- необходимо создание общего хранилища натурной и лабораторной информации, данные из которого могут использоваться при гидротехническом проектировании и строительстве различных объектов на поймах, а также для развития сельского хозяйства и рекреационных зон.
- рекомендовано продолжить разработку программного обеспечения для визуализации экспериментальных данных.
- отсутствие полноценной комплексной структуры обобщения данных экспериментальных исследований негативно влияет на развитие данного направления;
- применение ГИС при обработке натуральных данных позволило бы усовершенствовать методику прогнозирования русловых деформаций.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 Сочава В.Б. Введение в учение о геосистемах – Новосибирск: Наука, Сиб. отд., 1978. – 319с.
- 2 Истомина Е.П., Кирсанов С.А., Соколов А.Г., Колбина О.Н. Феномен геоинформационного управления и принципы его реализации // Вестник Санкт-Петербургского университета. Серия 7: Геология. География. – 2014. – №4. – С. 180-188. – ISSN1029-7456/
- 3 Лурье И.К. Основы геоинформатики и создание ГИС. Учебное пособие. – М: ООО ИНЭКС-92, 2002 140с.
- 4 Дж. Элти, М. Кумбс. Экспертные системы: концепции и примеры: пер. с англ. – М.: Финансы и статистика, 1987. – 190 с.
- 5 Капралов Е.Г., Кошкарев А.В., Тикунов В.С. и др.; Под ред. В.С.Тикунова. Геоинформатика. Учеб. для студ. Вузов. — М: Издательский центр «Академия», 2005. — 480 с
- 6 Шихов А.Н., Черепанова Е.С., Пономарчук А.И. Геоинформационные системы: применение ГИС-технологий при решении гидрологических задач: практикум. Учеб. Пособие. – Пермь: Перм. гос. нац. исслед. ун-т, 2014. – 91 с.
- 7 Магомедова А.В., Курбанова З.А. Исследование русловых переформирований устьевое участка р. Терек с использованием ГИС-технологий // Труды Международной конференции по эрозионно-селевым явлениям. Тбилиси, 2001.-С. 118-121.
- 8 Орлова Е. В. Определение географических и гидрологических характеристик бассейна Печоры с использованием ГИС-технологии. Метеорология и гидрология №4, М: Научно-исследовательский центр космической гидрометеорологии «Планета», 2008. - С.81-88
- 9 Бурлов В.Г. Основы моделирования социально-экономических и политических процессов (Методология. Методы) СПб: Факультет Комплексной Безопасности, СПбГПУ.2007г.-265 с.

- 10 Бурлов В.Г. Математические методы моделирования в экономике. Часть 1, -С-Пб. СПбГПУ, Факультет безопасности, НП «Стратегия будущего», 2007.- 330с.
- 11 Барышников Н. Б. Взаимодействие руслового и пойменного потоков. Конспект лекций. — Л.: Изд. ЛПИ (ЛГМИ), 1984. — 50с.
- 12 Федотов Г.А., Наумов Г.Г. Дорожные переходы через водотоки. Учебное пособие. – М.: ИНФРА-М, 2015. – 520с.
- 13 Вильямс В.Р. Почвоведение [текст].- 6-е изд.-М.: 1949. – 472 с.
- 14 Чалов Р.С., Штанкова Н.Н. Сток наносов, доля стока влекомых наносов в нём и их отражение в формах проявления русловых процессов на реках бассейна Волги [текст]. Труды Академии проблем водохозяйственных наук. Вып. 9. Проблемы русловедения. – М.: МГУ. 2003. С. 195-205.
- 15 Барышников Н.Б., Исаев Д.И. Русловые процессы [текст] Учебник. – СПб.: изд.РГГМУ.–2014. – 503с.
- 16 Гришанин К.В. Гидравлическое сопротивление естественных русел [текст]. – СПб.: Гидрометеиздат. 1992. – 184 с.
- 17 Алексеевский Н.И., Чалов Р.С. Перемещение твёрдого вещества водными потоками, их руслоформирующая деятельность и формы проявления [текст]. Труды Академии проблем водохозяйственных наук. Вып. 7. Русловедение и гидроэкология.- М.: МГУ. 2001.
- 18 Калинин А.М. Формирование склонов долины Днестра и русловые процессы. Закономерности проявления эрозионных и русловых процессов в различных природных условиях[текст].- М.: МГУ. 1987.
- 19 Беркович К.М., Злотина Л.В., Иванов В.В., Никитина Л.Н., Рязанов П.Н., Турыкин Л.А., Чалов Р.С., Чернов А.В. Развитие русла нижнего и среднего Днестра в условиях интенсивной антропогенной нагрузки. Экологические проблемы эрозии почв и русловых процессов[текст].- М.: МГУ. 1992. С. 141-165.

