



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
**«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Кафедра инженерной гидрологии

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
(бакалаврская работа)

На тему **Моделирование скоростных
характеристик потока**

Исполнитель Кожихова Жанна Дмитриевна
(фамилия, имя, отчество)

Руководитель кандидат технических наук, доцент
(ученая степень, ученое звание)

Хаустов Виталий Александрович
(фамилия, имя, отчество)

«К защите допускаю»
Заведующий кафедрой

(подпись)

кандидат технических наук, доцент
(ученая степень, ученое звание)

Гайдукова Екатерина Владимировна
(фамилия, имя, отчество)

«27» июл 2025 г.

Санкт-Петербург
2025

Содержание

| | |
|--|----|
| Введение | 3 |
| Глава 1. Физико-географическое описание бассейна р. Свирь | 6 |
| 1.1 Географическое положение и рельеф | 6 |
| 1.2 Почвенный покров и растительность | 8 |
| 1.3 Климатическая характеристика | 10 |
| 1.3.1 Температурный режим | 10 |
| 1.3.2 Режим осадков | 11 |
| 1.4 Гидрографические характеристики | 12 |
| 1.5 Регулирование ГЭС | 13 |
| 1.6 Гидрологический режим | 15 |
| 1.7 Описание участка исследования | 16 |
| 1.8 Исходные данные | 19 |
| Глава 2. Зависимость скорости от гидравлических характеристик | 36 |
| Глава 3. Способы моделирования скоростных характеристик потока | 49 |
| 3.1. Математическое моделирование гидрологических процессов | 49 |
| 3.1.1. Учёт факторов, влияющих на параметры модели | 49 |
| 3.1.2 Классификации математических моделей | 50 |
| 3.1.3 Связь уравнения Сен-Венана и геометрией русла при построении математической модели | 51 |
| 3.2. Лабораторное моделирование гидрологических процессов | 53 |
| 3.3 Отношение лабораторного и математического моделирования | 54 |
| Глава 4. Экспериментальная часть | 58 |
| Глава 5. Математическое моделирование скоростного режима потока .. | 67 |
| Заключение | 69 |
| Список литературы | 71 |
| Приложение А | 72 |
| Приложение Б | 73 |
| Приложение В | 75 |
| Приложение Г | 77 |
| Приложение Д | 78 |

Введение

Современные исследования в области гидрологии требуют глубокого понимания процессов, происходящих в речных системах, а также точного прогнозирования их характеристик. Одной из важных задач, стоящих перед гидрологами, является моделирование скоростных характеристик стока, что имеет важное значение для управления водными ресурсами, защиты от наводнений и оценки экологического состояния водоемов. В условиях глобальных изменений климата и антропогенного воздействия на природные экосистемы, необходимость в точных и надежных моделях становится особенно актуальной.

Понимание динамики потоков воды является важным аспектом для обеспечения безопасности населенных пунктов и инженерных объектов. Численные модели позволяют предсказывать не только уровень воды, но и скорости потока, что значительно повышает вероятность предупреждения аварийных ситуаций. Так, например, 1 июня 2020 года между станциями Выходной и Кола под Мурманском упал мост (Прил. А, рис. А1). Из-за интенсивного таяния снега и, ставшего еще более бурным, течения реки Колы подмыло насыпь опоры железнодорожного моста на перегоне между станциями Кола и Выходной. Обильное половодье начало размывать грунт вокруг опор моста. Основание одной из них лишилось поддержки, опора сместилась на 2 сантиметра, потянув за собой пролеты. Движение поездов на мосту приостановили, и рабочие приступили к демонтажу пролетов.

Описание ситуации Сергеем Кашиным, инженером-гидрологом, сотрудником Арктического и антарктического научно-исследовательского института: «Вокруг опоры образовалась воронка размыва... Любой объект, попавший в русло реки, сужает живое сечение потока, что ведет к локальному увеличению скорости течения. Больше скорость течения – больше энергии у частиц воды, которые увлекают за собой донные

отложения, больше воронка размыва. Судя по всему, это и случилось на реке Коле в районе станции Выходной... Но это была всего лишь авария, а вот катастрофу организовали те, кто попытался спасти мост, - уверен Сергей Кашин. – Из лучших побуждений, чтобы поскорее добраться до поврежденной опоры и приступить к ее укреплению, была начата отсыпка перемычки от берега до опоры. В любой другой ситуации это было бы верным решением, но только не сейчас. Засыпав наглухо приличный кусок русла реки – по сути, соорудив дамбу – в тот момент, когда по нему шел максимальный расход, ремонтники направили всю мощь потока в оставшийся просвет (Прил. А, рис. А2). Результат был мгновенный: вся ярость весеннего потока перенаправилась на вторую опору, подмыв ее до самого основания и лишив стабильности. 1 июня в 14:30 опора скоропостижно рухнула, увлекая за собой два пролета и превращая ЧП районного масштаба в катастрофу почти федерального уровня». [9]

Актуальность данной работы обусловлена необходимостью изучения взаимосвязи между сужением русла реки и характеристиками потока, что имеет важное значение для управления водными ресурсами и предотвращения наводнений. Сужение русла может привести к изменению скорости и направления потока, что, в свою очередь, может вызвать эрозию берегов, изменение природных экосистем и угрожать безопасности населенных пунктов, расположенных вблизи водных объектов.

Гипотеза: мы предполагаем, что площадь поперечного сечения русла оказывает значительное влияние на скоростные характеристики потока.

В данной работе была поставлена **цель:** дать математическое описание гидрологического процесса при различных условиях (изменении морфометрических характеристик).

Чтобы достичь цель были определены следующие **задачи:**

- ознакомление со способами моделирования гидрологических процессов;

- проведение лабораторного эксперимента с измерением скорости потока при условии изменяющегося русла;
- создание и апробация математической модели на основе полученных данных эксперимента;
- применение навыков программирования и численной реализации математической модели;
- сбор данных по р. Свирь для дальнейшего анализа изменения скоростей при сужении русла.

В качестве **объектов** исследования выступают: натурный эксперимент и гидротворы р. Свирь.

Предметом исследования является скоростной режим потока.

Глава 1. Физико-географическое описание бассейна р. Свири

1.1 Географическое положение и рельеф

Река Свири — крупная пресноводная река, протекающая на северо-западе Европейской части России по территории Ленинградской области, и связывающая Онежское озеро и Ладожское озеро (Рис. 1.1), являясь важнейшим звеном Волго-Балтийского водного пути и, соответственно, Единой глубоководной системы Европейской части России. Исток Свири находится в Свирской губе Онежского озера, а устье — в Ладожском озере.