- 20 Чалов Р.С., Лю Шугуан, Алексеевский Н.И. Сток наносов и русловые процессы на больших реках России и Китая (Северная Двина, Обь, Лена, Хуанхэ, Янцзы) [текст].- М.: МГУ. 2000. 212 с.
- 21 Алексеевский Н.И. , Чалов Р.С. Движение наносов и русловые процессы — М.:Изд-во МГУ,1997.—171 с.
- 22 Барышников Н.Б. Речные поймы (морфология и гидравлика) [текст].- Л.: Гидрометеиздат. 1978. 152 с.
- 23 Гончаров В.Н. Динамика русловых потоков [текст].- Л.: Гидрометеиздат. 1962. 374 с.
- 24 Шамов Г.И. Речные наносы. Режим, расчеты и методы измерений - 2 изд., испр. и доп. — Л.: Гидрометеиздат, 1959. — 377 с.
- 25 Н. А. Einstein, The Bed-Load Function for Sediment Transportation in Open Channel Flows, U.S. Department of Agriculture, Soil Conservation Service, Washington, DC, USA, 1950.
- 26 Великанов М.А. Русловой процесс [текст].-М.: Физматгиз, 1958.- 396 с.
- 27 Копалиани З.Д., Снищенко Б.Ф. Оценка стока наносов рек южного склона Кавказского хребта Краснодарского края [текст].- СПб, отчет НИР ГГИ, 2002, биб-ка ГГИ (рукопись).
- 28 Клавен А.Б., Копалани З.Д. Экспериментальные исследования и гидравлическое моделирование речных потоков и руслового процесса [текст] – СПб: Нестор-История, 2011. – 504с.
- 29 Самохвалова О.А. Расчет высоты песчаных гряд в больших и малых равнинных реках // Вестник СПбГУ. – 2011. – Сер. 7. – Вып. 4. – С. 135–148.
- 30 Самохвалова О.А. Расчеты скорости перемещения песчаных гряд в равнинных реках // Водные пути и русловые процессы. – 2013. – Вып. 1. – С. 182–200.

31 Shinohara K., Tsubaki T. On the characteristics of sand waves formed upon the beds of open channels and rivers // Reports of Research institute for applied mechanics. – 1959. – vol. 7. – № 25. – P. 15–45.

32 Аскурава М.Е., Кутава В.И., Мачарадзе Г.Т., Мисхели К.П., Рухадзе Н.В. Статистические приёмы анализа гидрологических данных по наносам горных рек для прогнозов заиления водохранилищ и образования суспензионных течений [текст]// Труды V Всесоюзного гидрол. съезда. Т. 10. Кн. 2. Л.: Гидрометеиздат. 1988. с. 95-102.

33 Рухадзе Н.В. Динамические особенности русловых процессов горно-предгорных участков рек [текст]. Автореферат диссертации кандидата технических наук.- М.: 1983. 16 с.

34 Пейнтер Р.Б. Речные наносы [текст]// Грани гидрологии.-Л.: Гидрометеиздат. 1980. с. 195-212.

35 Знаменская Н.С. Гидравлическое моделирование русловых процессов [текст].-Л.: Гидрометеиздат. 1992. 240 с.

36 Попов И.В. Типизация пойм в связи со строительным проектированием [текст]// Движение наносов в открытых руслах.- М.: Наука. 1970. С. 28-32.

37 Чернов А.В. Геоморфология пойм равнинных рек [текст]. М.: МГУ. 1983. 198 с.

38 Шанцер Е.В. Очерки учения о генетических типах континентальных осадочных образований [текст].- Труды Геологического ин-та АН СССР, 1966, вып. 161, 240 с.

39 Маккавеев Н.И., Советов В.С. Трассирование землечерпательных прорезей на перекатах равнинных рек Европейской части СССР [текст] // Маккавеев. Н.И. Теоретические и прикладные вопросы почвоведения и русловых процессов. Избранные труды.- М.: Географический факультет МГУ. 2003. С. 171-230.

- 40 Барышников Н.Б. Методика расчета пропускной способности русел с поймами [текст].-Межвузовский сборник. Труды ЛПИ (ЛГМИ), 1969, вып. 69, с. 127-43.
- 41 Антроповский В. И. Гидроморфологические зависимости и их дальнейшее развитие [текст].-Труды ГГИ, 1969, вып. 169, с. 34—86.
- 42 Барышников Н. Б., Субботина Е. С. Зависимость уклонов свободной поверхности при пропуске паводков по пойме от морфометрических характеристик русла и поймы [текст].- Метеорология и гидрология, 1981, № 1, с. 82—88.
- 43 Маккавеев Н.И. Русло реки и эрозия в её бассейне[текст].- М.: АН СССР. 1955. 346 с.
- 44 Еленевский Р.А. Вопросы изучения и освоения пойм [текст]. - М.: ВАСХНИЛ, 1936. 100 с.
- 45 Усачев В.Ф. Анализ изменения уровней воды для оценки процессов затопления и опорожнения многорукавной поймы [текст].- Труды ГГИ, 1972, вып. 195, с. 63—76.
- 46 Великанов М.А. Русловой процесс (основы теории) [текст].- М.: Госфизматгиз. 1958. 395 с.
- 47 Чалов Р.С. – Русловые процессы (русловедение): учебник / Р.С. Чалов – М.: ИНФРА-М, 2016. – 569 с.
- 48 Форхгеймер Ф. Гидравлика [текст].-М.: ОНТИ, 1935.—615 с.
- 49 Барышников Н.Б. Морфология, гидрология и гидравлика пойм [текст] - Л.: Гидрометеиздат, 1984
- 50 Поляков Б.В. Гидрология бассейна р.Дона.- Ростов-на-Дону [текст].-М.:Изд. Управления Главного инженера строительства Волго -Дона, 1930. 331 с.
- 51 Железняков Г.В. Гидравлическое обоснование методов речной гидрометрии [текст].-М.-Л.: АН СССР, 1950.—163 с.