Рис. 1.1 Водосбор р. Свири

По своему геологическому строению весь бассейн принадлежит к району со следами четвертичного оледенения. До появления Свири сток из Онежского озера в Ладогу происходил южнее — через реки Ошта — Тукша — Оять. Современная река возникла около 9,5 тысяч лет назад в результате трансгрессии южной части Онежского озера, вызванной изостатическим поднятием северной

части озёрной котловины. По мере врезания русла реки уровень Онежского озера упал с отметки 75 метров над уровнем моря до современных 33. [8]

Река Свирь протекает преимущественно в низинах, в которых в глубоком прошлом располагались ледниковые водоемы. Низовье этого водного объекта находится на Приладожской низменности и ниже по течению от впадения в неё рек Оять и Паша образует дельту со множеством рукавов и проток, одна из которых соединяется с Загубской Губой. Всего на реке около тридцати островов. Самый крупный остров — Иванькоостров.

Приладожская низменность представляет собой обширную равнинную территорию, примыкающую к южному и восточному побережьям Ладожского озера. Ее геологическое строение формировалось на протяжении длительного времени под влиянием тектонических процессов, многократных оледенений и послеледниковых трансгрессий. В структурном отношении низменность расположена на северо-западной окраине Восточно-Европейской платформы, где кристаллический фундамент Балтийского щита постепенно погружается под толщу осадочных пород.

В основании низменности залегают древние архейские и протерозойские породы, слагающие Балтийский щит. Это преимущественно граниты, гнейсы, амфиболиты и кварциты, которые на юге и востоке перекрываются осадочным чехлом мощностью от 200 до 500 метров. Осадочные отложения представлены породами разного возраста, начиная с кембрийских песчаников и глин, которые встречаются в восточной части низменности. Выше залегают ордовикские известняки и доломиты, местами образующие карстовые формы рельефа. Девонские отложения, представленные песчано-глинистыми породами, распространены фрагментарно и не играют значительной роли в строении низменности.

Наиболее существенное влияние на формирование современного рельефа оказали четвертичные отложения, связанные с деятельностью плейстоценовых оледенений, особенно последнего — Валдайского. Ледниковые процессы оставили после себя мощные моренные отложения, состоящие из валунных

суглинков и супесей, которые образуют характерный холмисто-моренный рельеф. В понижениях между моренными грядами широко распространены флювиогляциальные пески и гравий, сформировавшие занdroвые равнины и озовые гряды. В приледниковых озерах накапливались ленточные глины, отличающиеся четкой слоистостью.

После отступления ледника начался этап голоценовых трансгрессий, в ходе которых Ладожское озеро неоднократно меняло свои границы. В этот период сформировались озерно-морские отложения, представленные тонкозернистыми песками и глинами. Современные геологические процессы в пределах низменности включают абразионный размыв берегов Ладожского озера, активное заболачивание пониженных участков с накоплением торфяников, а также эоловую переработку песчаных отложений на побережье.

Из полезных ископаемых на территории Приладожской низменности наиболее значимы строительные пески и гравий флювиогляциального происхождения, используемые в дорожном строительстве и производстве стройматериалов. Также важное хозяйственное значение имеют месторождения торфа, образовавшегося в заболоченных котловинах, и глины, накопленные в озерно-ледниковых водоемах.

По пути к Ладоге река вбирает в себя воды притоков. Наиболее крупные из них Оять, Паша, Ивина, Важина. Русло ее извилисто, ассиметрично: ее левые притоки существенно преобладают над правыми. Берега реки практически везде поросли лесом и кустарниками, иногда встречается и луговая растительность.

1.2 Почвенный покров и растительность

Пересеченность рельефа проявляется и в пестроте почвенного покрова - от дерново-подзолистых и подзолистых суглинистых или супесчаных почв вершин и склонов моренных холмов до торфяно-болотных суглинистых и торфяно-болотных почв низин.

Растительность района проявляет черты, переходные между средней и южной тайгой. Наиболее благоприятные местообитания, характеризующиеся относительно богатыми дерново-подзолистыми почвами (вершины и склоны холмов), заняты ельниками-кисличниками (иногда со значительным участием осины), менее благоприятные уроцища - ельниками зеленомошной груши. Высокие береговые склоны реки нередко покрыты осинниками. В местах выхода грунтовых вод отмечены небольшие по площади участки черноольховых или елово-черноольховых лесов. Сосновые леса в основном приурочены к окраинам болот и представлены заболоченными типами - багульниковыми и сфагновыми. На небольших болотных островах обычны сосняки-вороничники. Лишайниковые сосняки и сосняки-брусничники представлены только небольшими фрагментами в местах распространения песчаных и супесчаных почв на северо-западе района (на границе с Олонецким районом Карелии) и в окрестностях г. Подпорожье. Естественные луга не занимают значительных площадей; очень небольшие участки пойменных лугов встречаются только в устьях и вдоль немногочисленных притоков Свири – рек Важинки, Шакшозерки и др. (Берега же самой Свири даже до подтопления Подпорожской ГЭС, не отличались обильно развитой пойменно-луговой растительностью). Большие площади Свирско-Оятского ландшафта заболочены: верховые и переходные болота располагаются на слабодренированных равнинных участках, в понижениях рельефа, а также на месте заторфованных озерных котловин.

Сами многочисленные озера, находящиеся на различных стадиях зарастания, отличает прекрасно развитая прибрежно-водная и водная растительность. [2]

1.3 Климатическая характеристика

1.3.1 Температурный режим

Климат в бассейне реки умеренно-континентальный, с заметным влиянием Балтийского моря и крупных озер, которые смягчают температурные колебания и повышают влажность.

Зимы здесь умеренно холодные, со средними температурами от -8 до -12°C , но возможны как сильные морозы до $-25^{\circ}\text{C}...-30^{\circ}\text{C}$, так и оттепели с повышением до $0...+2^{\circ}\text{C}$. Самыми холодными месяцами в году являются январь и февраль, самым теплым - июль.

Весна наступает в апреле, когда среднесуточная температура переходит через 0°C , но заморозки возможны до конца мая.

Лето короткое, прохладное, со средней температурой $+15...+18^{\circ}\text{C}$, хотя иногда воздух прогревается до $+25...+30^{\circ}\text{C}$.

Осень влажная, с ранними заморозками (уже в сентябре – октябре).

Переход через 0°C в сторону отрицательных значений происходит уже в ноябре.

Обычно в конце октября – начале ноября появляется снежный покров, но он, как правило, держится недолго. В это время возможны неоднократные кратковременные образования снежного покрова. Приблизительно с половины декабря средняя суточная температура воздуха переходит через -5°C . Этот период длится до середины марта, т.е. в среднем 3 месяца. Также наблюдается период средних суточных температур ниже -10°C , который длится один-полтора месяца.

В связи с большой изменчивостью циркуляционных процессов погодные условия отдельных лет в значительной степени отличаются от общих условий. Так, аномально холодными по температуре воздуха были зимы 1939-40, 1940-41 гг. и особенно январь 1942 г., среднемесячная температура которого была на 11°

ниже средней многолетней. Не редко случаются и очень мягкие зимы 1929-30, 1948-49, 1951-52 гг. и др.), когда средняя температура за месяц на 7° превышает норму.