52 Железняков Г.В., Барышников Н.Б., Алтунин В.С. Влияние кинематического эффекта безнапорного потока на транспорт наносов [текст] // Движение наносов в открытых руслах.- М.: Наука. 1970. С. 19-23.

53 Барышников Н.Б. Динамика русловых потоков [учебник].- СПб.: Гидрометеиздат, 2016. 341с.

54 Барышников Н.Б., Николаев В.Ф. Пропускная способность русла с различной шероховатостью [текст].- Труды ЛГМИ, 1967, вып. 25, с. 28—33.

55 Радюк А.Л. Трассирование прорезей на порогах с учетом кинематического эффекта [текст].- Красноярск, 1973.- 28 с. Рукопись деп. в ВИНТИ, № 6750—73.

56 Барышников Н.Б., Иванов Г.В. Взаимодействие руслового и пойменного потоков при пересечении их осей [текст].- Труды ЛГМИ, 1972, вып. 46

57 Барышников Н.Б., Транспорт русловых наносов в прямолинейных потоках с поймой [текст]. - Труды ЛГМИ, 1967, вып. 25, с. 50-73.

58 Спицын И. П. О взаимодействии потоков основного русла и поймы.— Метеорология и гидрология, 1962, № 10, с. 22—27.

59 Саликов В.Г. Экспериментальное исследование движения воды и формы рельефа дна в открытом изогнутом русле при выходе потока на пойму. - Известия вузов СССР. Энергетика, 1972, № 1, с. 109—115.

60 Скородумов Д.Е. Вопросы гидравлики пойменных русел в связи с задачами построения и экстраполяции кривых расходов воды [текст].- Труды ГГИ, 1965, вып. 128., с. 3-96

61 Карасев И.Ф. Русловые процессы при переброске стока [текст].- Л.: Гидрометеиздат. 1975. 288 с.

62 Великанова З.М., Ярных Н.А. Натурные исследования гидравлики пойменного массива в высокое половодье [текст].-Труды ГГИ, 1970, вып. 183, с. 33—53.

63 Васильченко Г.В. Моделирование гидравлических сопротивлений пойменного потока равнинных рек [текст].- Мелиорация и водное хозяйство, 1980, вып. 50, с. 27—32.

64 Соколов Ю.Н. Лабораторные исследования пропускной способности русла при пересечении под прямым углом пойменного и руслового потока [текст].- В кн.: Вопросы водохозяйственного строительства. Минск, 1969, с.

65 Срибный М.Ф. Нормы сопротивления движению естественных водотоков и расчет отверстий больших мостов [текст].- М.-Л.: Госстройиздат, 1932. 148 с.

66 Русловой процесс [текст]/Под ред. Н.Е. Кондратьева.- Л.: Гидрометеиздат, 1959 - 371 с.

67 Кондратьев Н. Е., Попов И. В., Сниценко Б. Ф. Основы гидроморфологической теории руслового процесса. — Л.: Гидрометеиздат, 1982. — 272 с.

68 Знаменская Н.С. Донные наносы и русловые процессы [текст].- Л.: Гидрометеиздат, 1976.— 191 с.

69 Копалиани З. Д., Федорова З.Н. Натурные исследования процессов затопления поймы и развитие пойменных течений на р. Полометь у с. Заречье [текст].-Труды ГГИ, 1970, вып. 183, с. 26-32.

70 Знаменская Н. С. Грядовое движение наносов[текст]. — Л.: Гидрометеиздат, 1968. — 188 с.

71 Андреев О.В., Ярославцев И.А. Защита мостовых переходов от размыва. -М.:Автотрансиздат, 1959. -148с.

72 Мирцхулава Ц.Е. Основы физики и механики эрозии русел. Л.: Гидрометеиздат, 1988. 303 с.

73 Лелявский С.И. Введение в речную гидравлику. Л.: Гидрометеиздат, 1961, 231 с.

74 Роджерс Д., Адамс Дж. Математические основы машинной графики. — М.: Мир, 2001, 604с.

75 Барышников Н.Б., Самусева Е.А. – Антропогенное воздействие на саморегулирующуюся систему бассейн – речной поток - русло. - СПб: Изд. РГГМУ, 1999. – 220 с.

76 Барышников Н.Б. Исследование возможности кардинальных изменений взаимозависимых процессов функционирования саморегулирующейся системы «бассейн – речной поток – русло» под воздействием глобального потепления и антропогенного пресса [текст]. – Отчет о научно-исследовательской работе, 2008.