1.3.2 Режим осадков

Территория относится к зоне с избыточным увлажнением. Это объясняется сравнительно небольшим приходом тепла и хорошо развитой здесь циклонической деятельностью, которая активно проявляется во все сезоны года.

На распределение осадков большое влияние оказывают особенности местности и подстилающая поверхность, ведущие к нарушению плавного характера изменения осадков. Даже небольшие возвышения обуславливают перераспределения осадков: увеличение их на наветренных возвышенных участках и уменьшение на подветренных склонах и в понижениях за возвышенностями. Заметно уменьшаются осадки вблизи Онежского и Ладожского озёр.

Осадки выпадают равномерно в течение года, их годовая сумма составляет 600–700 мм. Наибольшее количество осадков выпадает в западной части бассейна из-за влияния атлантических циклонов и приходится на лето и осень, когда часты затяжные дожди и ливни.

Осадки холодного периода (ноябрь-март) составляют примерно 40-45 % годовых. За холодный период выпадает 150-200 мм осадков.

Максимум количества осадков приходится на июль-август и лишь иногда на сентябрь. В эти месяцы выпадает до 80-90 мм осадков.

Зимой осадки выпадают в основном в виде снега, который образует устойчивый покров с ноября по апрель толщиной 30–50 см.

1.4 Гидрографические характеристики

Общая площадь водосбора р. Свири составляет $81\ 130\ \text{км}^2$, из них площадь бассейна собственно р. Свири — $21\ 780\ \text{км}^2$, или 26 % от общей площади водосбора.

Имеет длину 224 км, ширина реки Свирь имеет большой диапазон размеров: в районе истока в Онежском озере — 1,5 км, в месте впадения в Ладожское озеро — 900 метров, самым широким местом Свири является Ивинский разлив — до 10 км, но в среднем ширина Свири — от 200 до 400 метров.

Скорость течения изменяется от 0,5 до 10,6 км/ч. Среднегодовой расход воды в устье — $790\ \text{м}^3/\text{с}$. Высота устья — 4,3 м над уровнем моря.

Глубина реки Свирь по судовому ходу составляет от 4,5 метра до 20,3 метров на участке от Онежского озера в Вознесенье до Верхне-Свирской ГЭС в Подпорожье. На участке между Верхне-Свирской и Нижне-Свирской ГЭС глубина Свири составляет по судовому ходу от 4,7 до 16 метров. А наиболее меньшие глубины река имеет на участке от Лодейного поля до Ладожского озера — от 4,2 до 7 метров.

Озерность бассейна исключительно велика за счет Онежского озера, водная поверхность которого составляет $9700\ \text{км}^2$. Процент озёрности бассейна Свири оценивается в 12—15 %. Заболоченность бассейна также значительна. Наиболее крупные болотные массивы расположены в районе устья р. Свири, а также в устьевых участках ее главных притоков — рек Паши и Ояти.

Грунты в бассейне представлены преимущественно суглинками и супесями с наличием валунов.

Лесистость бассейна составляет в среднем около 30 - 40 %; особенно много лесов на северном побережье Онежского озера и в бассейне р. Паши, где коэффициент лесистости увеличивается до 70 %.

Общее падение реки равно 27,5 м. Около 12 м падения в настоящее время используется Нижне-Свирской ГЭС, большая его часть (14 м) сосредоточена на Верхне-Свирской ГЭС, причем уровень Онежского озера подpert приблизительно на 1 м. [7]

1.5 Регулирование ГЭС

До 1930-х годов Свирь была быстрой и неглубокой рекой с порогами. В первые годы советской власти было принято решение построить здесь Свирский каскад ГЭС, который, помимо столь необходимой по плану ГОЭЛРО электроэнергии, позволил затопить пороги водохранилищами и создать глубоководный путь на всём протяжении реки.

В результате на реке Свири были построены две гидроэлектростанции: Верхне-Свирский гидроузел и Нижне-Свирский гидроузел (Рис. 1.2). Они делят водный объект на три участка: Верхняя Свирь (ее длина составляет 95 км), Средняя Свирь (45 км) и Нижняя Свирь (80 км).

Плотина Верхне-Свирской ГЭС образовала так называемый Ивинский разлив — самое широкое место Свири, а также подняла уровень воды, сделав участок до Онежского озера наиболее глубоким.

Верхне-Свирская ГЭС — введена в эксплуатацию в 1952 г. В состав Верхнесвирского гидроузла входит земляная и водосливная плотина, здание ГЭС и одноступенчатый однониточный шлюз с распределительной системой питания через продольные галереи в днище шлюза. Полезные габариты 17,8x270 м, напор около 14 м. Чтобы ослабить воздействие шлюза на режим течений и уровней в верхнем и нижнем подходных каналах для наполнения камеры вода забирается сбоку из водохранилища, а сбрасывается в реку. Эта конструкция создаёт условия для ускоренного наполнения и опорожнения камеры. На верхней голове со стенкой падения имеются плоские подъёмно-опускные ворота, а на нижней двустворчатые. [3]

Верхнесвирское водохранилище, включающее в себя часть вод Онежского озера, позволяет осуществлять многолетнее регулирование стока. Среднемноголетний сток $19,3 \text{ км}^3$, сток весеннего половодья $5,6 \text{ км}^3$. За навигацию сработка водохранилища может достигать 2 м ниже НПУ, в зимнее время до 3,5 м. Длина водохранилища 95 км, ширина на приплотинном участке от 200 до 1000 м. Глубины по оси судового хода от 17 до 8 м и лишь в нескольких местах падают до 5 м.

Нижне-Свирская ГЭС имени академика Г. О. Графтио — гидроэлектростанция на реке Свирь в Лодейнопольском районе Ленинградской области, у посёлка Свирьстрой. Входит в каскад Свирских ГЭС, являясь его второй, нижней ступенью. Была построена по плану ГОЭЛРО в 1927—1936 годах, является одной из старейших гидроэлектростанций России. В 1933—1941 годах была второй по мощности гидроэлектростанцией СССР. Строительство Нижне-Свирской ГЭС на мягких, подверженных неравномерной осадке грунтах не имело аналогов в мировой практике гидротехнического строительства того времени. В ходе Великой Отечественной войны станция оказалась на оккупированной территории и получила серьёзные повреждения, но была восстановлена.



Рис. 1.2 Местоположение Нижне-Свирской и Верхне-Свирской ГЭС на р. Свирь

1.6 Гидрологический режим

Так как почти 80 % водосбора Свири приходится на Онежское озеро и сток с части бассейна самой реки зарегулирован гидроузлами, её водный режим отличается равномерностью в течение года. Но, по сравнению, например, с Невой, весенние паводки в нижнем течении более выражены, в том числе по причине возникающих ледяных заторов.

Водный режим реки в течение всего года равномерный. Около 80 процентов водосбора приходится на Онежское озеро.

Лед на Свири встает в зависимости от метеоусловий на период 3-6 месяцев. Этапы его становления и вскрытия на разных участках вследствие индивидуальных особенностей протекают разнообразно. Первый лед образуется в ноябре-декабре, а сходит в апреле-мае. В теплые годы, а также в местах с сильным течением, сплошной покров может не образовываться.

По своему водному режиму Свирь является типичной рекой с озерным питанием. До создания каскада ГЭС годовой ход уровней реки отличается большой плавностью. Некоторые изменения уровня наблюдались лишь в весеннее время, когда на плавный ход стока из Онежского озера накладывались паводки притоков р. Свири.

В настоящее время почти весь участок от истока реки до Нижне-Свирской ГЭС представляет собой зону подпора последовательно от плотин Верхне- и Нижне-Свирской ГЭС.

На участке от Нижне-Свирской ГЭС до устья река находится в подпоре от Ладожского озера. Режим уровней на этом участке зависит от отметки уровня Ладожского озера и величины расхода, пропускаемого через Нижне-Свирскую ГЭС. Расходы воды, поступающие из Онежского озера, до создания Верхне-Свирской ГЭС колебались от 1449 до 121 м³/сек. (за период с 1881 по 1951 г.), а средний расход составлял 562 м³/сек.

Замерзание р. Свири в бытовых условиях происходит неравномерно по ее длине. На низовом участке реки во второй половине ноября появляется сало (на устьевом участке оно наблюдается несколько раньше), затем образовываются забереги и возникает ледоход продолжительностью от 3 до 14 дней. Первыми покрываются льдом плесовые участки (в среднем — в первой половине декабря), и они лимитируют сроки навигации для всей реки. Участки же с быстрым течением еще долго остаются открытыми, а некоторые из них не замерзают в течение всей зимы. Толщина льда к концу зимы достигает 0,5—0,8 м. Вскрытие реки происходит в среднем 15—25/IV и к концу апреля нижний и средний участки реки очищаются ото льда. Количество взвешенных наносов в воде р. Свири незначительно; вода отличается невысокой степенью минерализации.

1.7 Описание участка исследования

Исследование проводилось на основе эксперимента, поставленного в 1961 году Государственным Гидрологическим Институтом.

Для проведения эксперимента был выбран участок р. Свири длиной около 60 км, ограниченный в верховом створе плотиной Нижне-Свирской ГЭС, а в низовом - впадением р. Шоктусы. В пределах выбранного участка имеется несколько притоков. Приращение площади водосбора р. Свири на экспериментальном участке составляет около 1130 км^2 .

Приточность на экспериментальном участке можно приблизенно оценить, приняв модули стока для него по аналогии с притоком р. Свири - р. Важинкой (площадь водосбора 2040 км^2), где они соответственно для февраля и октября составляют 4 и 14 л/сек. км^2 . Это дает приращение расхода за счет приточности к концу исследуемого участка для зимней серии экспериментов $4,5 \text{ м}^3/\text{сек}$, а для условий открытого русла - около $16 \text{ м}^3/\text{сек}$. При попусках, диапазон изменения которых составлял $400—1600 \text{ м}^3/\text{сек}$, максимальная ошибка за счет неучета

приточности будет составлять около 4%. При такой небольшой приточности в абсолютной и относительной оценке все материалы по распространению волн попусков можно рассматривать как материалы, относящиеся к бесприточному участку. Лишь в периодыочных провалов, во время которых расход через ГЭС составлял около 14-15 м³/сек. и постепенно увеличивался за счет опорожнения бьефа до 200 м³/сек. к концу участка, собственная приточность на участке может иметь некоторое ощутимое значение.

Долина реки на участке широкая, слабовыраженная; ее низкие и пологие склоны имеют несколько террас.

Пойма двухсторонняя; ширина ее в начале участка составляет 350-500 м, местами пойма отсутствует, у г. Лодейное Поле она сужается до 200 м, затем постепенно расширяется и от пункта, расположенного в 8 км ниже г. Лодейное Поле, преобладающая ширина ее составляет 500 - 800 м, в районе впадения р. Заостровье расширяется до 2 км, затем опять сужается и не превышает 300 м, а на участке Лахтинский залив — устье р. Шоткусы почти отсутствует. Поверхность поймы неровная, сильно изрезана староречьями и почти на всем протяжении заболочена, покрыта луговой влаголюбивой растительностью и кустами ольхи. Грунты преимущественно супесчаные, заторфованные.

Русло реки слабо извилистое, почти повсеместно однорукавное. Лишь на 33-м км от ГЭС р. Свирь разбивается на два протока, образуя остров Конев длиной 2,3 км и шириной 0,5 км. Русловые деформации р. Свири в пределах экспериментального участка не отличаются большой интенсивностью. После постройки Нижне-Свирской ГЭС объем ежегодных землечерпательных работ несколько увеличился. Это объясняется резкими колебаниями расходов воды при суточном регулировании, создающими в русле неблагоприятный скоростной режим. Наиболее значительные работы по расчистке фарватера приходится вести в районе г. Лодейное Поле и с. Ручьи (15 и 29-й км от ГЭС). Средний уклон реки на рассматриваемом участке составляет 0,016 ‰.

Преобладающая ширина русла 400 м. Средние скорости течения при существующем режиме не превышают 1,2 м/сек. Дно ровное, преимущественно песчаное, местами илистое, изредка встречаются отдельные валуны.

Берега преимущественно пологие, в районе г. Лодейное Поле и между Лахтинским заливом и устьем р. Шоткусы - крутые. Преобладающая высота их 3-5 м, наибольшая достигает 13 м (в 1 км выше г. Лодейное Поле). На всем протяжении берега покрыты луговой растительностью с кустами ольхи, местами смешанным лесом, на участке Лахтинский залив — устье р. Шоткусы по бровке растет сосна и имеются песчаные обнажения.

Эксперимент при открытом русле (летние) был проведен в течение 8 суток, в период с 21 по 28/X 1961 г. Непрерывные скоростные измерения производились на 4 гидростворах, наблюдения над уровнем воды велись на 19 постах, а с добавлением створа ГЭС и водпостов при гидростворах — в 24 пунктах.

Схема расположения, используемых для исследования гидростворов показана на рис.1.3.