77 Коринец Е.М., Барышников Н.Б. Донные наносы, - Ученые записки РГГМУ, 2015, №39, С.44-49

78 Baker M., Penny D. Is there a reproducibility crisis? // Nature. — 2016. Vol 533, 26 may. P. 452–454.

79 Маккавеев Н.И., Чалов Р.С. Русловые процессы. М.: Изд-во МГУ, 1986. 264 с.

80 Беркович К.М., Чалов Р.С., Чернов А.В. Проблемы рационального использования речных пойм в народном хозяйстве // География и природ. ресурсы. 1988. № 1. С. 24-31.

81 Алексеевский Н.И., Гайкович А.Б. К расчету стока влекомых наносов на неизученных реках в период межени [текст]// Метеорология и гидрология. 1987. № 8. С. 96-102.

82 Факторович М.Э. Схематизация процессов руслоформирования и развитие методики расчета русловых трансформаций. Движение наносов в открытых руслах[текст].- М.: Наука. 1970. С. 32-37

ПРИЛОЖЕНИЯ

Листинг кода программы на языке C# в Microsoft Visual studio  
для визуализации экспериментальных данных

```
using System;
using System.Collections.Generic;
using System.ComponentModel;
using System.Data;
using System.Drawing;
using System.Linq;
using System.Text;
using System.Threading.Tasks;
using System.Windows.Forms;

namespace WindowsFormsApplication2
{
    public partial class Form1 : Form
    {
        public Form1()
        {
            InitializeComponent();
        }

        private void button1_Click(object sender, EventArgs e)
        {
            OpenFileDialog ofd = new OpenFileDialog();
            ofd.DefaultExt = "*.xls;*.xlsx";
            ofd.Filter = "Excel 2007(*.xlsx)|*.xlsx";
            ofd.Title = "Выберите документ для загрузки данных";
        }
    }
}
```

```
if (ofd.ShowDialog() == DialogResult.OK)
{
    textBox1.Text = ofd.FileName;

    String constr = "Provider=Microsoft.ACE.OLEDB.12.0;Data
Source=" +
        ofd.FileName +
        ";Extended Properties='Excel 12.0 XML;HDR=YES;'";

    System.Data.OleDb.OleDbConnection con =
        new System.Data.OleDb.OleDbConnection(constr);
    con.Open();

    DataSet ds = new DataSet();
    DataTable schemaTable =
con.GetOleDbSchemaTable(System.Data.OleDb.OleDbSchemaGuid.Tables,
        new object[] { null, null, null, "TABLE" });

    string sheet1 = (string)schemaTable.Rows[0].ItemArray[2];
    string select = String.Format("SELECT * FROM [{0}]", sheet1);

    System.Data.OleDb.OleDbDataAdapter ad =
        new System.Data.OleDb.OleDbDataAdapter(select, con);

    ad.Fill(ds);

    DataTable tb = ds.Tables[0];
    con.Close();
    dataGridView1.DataSource = tb;
    con.Close();
```

```
    }  
    else  
    {  
        MessageBox.Show("Вы не выбрали файл для открытия",  
            "Загрузка данных...", MessageBoxButtons.OK,  
            MessageBoxIcon.Error);  
    }  
}  
  
private void button2_Click(object sender, EventArgs e)  
{  
    for (int i = 0; i < dataGridView1.Rows.Count; i++)  
    {  
        double x =  
Convert.ToDouble(dataGridView1.Rows[i].Cells[0].Value);  
        double y =  
Convert.ToDouble(dataGridView1.Rows[i].Cells[1].Value);  
        chart1.Series[0].Points.AddXY(x, y);  
        chart1.ChartAreas[0].AxisX.Maximum = 14;  
        chart1.ChartAreas[0].AxisX.Minimum = 0;  
    }  
}  
  
private void button4_Click(object sender, EventArgs e)  
{  
    OpenFileDialog ofd = new OpenFileDialog();  
    ofd.DefaultExt = "*.xls;*.xlsx";  
    ofd.Filter = "Excel 2007(*.xlsx)|*.xlsx";  
    ofd.Title = "Выберите документ для загрузки данных";  
    if (ofd.ShowDialog() == DialogResult.OK)
```

```

{
    textBox2.Text = ofd.FileName;
    String constr = "Provider=Microsoft.ACE.OLEDB.12.0;Data
Source=" +
    ofd.FileName +
    ";Extended Properties='Excel 12.0 XML;HDR=YES;';";
    System.Data.OleDb.OleDbConnection con =
    new System.Data.OleDb.OleDbConnection(constr);
    con.Open();
    DataSet ds = new DataSet();
    DataTable schemaTable =
con.GetOleDbSchemaTable(System.Data.OleDb.OleDbSchemaGuid.Tables,
    new object[] { null, null, null, "TABLE" });
    string sheet1 = (string)schemaTable.Rows[0].ItemArray[2];
    string select = String.Format("SELECT * FROM [{0}]", sheet1);
    System.Data.OleDb.OleDbDataAdapter ad =
    new System.Data.OleDb.OleDbDataAdapter(select, con);
    ad.Fill(ds);
    DataTable tb = ds.Tables[0];
    con.Close();
    dataGridView2.DataSource = tb;
    con.Close();
}
else
{
    MessageBox.Show("Вы не выбрали файл для открытия",
    "Загрузка данных...", MessageBoxButtons.OK,
    MessageBoxIcon.Error);
}