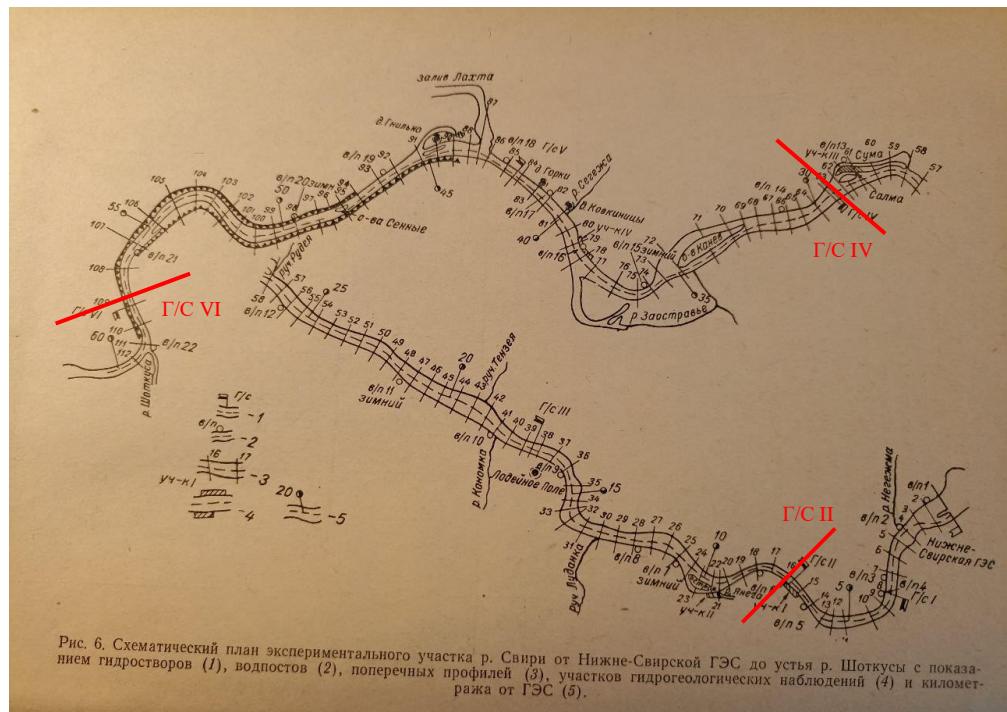


Рис. 1.3 Расположение гидростворов р. Свирь на участке исследования

1.8 Исходные данные

В исследовании скоростного и уровенного режимов для данной бакалаврской работы были использованы данные расходов, скоростей, уклонов и уровней воды с 21 по 25/Х на II, IV и VI створах, которые представлены в таблицах 1.1-1.3. По эти данным построены хронологические графики: $Q = f(t)$, $V = f(t)$, $H = f(t)$, $I = f(t)$ (Прил. Б, рис. Б1-Б4).

| Дата | Время | Уровень, м усл. | Расход, м ³ /с | Скорость средняя, м/с | Уклон, % |
|--------|-------|--------------------|------------------------------|-----------------------------|----------|
| 21.окт | 18:00 | 17,33 | 1290 | 0,68 | 0,05 |
| | 18:15 | 17,33 | 1290 | 0,69 | 0,05 |
| | 18:30 | 17,33 | 1280 | 0,7 | 0,05 |
| | 18:45 | 17,33 | 1280 | 0,7 | 0,05 |
| | 19:00 | 17,34 | 1270 | 0,71 | 0,05 |
| | 19:15 | 17,34 | 1260 | 0,71 | 0,05 |
| | 19:30 | 17,34 | 1240 | 0,7 | 0,05 |
| | 19:45 | 17,33 | 1200 | 0,68 | 0,05 |
| | 20:00 | 17,32 | 1140 | 0,65 | 0,05 |
| | 20:15 | 17,33 | 1080 | 0,62 | 0,04 |
| | 20:30 | 17,15 | 932 | 0,56 | 0,04 |
| | 20:45 | 17,08 | 820 | 0,5 | 0,03 |
| | 21:00 | 16,95 | 647 | 0,4 | 0,02 |
| | 21:15 | 16,81 | 476 | 0,3 | 0,01 |
| | 21:30 | 16,65 | 377 | 0,25 | 0,01 |
| | 21:45 | 16,58 | 317 | 0,21 | 0,00 |
| | 22:00 | 16,46 | 276 | 0,19 | 0,00 |
| | 22:30 | 16,3 | 207 | 0,14 | 0,00 |
| | 23:00 | 16,16 | 167 | 0,12 | 0,00 |
| | 23:30 | 16,05 | 153 | 0,11 | 0,00 |
| | 0:00 | 15,83 | 140 | 0,11 | 0,00 |
| 22.окт | 1:00 | 15,74 | 129 | 0,1 | 0,00 |
| | 2:00 | 15,57 | 121 | 0,1 | 0,00 |
| | 3:00 | 15,42 | 104 | 0,09 | 0,00 |

| | | | | | |
|--|-------|-------|-----|------|------|
| | 4:00 | 15,29 | 101 | 0,09 | 0,00 |
| | 5:00 | 15,16 | 94 | 0,09 | 0,00 |
| | 6:00 | 15,05 | 88 | 0,08 | 0,00 |
| | 7:00 | 14,94 | 98 | 0,09 | 0,00 |
| | 7:15 | 14,92 | 131 | 0,13 | 0,00 |
| | 7:30 | 14,93 | 169 | 0,16 | 0,00 |
| | 7:45 | 14,98 | 202 | 0,19 | 0,00 |
| | 8:00 | 15 | 256 | 0,25 | 0,00 |
| | 8:15 | 15,04 | 298 | 0,28 | 0,00 |
| | 8:30 | 15,01 | 256 | 0,24 | 0,04 |
| | 8:45 | 14,95 | 217 | 0,21 | 0,04 |
| | 9:00 | 14,93 | 168 | 0,16 | 0,04 |
| | 9:15 | 14,9 | 157 | 0,19 | 0,04 |
| | 9:30 | 14,88 | 156 | 0,25 | 0,04 |
| | 9:45 | 14,86 | 154 | 0,28 | 0,04 |
| | 10:00 | 14,84 | 154 | 0,24 | 0,04 |
| | 10:15 | 14,83 | 153 | 0,21 | 0,04 |
| | 10:30 | 14,81 | 150 | 0,16 | 0,04 |
| | 10:45 | 14,8 | 152 | 0,15 | 0,04 |
| | 11:00 | 14,78 | 152 | 0,15 | 0,04 |
| | 11:15 | 14,78 | 148 | 0,15 | 0,04 |
| | 11:30 | 14,77 | 150 | 0,15 | 0,04 |
| | 11:45 | 14,76 | 146 | 0,15 | 0,04 |
| | 12:00 | 14,75 | 146 | 0,15 | 0,04 |
| | 12:15 | 14,74 | 146 | 0,15 | 0,04 |
| | 12:30 | 14,72 | 145 | 0,15 | 0,04 |
| | 12:45 | 14,71 | 146 | 0,15 | 0,04 |
| | 13:00 | 14,7 | 148 | 0,15 | 0,04 |
| | 13:15 | 14,69 | 145 | 0,15 | 0,04 |
| | 13:30 | 14,69 | 142 | 0,15 | 0,04 |
| | 13:45 | 14,68 | 142 | 0,15 | 0,04 |
| | 14:00 | 14,68 | 140 | 0,14 | 0,04 |
| | 14:30 | 14,67 | 138 | 0,14 | 0,03 |
| | 15:00 | 14,66 | 138 | 0,14 | 0,03 |
| | 15:30 | 14,65 | 130 | 0,14 | 0,03 |
| | 16:00 | 14,64 | 128 | 0,13 | 0,02 |