```

```

    }

    private void button3_Click(object sender, EventArgs e)
    {
        for (int i = 0; i < dataGridView2.Rows.Count; i++)
        {
            double x =
Convert.ToDouble(dataGridView2.Rows[i].Cells[0].Value);
            double y =
Convert.ToDouble(dataGridView2.Rows[i].Cells[1].Value);
            chart1.Series[1].Points.AddXY(x, y);
            chart1.ChartAreas[0].AxisX.Maximum = 14;
            chart1.ChartAreas[0].AxisX.Minimum = 0;
        }
    }

    private void button5_Click(object sender, EventArgs e)
    {
        OpenFileDialog ofd = new OpenFileDialog();
        ofd.DefaultExt = "*.xls;*.xlsx";
        ofd.Filter = "Excel 2007(*.xlsx)|*.xlsx";
        ofd.Title = "Выберите документ для загрузки данных";
        if (ofd.ShowDialog() == DialogResult.OK)
        {
            textBox3.Text = ofd.FileName;

            String constr = "Provider=Microsoft.ACE.OLEDB.12.0;Data
Source=" +
            ofd.FileName +
            ";Extended Properties='Excel 12.0 XML;HDR=YES;';";
            System.Data.OleDb.OleDbConnection con =

```

```

new System.Data.OleDb.OleDbConnection(constr);
con.Open();
DataSet ds = new DataSet();
DataTable schemaTable =
con.GetOleDbSchemaTable(System.Data.OleDb.OleDbSchemaGuid.Tables,
new object[] { null, null, null, "TABLE" });
string sheet1 = (string)schemaTable.Rows[0].ItemArray[2];
string select = String.Format("SELECT * FROM [{0}]", sheet1);
System.Data.OleDb.OleDbDataAdapter ad =
new System.Data.OleDb.OleDbDataAdapter(select, con);
ad.Fill(ds);
DataTable tb = ds.Tables[0];
con.Close();
dataGridView3.DataSource = tb;
con.Close();
}
else
{
MessageBox.Show("Вы не выбрали файл для открытия",
"Загрузка данных...", MessageBoxButtons.OK,
MessageBoxIcon.Error);
}
}

private void button6_Click(object sender, EventArgs e)
{
for (int i = 0; i < dataGridView3.Rows.Count; i++)
{

```

```

        double x =
Convert.ToDouble(dataGridView3.Rows[i].Cells[0].Value);
        double y =
Convert.ToDouble(dataGridView3.Rows[i].Cells[1].Value);
        chart1.Series[2].Points.AddXY(x, y);
        chart1.ChartAreas[0].AxisX.Maximum = 14;
        chart1.ChartAreas[0].AxisX.Minimum = 0;
    }
}

private void button7_Click(object sender, EventArgs e)
{
    OpenFileDialog ofd = new OpenFileDialog();
    ofd.DefaultExt = "*.xls;*.xlsx";
    ofd.Filter = "Excel 2007(*.xlsx)|*.xlsx";
    ofd.Title = "Выберите документ для загрузки данных";
    if (ofd.ShowDialog() == DialogResult.OK)
    {
        textBox4.Text = ofd.FileName;
        String constr = "Provider=Microsoft.ACE.OLEDB.12.0;Data
Source=" +
        ofd.FileName +
        ";Extended Properties='Excel 12.0 XML;HDR=YES;';";
        System.Data.OleDb.OleDbConnection con =
        new System.Data.OleDb.OleDbConnection(constr);
        con.Open();
        DataSet ds = new DataSet();
        DataTable schemaTable =
con.GetOleDbSchemaTable(System.Data.OleDb.OleDbSchemaGuid.Tables,
        new object[] { null, null, null, "TABLE" });

```

```

string sheet1 = (string)schemaTable.Rows[0].ItemArray[2];
string select = String.Format("SELECT * FROM [{0}]", sheet1);
System.Data.OleDb.OleDbDataAdapter ad =
new System.Data.OleDb.OleDbDataAdapter(select, con);
ad.Fill(ds);
DataTable tb = ds.Tables[0];
con.Close();
dataGridView4.DataSource = tb;
con.Close();
}
else
{
    MessageBox.Show("Вы не выбрали файл для открытия",
        "Загрузка данных...", MessageBoxButtons.OK,
        MessageBoxIcon.Error);
}
}

private void button8_Click(object sender, EventArgs e)
{
    for (int i = 0; i < dataGridView4.Rows.Count; i++)
    {
        double x =
Convert.ToDouble(dataGridView4.Rows[i].Cells[0].Value);
        double y =
Convert.ToDouble(dataGridView4.Rows[i].Cells[1].Value);
        chart1.Series[3].Points.AddXY(x, y);
        chart1.ChartAreas[0].AxisX.Maximum = 14;
        chart1.ChartAreas[0].AxisX.Minimum = 0;
    }
}

```

```

}

private void button9_Click(object sender, EventArgs e)
{
    OpenFileDialog ofd = new OpenFileDialog();
    ofd.DefaultExt = "*.xls;*.xlsx";
    ofd.Filter = "Excel 2007(*.xlsx)|*.xlsx";
    ofd.Title = "Выберите документ для загрузки данных";
    if (ofd.ShowDialog() == DialogResult.OK)
    {
        textBox5.Text = ofd.FileName;
        String constr = "Provider=Microsoft.ACE.OLEDB.12.0;Data
Source=" +
        ofd.FileName +
        ";Extended Properties='Excel 12.0 XML;HDR=YES;';";
        System.Data.OleDb.OleDbConnection con =
        new System.Data.OleDb.OleDbConnection(constr);
        con.Open();
        DataSet ds = new DataSet();
        DataTable schemaTable =
con.GetOleDbSchemaTable(System.Data.OleDb.OleDbSchemaGuid.Tables,
        new object[] { null, null, null, "TABLE" });
        string sheet1 = (string)schemaTable.Rows[0].ItemArray[2];
        string select = String.Format("SELECT * FROM [{0}]", sheet1);
        System.Data.OleDb.OleDbDataAdapter ad =
        new System.Data.OleDb.OleDbDataAdapter(select, con);
        ad.Fill(ds);
        DataTable tb = ds.Tables[0];
        con.Close();
        dataGridView5.DataSource = tb;
    }
}

```

```
        con.Close();
    }
    else
    {
        MessageBox.Show("Вы не выбрали файл для открытия",
            "Загрузка данных...", MessageBoxButtons.OK,
            MessageBoxIcon.Error);
    }
}

private void button10_Click(object sender, EventArgs e)
{
    for (int i = 0; i < dataGridView4.Rows.Count; i++)
    {
        double x =
Convert.ToDouble(dataGridView4.Rows[i].Cells[0].Value);
        double y =
Convert.ToDouble(dataGridView4.Rows[i].Cells[1].Value);
        chart1.Series[4].Points.AddXY(x, y);
        chart1.ChartAreas[0].AxisX.Maximum = 14;
        chart1.ChartAreas[0].AxisX.Minimum = 0;
    }
}
}
```

Таблица обработанных экспериментальных данных

№эксперимента	Тип взаимодействия	Номер типа	Значение угла	Угол в градусах	Тип поймы	Номер типа	Глубина, см	Расход донных наносов, г/с
1	II (расходящиеся оси)		2 5°		5 гладкая	1	6	9,16
2	II (расходящиеся оси)		2 5°		5 гладкая	1	7	12,23
3	II (расходящиеся оси)		2 5°		5 гладкая	1	8	22,16
4	II (расходящиеся оси)		2 5°		5 гладкая	1	9	29,01
5	II (расходящиеся оси)		2 5°		5 гладкая	1	10	35,87
6	II (расходящиеся оси)		2 5°		5 гладкая	1	11	48,32
7	II (расходящиеся оси)		2 5°		5 гладкая	1	12	60,78
8	II (расходящиеся оси)		2 10°		10 гладкая	1	6	12,32
9	II (расходящиеся оси)		2 10°		10 гладкая	1	7	16,96
10	II (расходящиеся оси)		2 10°		10 гладкая	1	8	33,80
11	II (расходящиеся оси)		2 10°		10 гладкая	1	9	45,98
12	II (расходящиеся оси)		2 10°		10 гладкая	1	10	58,17
13	II (расходящиеся оси)		2 10°		10 гладкая	1	11	79,29
14	II (расходящиеся оси)		2 10°		10 гладкая	1	12	100,41
15	II (расходящиеся оси)		2 15°		15 гладкая	1	6	18,90
16	II (расходящиеся оси)		2 15°		15 гладкая	1	7	26,98
17	II (расходящиеся оси)		2 15°		15 гладкая	1	8	55,55
18	II (расходящиеся оси)		2 15°		15 гладкая	1	9	76,04
19	II (расходящиеся оси)		2 15°		15 гладкая	1	10	96,54
20	II (расходящиеся оси)		2 15°		15 гладкая	1	11	141,55
21	II (расходящиеся оси)		2 15°		15 гладкая	1	12	186,56
22	II (расходящиеся оси)		2 20°		20 гладкая	1	6	30,04
23	II (расходящиеся оси)		2 20°		20 гладкая	1	7	44,78
24	II (расходящиеся оси)		2 20°		20 гладкая	1	8	110,08
25	II (расходящиеся оси)		2 20°		20 гладкая	1	9	160,64
26	II (расходящиеся оси)		2 20°		20 гладкая	1	10	211,20
27	II (расходящиеся оси)		2 20°		20 гладкая	1	11	396,40
28	II (расходящиеся оси)		2 20°		20 гладкая	1	12	581,61
29	II (расходящиеся оси)		2 5°		5 шероховатая	2	6	3,00
30	II (расходящиеся оси)		2 5°		5 шероховатая	2	7	3,80
31	II (расходящиеся оси)		2 5°		5 шероховатая	2	8	4,47
32	II (расходящиеся оси)		2 5°		5 шероховатая	2	9	5,15
33	II (расходящиеся оси)		2 5°		5 шероховатая	2	10	5,70
34	II (расходящиеся оси)		2 5°		5 шероховатая	2	11	6,20
35	II (расходящиеся оси)		2 5°		5 шероховатая	2	12	6,70
36	II (расходящиеся оси)		2 5°		5 шероховатая	2	13	7,15
37	II (расходящиеся оси)		2 10°		10 шероховатая	2	6	4,18
38	II (расходящиеся оси)		2 10°		10 шероховатая	2	7	5,05
39	II (расходящиеся оси)		2 10°		10 шероховатая	2	8	5,80
40	II (расходящиеся оси)		2 10°		10 шероховатая	2	9	6,52
41	II (расходящиеся оси)		2 10°		10 шероховатая	2	10	7,20
42	II (расходящиеся оси)		2 10°		10 шероховатая	2	11	7,65
43	II (расходящиеся оси)		2 10°		10 шероховатая	2	12	8,25
44	II (расходящиеся оси)		2 15°		15 шероховатая	2	5	5,50
45	II (расходящиеся оси)		2 15°		15 шероховатая	2	6	6,20
46	II (расходящиеся оси)		2 15°		15 шероховатая	2	7	6,75
47	II (расходящиеся оси)		2 15°		15 шероховатая	2	8	7,25
48	II (расходящиеся оси)		2 15°		15 шероховатая	2	9	7,60
49	II (расходящиеся оси)		2 15°		15 шероховатая	2	10	8,00
50	II (расходящиеся оси)		2 15°		15 шероховатая	2	11	8,30
51	II (расходящиеся оси)		2 15°		15 шероховатая	2	12	8,60
52	II (расходящиеся оси)		2 15°		15 шероховатая	2	13	9,00
53	II (расходящиеся оси)		2 20°		20 шероховатая	2	5	7,15
54	II (расходящиеся оси)		2 20°		20 шероховатая	2	6	7,85
55	II (расходящиеся оси)		2 20°		20 шероховатая	2	7	8,65
56	II (расходящиеся оси)		2 20°		20 шероховатая	2	8	9,20
57	II (расходящиеся оси)		2 20°		20 шероховатая	2	9	9,80
58	II (расходящиеся оси)		2 20°		20 шероховатая	2	10	10,35
59	II (расходящиеся оси)		2 20°		20 шероховатая	2	11	10,93
60	II (расходящиеся оси)		2 20°		20 шероховатая	2	12	11,43