| | | | | | |
|--------|-------|-------|-----|------|------|
| 23.OKT | 16:30 | 14,62 | 129 | 0,13 | 0,02 |
| | 17:00 | 14,61 | 129 | 0,13 | 0,02 |
| | 17:30 | 14,58 | 99 | 0,12 | 0,00 |
| | 18:00 | 14,58 | 88 | 0,1 | 0,00 |
| | 19:00 | 14,51 | 70 | 0,07 | 0,00 |
| | 20:00 | 14,49 | 55 | 0,05 | 0,00 |
| | 21:00 | 14,49 | 45 | 0,04 | 0,00 |
| | 1:00 | 14,47 | 30 | 0,04 | 0,00 |
| | 2:00 | 14,47 | 28 | 0,03 | 0,00 |
| | 3:00 | 14,47 | 28 | 0,03 | 0,00 |
| | 4:00 | 14,48 | 28 | 0,03 | 0,00 |
| | 5:00 | 14,48 | 28 | 0,03 | 0,00 |
| | 6:00 | 14,48 | 28 | 0,03 | 0,00 |
| | 7:00 | 14,48 | 28 | 0,03 | 0,00 |
| | 8:00 | 14,48 | 28 | 0,03 | 0,00 |
| | 8:15 | 14,48 | 138 | 0,15 | 0,00 |
| | 8:30 | 14,5 | 237 | 0,25 | 0,03 |
| | 8:45 | 14,66 | 322 | 0,38 | 0,09 |
| | 9:00 | 14,9 | 521 | 0,51 | 0,11 |
| | 9:15 | 15,12 | 670 | 0,62 | 0,12 |
| | 9:30 | 15,37 | 829 | 0,72 | 0,13 |
| | 9:45 | 15,5 | 928 | 0,78 | 0,11 |
| | 10:00 | 15,66 | 985 | 0,8 | 0,09 |
| | 10:15 | 15,78 | 960 | 0,75 | 0,08 |
| | 10:30 | 15,8 | 895 | 0,7 | 0,07 |
| | 10:45 | 15,79 | 820 | 0,64 | 0,06 |
| | 11:00 | 15,78 | 747 | 0,59 | 0,05 |
| | 11:15 | 15,74 | 626 | 0,5 | 0,04 |
| | 11:30 | 15,66 | 515 | 0,41 | 0,04 |
| | 11:45 | 15,55 | 403 | 0,33 | 0,03 |
| | 12:00 | 15,45 | 354 | 0,3 | 0,02 |
| | 12:15 | 15,4 | 327 | 0,28 | 0,02 |
| | 12:30 | 15,35 | 312 | 0,27 | 0,02 |
| | 12:45 | 15,3 | 301 | 0,27 | 0,02 |
| | 13:00 | 15,3 | 307 | 0,27 | 0,02 |
| | 13:15 | 15,33 | 402 | 0,35 | 0,04 |

| | | | | | |
|--------|-------|-------|------|------|------|
| | 13:30 | 15,36 | 440 | 0,38 | 0,04 |
| | 13:45 | 15,38 | 470 | 0,4 | 0,04 |
| | 14:00 | 15,42 | 495 | 0,42 | 0,04 |
| | 14:15 | 15,45 | 524 | 0,44 | 0,05 |
| | 14:30 | 15,49 | 545 | 0,46 | 0,05 |
| | 14:45 | 15,52 | 577 | 0,48 | 0,06 |
| | 15:00 | 15,56 | 638 | 0,52 | 0,07 |
| | 15:15 | 15,6 | 660 | 0,53 | 0,08 |
| | 15:30 | 15,67 | 684 | 0,55 | 0,09 |
| | 15:45 | 15,77 | 732 | 0,58 | 0,11 |
| | 16:00 | 15,82 | 766 | 0,6 | 0,11 |
| | 16:15 | 15,88 | 793 | 0,61 | 0,10 |
| | 16:30 | 15,94 | 845 | 0,64 | 0,10 |
| | 17:00 | 16,06 | 908 | 0,67 | 0,10 |
| | 17:30 | 16,18 | 977 | 0,7 | 0,09 |
| | 18:00 | 16,25 | 1010 | 0,72 | 0,09 |
| | 18:30 | 16,32 | 1030 | 0,72 | 0,08 |
| | 19:00 | 16,4 | 1040 | 0,72 | 0,08 |
| | 19:30 | 16,44 | 1040 | 0,71 | 0,08 |
| | 20:00 | 16,5 | 1040 | 0,7 | 0,07 |
| | 20:30 | 16,55 | 1050 | 0,7 | 0,07 |
| | 21:00 | 16,58 | 1040 | 0,69 | 0,07 |
| | 21:30 | 16,61 | 1040 | 0,68 | 0,06 |
| | 22:00 | 16,63 | 1000 | 0,66 | 0,06 |
| | 22:15 | 16,59 | 891 | 0,59 | 0,06 |
| | 22:30 | 16,46 | 739 | 0,5 | 0,05 |
| | 22:45 | 16,38 | 638 | 0,44 | 0,04 |
| | 23:00 | 16,29 | 563 | 0,42 | 0,03 |
| | 23:15 | 16,16 | 452 | 0,33 | 0,02 |
| | 23:30 | 16,04 | 368 | 0,27 | 0,02 |
| | 23:45 | 15,96 | 303 | 0,25 | 0,02 |
| | 0:00 | 15,88 | 277 | 0,21 | 0,02 |
| 24.OKT | 0:30 | 15,78 | 242 | 0,19 | 0,01 |
| | 1:00 | 15,68 | 220 | 0,18 | 0,01 |
| | 1:30 | 15,58 | 194 | 0,16 | 0,01 |
| | 2:00 | 15,5 | 173 | 0,14 | 0,01 |