Таблица обработанных экспериментальных данных (продолжение)

№эксперимента	Тип взаимодействия	Номер типа	Значение угла	Угол в градусах	Тип поймы	Номер типа	Глубина, см	Расход донных наносов, г/с
61	III (сходящиеся оси)	3	5°		5 гладкая	1	5	0,80
62	III (сходящиеся оси)	3	5°		5 гладкая	1	6	0,86
63	III (сходящиеся оси)	3	5°		5 гладкая	1	7	0,92
64	III (сходящиеся оси)	3	5°		5 гладкая	1	8	0,98
65	III (сходящиеся оси)	3	5°		5 гладкая	1	9	1,04
66	III (сходящиеся оси)	3	5°		5 гладкая	1	10	1,10
67	III (сходящиеся оси)	3	10°		10 гладкая	1	5	0,60
68	III (сходящиеся оси)	3	10°		10 гладкая	1	6	0,66
69	III (сходящиеся оси)	3	10°		10 гладкая	1	7	0,72
70	III (сходящиеся оси)	3	10°		10 гладкая	1	8	0,78
71	III (сходящиеся оси)	3	10°		10 гладкая	1	9	0,84
72	III (сходящиеся оси)	3	10°		10 гладкая	1	10	0,90
73	III (сходящиеся оси)	3	15°		15 гладкая	1	5	0,07
74	III (сходящиеся оси)	3	15°		15 гладкая	1	6	0,11
75	III (сходящиеся оси)	3	15°		15 гладкая	1	7	0,15
76	III (сходящиеся оси)	3	15°		15 гладкая	1	8	0,19
77	III (сходящиеся оси)	3	15°		15 гладкая	1	9	0,23
78	III (сходящиеся оси)	3	15°		15 гладкая	1	10	0,27
79	III (сходящиеся оси)	3	20°		20 гладкая	1	5	0,00
80	III (сходящиеся оси)	3	20°		20 гладкая	1	6	0,02
81	III (сходящиеся оси)	3	20°		20 гладкая	1	7	0,04
82	III (сходящиеся оси)	3	20°		20 гладкая	1	8	0,06
83	III (сходящиеся оси)	3	20°		20 гладкая	1	9	0,08
84	III (сходящиеся оси)	3	20°		20 гладкая	1	10	0,10
85	III (сходящиеся оси)	3	5°		5 шероховатая	2	6	0,86
86	III (сходящиеся оси)	3	5°		5 шероховатая	2	7	0,91
87	III (сходящиеся оси)	3	5°		5 шероховатая	2	8	1,00
88	III (сходящиеся оси)	3	5°		5 шероховатая	2	9	1,04
89	III (сходящиеся оси)	3	5°		5 шероховатая	2	10	1,08
90	III (сходящиеся оси)	3	5°		5 шероховатая	2	11	1,15
91	III (сходящиеся оси)	3	5°		5 шероховатая	2	12	1,21
92	III (сходящиеся оси)	3	10°		10 шероховатая	2	6	0,32
93	III (сходящиеся оси)	3	10°		10 шероховатая	2	7	0,39
94	III (сходящиеся оси)	3	10°		10 шероховатая	2	8	0,51
95	III (сходящиеся оси)	3	10°		10 шероховатая	2	9	0,55
96	III (сходящиеся оси)	3	10°		10 шероховатая	2	10	0,60
97	III (сходящиеся оси)	3	10°		10 шероховатая	2	11	0,65
98	III (сходящиеся оси)	3	10°		10 шероховатая	2	12	0,71
99	III (сходящиеся оси)	3	15°		15 шероховатая	2	6	0,10
100	III (сходящиеся оси)	3	15°		15 шероховатая	2	7	0,14
101	III (сходящиеся оси)	3	15°		15 шероховатая	2	8	0,21
102	III (сходящиеся оси)	3	15°		15 шероховатая	2	9	0,24
103	III (сходящиеся оси)	3	15°		15 шероховатая	2	10	0,27
104	III (сходящиеся оси)	3	15°		15 шероховатая	2	11	0,31
105	III (сходящиеся оси)	3	15°		15 шероховатая	2	12	0,34
106	III (сходящиеся оси)	3	20°		20 шероховатая	2	6	0,06
107	III (сходящиеся оси)	3	20°		20 шероховатая	2	7	0,07
108	III (сходящиеся оси)	3	20°		20 шероховатая	2	8	0,11
109	III (сходящиеся оси)	3	20°		20 шероховатая	2	9	0,12
110	III (сходящиеся оси)	3	20°		20 шероховатая	2	10	0,14
111	III (сходящиеся оси)	3	20°		20 шероховатая	2	11	0,16
112	III (сходящиеся оси)	3	20°		20 шероховатая	2	12	0,17

Технические характеристики приборов, используемых при проведении экспериментальной работы

1. Консольный центробежный насос модели К 150-125-250



Рисунок 1 Внешний вид насоса

Предназначен для перекачивания воды производственно-технического назначения с рН от 6 до 9 (кроме морской) и других жидкостей, сходных с водой по плотности, вязкости и химической активности в системах водоснабжения, отопления, циркуляции. Размер твердых включений до 0,2 мм с объемной концентрацией не более 0,1%.

Температура перекачиваемой жидкости зависит от типа уплотнения:

от 0 до +85°C – с одинарным сальниковым уплотнением;

от 0 до +105°C – с двойным сальниковым уплотнением;

от 0 до +140°C – с одинарным торцевым уплотнением.

Таблица 1 – технические характеристики насоса К 150-125-250

Номин. подача, м <sup>3</sup> /ч	Номин напор, м	Рабочая зона		Кавит. запас, м	Электродвигатель**			Габаритные размеры агрегата, мм*			Диаметр патрубков, мм***		Масса агрегата, кг*
		подача, м <sup>3</sup> /ч	напор, м		марка	кВт	об/мин	L	B	H	Вход	выход	
200	20	120...240	18...23	4,2	АИР 160М(S)4	18,5 (15)	1500	1305	475	565	150	125	435

## 2. Микровертушка ГМЦМ -1



Рисунок 2 Внешний вид микровертушки

Таблица 2. - Технические характеристики микровертушки ГМЦМ-1

Характеристики	Значения
Диапазон измерения скорости, м/с	от 0,03 до 6,0
Диапазон измерения с нормированной погрешностью, м/с	от 0,05 до 4,0
Относительная погрешность измерения, %, не более	$(0,02 + 0,0005(4/V-1)) \times 100\%$ , где V-величина измеренной скорости
Время осреднения, с, не менее	30
Диаметр лопастного винта (вертушки), мм	15 или 25
Габаритные размеры датчика, мм	25×35×150
Габаритные размеры блока обработки, мм	45×70×160
Габаритные размеры укладочного футляра, мм	80×120×300
Масса измерителя, кг	1
Источник питания	9 В (гальванический элемент типа «Корунд»)
Ток потребления, А	не более 0,005
Рабочие условия:	
- температура окружающего воздуха, °С	от -20 до +50
- максимально допустимая температура воды, °С	+45
- минерализация воды, мг/л, не более	1000
- содержание взвесей (песок), г/л, не более	1

## 3. Сушильный шкаф модели 2В-151



Рисунок 3 – внешний вид сушильного шкафа

Таблица 3 – технические характеристики сушильного шкафа

Характеристики		Значения
Мощность		560 Вт
Вес		25 кг
Размер		378*470*600 мм
Рабочая полость	Диаметр	360 мм
	Глубина	272 мм
Температура		от 40 до 200 градусов