| | | | | | |
|--|-------|-------|-----|------|------|
| | 3:00 | 15,31 | 123 | 0,11 | 0,00 |
| | 4:00 | 15,16 | 100 | 0,09 | 0,00 |
| | 5:00 | 15,04 | 89 | 0,08 | 0,00 |
| | 6:00 | 14,94 | 81 | 0,08 | 0,00 |
| | 7:00 | 14,83 | 77 | 0,08 | 0,01 |
| | 7:15 | 14,82 | 100 | 0,1 | 0,01 |
| | 7:30 | 14,81 | 151 | 0,15 | 0,02 |
| | 7:45 | 14,92 | 294 | 0,29 | 0,04 |
| | 8:00 | 15,02 | 424 | 0,4 | 0,04 |
| | 8:15 | 15,13 | 533 | 0,58 | 0,05 |
| | 8:30 | 15,24 | 642 | 0,57 | 0,06 |
| | 8:45 | 15,39 | 747 | 0,64 | 0,08 |
| | 9:00 | 15,5 | 826 | 0,69 | 0,10 |
| | 9:15 | 15,62 | 869 | 0,7 | 0,11 |
| | 9:30 | 15,74 | 912 | 0,72 | 0,10 |
| | 9:45 | 15,84 | 939 | 0,72 | 0,10 |
| | 10:00 | 15,94 | 966 | 0,73 | 0,09 |
| | 10:15 | 15,99 | 970 | 0,72 | 0,10 |
| | 10:30 | 16,04 | 974 | 0,72 | 0,08 |
| | 10:45 | 16,03 | 907 | 0,67 | 0,07 |
| | 11:00 | 16,02 | 848 | 0,63 | 0,07 |
| | 11:15 | 16 | 805 | 0,6 | 0,06 |
| | 11:30 | 15,98 | 715 | 0,54 | 0,06 |
| | 11:45 | 15,96 | 710 | 0,54 | 0,06 |
| | 12:00 | 15,92 | 652 | 0,5 | 0,04 |
| | 12:30 | 15,83 | 587 | 0,45 | 0,04 |
| | 13:00 | 15,8 | 570 | 0,44 | 0,03 |
| | 13:30 | 15,77 | 553 | 0,44 | 0,04 |
| | 14:00 | 15,74 | 548 | 0,43 | 0,04 |
| | 14:30 | 15,73 | 546 | 0,43 | 0,04 |
| | 15:00 | 15,7 | 543 | 0,43 | 0,05 |
| | 15:30 | 15,72 | 559 | 0,44 | 0,06 |
| | 16:00 | 15,72 | 599 | 0,48 | 0,06 |
| | 16:15 | 15,78 | 657 | 0,52 | 0,07 |
| | 16:30 | 15,84 | 734 | 0,57 | 0,08 |
| | 16:45 | 15,95 | 808 | 0,61 | 0,09 |

| | | | | | |
|--------|-------|-------|------|------|------|
| | 17:00 | 16,02 | 907 | 0,68 | 0,10 |
| | 17:15 | 16,17 | 1010 | 0,72 | 0,10 |
| | 17:30 | 16,24 | 1050 | 0,74 | 0,10 |
| | 17:45 | 16,3 | 1070 | 0,75 | 0,09 |
| | 18:00 | 16,36 | 1090 | 0,76 | 0,09 |
| | 18:30 | 16,44 | 1100 | 0,75 | 0,08 |
| | 19:00 | 16,51 | 1110 | 0,74 | 0,08 |
| | 19:30 | 16,58 | 1110 | 0,75 | 0,08 |
| | 20:00 | 16,61 | 1100 | 0,73 | 0,07 |
| | 20:15 | 16,63 | 1100 | 0,72 | 0,07 |
| | 20:30 | 16,65 | 1050 | 0,69 | 0,07 |
| | 20:45 | 16,58 | 910 | 0,6 | 0,07 |
| | 21:00 | 16,49 | 818 | 0,55 | 0,06 |
| | 21:15 | 16,42 | 768 | 0,52 | 0,06 |
| | 21:30 | 16,36 | 736 | 0,5 | 0,06 |
| | 21:45 | 16,28 | 686 | 0,49 | 0,04 |
| | 22:00 | 16,23 | 640 | 0,46 | 0,02 |
| | 22:15 | 16,17 | 572 | 0,41 | 0,01 |
| | 22:30 | 16,06 | 396 | 0,29 | 0,01 |
| | 22:45 | 15,94 | 265 | 0,2 | 0,01 |
| | 23:00 | 15,85 | 223 | 0,17 | 0,01 |
| | 23:30 | 15,69 | 192 | 0,15 | 0,00 |
| | 0:00 | 15,57 | 172 | 0,14 | 0,00 |
| 25.OKT | 0:30 | 15,47 | 160 | 0,13 | 0,00 |
| | 1:00 | 15,38 | 149 | 0,12 | 0,00 |
| | 2:00 | 15,2 | 115 | 0,1 | 0,00 |
| | 3:00 | 15,08 | 107 | 0,1 | 0,00 |
| | 4:00 | 14,96 | 88 | 0,09 | 0,00 |
| | 5:00 | 14,86 | 74 | 0,07 | 0,00 |
| | 6:00 | 14,75 | 70 | 0,07 | 0,00 |
| | 7:00 | 14,66 | 83 | 0,08 | 0,00 |
| | 7:15 | 14,66 | 121 | 0,12 | 0,01 |
| | 7:30 | 14,66 | 159 | 0,16 | 0,03 |
| | 7:45 | 14,8 | 308 | 0,34 | 0,05 |
| | 8:00 | 14,9 | 480 | 0,47 | 0,06 |

Табл. 1.1 Данные расходов, скоростей, уклонов и уровней воды с 21 по 25/X на II створе

| Дата | Время | Уровень, м усл. | Расход, м ³ /с | Скорость средняя, м/с | Уклон, % |
|--------|-------|-----------------|---------------------------|-----------------------|----------|
| 21.окт | 20:00 | 16,33 | 1274 | 0,69 | 0,04 |
| | 21:00 | 16,32 | 1190 | 0,64 | 0,03 |
| | 22:00 | 16,23 | 971 | 0,53 | 0,03 |
| | 23:00 | 15,96 | 720 | 0,42 | 0,02 |
| | 0:00 | 15,78 | 603 | 0,37 | 0,03 |
| 22.окт | 1:00 | 15,62 | 527 | 0,33 | 0,01 |
| | 2:00 | 15,46 | 446 | 0,3 | 0,02 |
| | 3:00 | 15,31 | 399 | 0,28 | 0,03 |
| | 4:00 | 15,15 | 367 | 0,26 | 0,03 |
| | 5:00 | 15,06 | 330 | 0,24 | 0,02 |
| | 6:00 | 14,95 | 301 | 0,23 | 0,02 |
| | 7:00 | 15,86 | 286 | 0,22 | 0,02 |
| | 8:00 | 14,77 | 273 | 0,22 | 0,02 |
| | 9:00 | 14,75 | 281 | 0,22 | 0,02 |
| | 10:00 | 14,71 | 277 | 0,22 | 0,02 |
| | 11:00 | 14,68 | 244 | 0,2 | 0,01 |
| | 12:00 | 14,64 | 219 | 0,18 | 0,02 |
| | 13:00 | 14,61 | 215 | 0,18 | 0,02 |
| | 14:00 | 14,59 | 196 | 0,16 | 0,01 |
| | 15:00 | 14,57 | 191 | 0,16 | 0,01 |
| | 16:00 | 14,55 | 175 | 0,15 | 0,01 |
| | 17:00 | 14,54 | 138 | 0,13 | 0,01 |
| | 18:00 | 14,51 | 124 | 0,13 | 0,01 |
| | 19:00 | 14,48 | 115 | 0,13 | 0,01 |
| | 20:00 | 14,46 | 92 | 0,08 | 0,00 |
| | 22:00 | 14,46 | 67 | 0,06 | 0,00 |
| | 0:00 | 14,45 | 48 | 0,04 | 0,00 |
| 23.окт | 2:00 | 14,45 | 48 | 0,04 | 0,00 |
| | 4:00 | 14,45 | 55 | 0,04 | 0,00 |

| | | | | | |
|--------|-------|-------|------|------|------|
| 24.OKT | 6:00 | 14,45 | 61 | 0,04 | 0,00 |
| | 8:00 | 14,45 | 56 | 0,04 | 0,00 |
| | 10:00 | 14,5 | 225 | 0,19 | 0,00 |
| | 10:30 | 14,7 | 390 | 0,32 | 0,02 |
| | 11:00 | 14,8 | 523 | 0,41 | 0,02 |
| | 11:30 | 14,9 | 578 | 0,44 | 0,02 |
| | 12:00 | 14,95 | 587 | 0,44 | 0,03 |
| | 12:30 | 14,96 | 537 | 0,41 | 0,03 |
| | 13:00 | 14,96 | 437 | 0,36 | 0,03 |
| | 13:30 | 14,95 | 429 | 0,32 | 0,03 |
| | 14:00 | 14,92 | 425 | 0,32 | 0,02 |
| | 14:30 | 14,93 | 436 | 0,33 | 0,03 |
| | 15:00 | 14,95 | 474 | 0,36 | 0,03 |
| | 15:30 | 14,97 | 505 | 0,38 | 0,03 |
| | 16:00 | 14,99 | 558 | 0,42 | 0,03 |
| | 16:30 | 15,03 | 602 | 0,45 | 0,03 |
| | 17:00 | 15,06 | 641 | 0,47 | 0,04 |
| | 17:30 | 15,11 | 691 | 0,5 | 0,04 |
| | 18:00 | 15,18 | 756 | 0,54 | 0,04 |
| | 18:30 | 15,24 | 803 | 0,56 | 0,04 |
| | 19:00 | 15,29 | 838 | 0,58 | 0,05 |
| | 19:30 | 15,35 | 884 | 0,6 | 0,05 |
| | 20:00 | 15,4 | 918 | 0,62 | 0,05 |
| | 20:30 | 15,44 | 940 | 0,63 | 0,05 |
| | 21:00 | 15,48 | 974 | 0,64 | 0,05 |
| | 21:30 | 15,51 | 996 | 0,65 | 0,05 |
| | 22:00 | 15,54 | 1000 | 0,65 | 0,05 |
| | 22:30 | 15,59 | 998 | 0,63 | 0,05 |
| | 23:00 | 15,62 | 975 | 0,62 | 0,05 |
| | 23:30 | 15,59 | 885 | 0,56 | 0,05 |
| | 0:00 | 15,56 | 809 | 0,52 | 0,04 |
| 24.OKT | 1:00 | 15,44 | 624 | 0,43 | 0,03 |
| | 2:00 | 15,31 | 515 | 0,35 | 0,03 |
| | 3:00 | 15,18 | 423 | 0,3 | 0,03 |
| | 4:00 | 15,06 | 372 | 0,27 | 0,02 |
| | 5:00 | 14,96 | 315 | 0,24 | 0,02 |

| | | | | | |
|--------|-------|-------|------|------|------|
| | 6:00 | 14,85 | 290 | 0,23 | 0,02 |
| | 7:00 | 14,75 | 257 | 0,2 | 0,01 |
| | 8:00 | 14,67 | 246 | 0,2 | 0,01 |
| | 8:30 | 14,64 | 267 | 0,22 | 0,02 |
| | 9:00 | 14,67 | 325 | 0,26 | 0,02 |
| | 9:30 | 14,74 | 423 | 0,34 | 0,03 |
| | 10:00 | 14,82 | 524 | 0,41 | 0,03 |
| | 10:30 | 14,89 | 613 | 0,47 | 0,04 |
| | 11:00 | 14,96 | 675 | 0,51 | 0,04 |
| | 11:30 | 15,05 | 715 | 0,53 | 0,05 |
| | 12:00 | 15,1 | 736 | 0,54 | 0,04 |
| | 12:30 | 15,13 | 728 | 0,52 | 0,04 |
| | 13:00 | 15,14 | 703 | 0,51 | 0,03 |
| | 13:30 | 15,14 | 678 | 0,49 | 0,03 |
| | 14:00 | 15,14 | 643 | 0,46 | 0,03 |
| | 14:30 | 15,14 | 623 | 0,45 | 0,03 |
| | 15:00 | 15,14 | 614 | 0,44 | 0,03 |
| | 15:30 | 15,14 | 604 | 0,42 | 0,03 |
| | 16:00 | 15,14 | 601 | 0,42 | 0,03 |
| | 16:30 | 15,13 | 608 | 0,41 | 0,03 |
| | 17:00 | 15,13 | 620 | 0,45 | 0,03 |
| | 17:30 | 15,16 | 666 | 0,48 | 0,03 |
| | 18:00 | 15,18 | 738 | 0,52 | 0,05 |
| | 18:30 | 15,27 | 829 | 0,57 | 0,05 |
| | 19:00 | 15,33 | 890 | 0,61 | 0,05 |
| | 19:30 | 15,37 | 926 | 0,63 | 0,06 |
| | 20:00 | 15,42 | 948 | 0,63 | 0,06 |
| | 20:30 | 15,5 | 1000 | 0,66 | 0,06 |
| | 21:00 | 15,52 | 1010 | 0,65 | 0,06 |
| | 21:30 | 15,55 | 1000 | 0,65 | 0,06 |
| | 22:00 | 15,55 | 956 | 0,62 | 0,05 |
| | 22:30 | 15,52 | 897 | 0,58 | 0,04 |
| | 23:00 | 15,51 | 874 | 0,55 | 0,04 |
| | 23:30 | 15,47 | 740 | 0,49 | 0,03 |
| | 0:00 | 15,39 | 582 | 0,39 | 0,03 |
| 25.OKT | 1:00 | 15,25 | 463 | 0,32 | 0,03 |

| | | | | |
|-------|-------|-----|------|------|
| 2:00 | 15,1 | 406 | 0,3 | 0,02 |
| 3:00 | 14,99 | 344 | 0,26 | 0,02 |
| 4:00 | 14,89 | 301 | 0,23 | 0,01 |
| 5:00 | 14,8 | 259 | 0,2 | 0,01 |
| 6:00 | 14,72 | 240 | 0,19 | 0,01 |
| 7:00 | 14,65 | 211 | 0,17 | 0,02 |
| 8:00 | 14,59 | 186 | 0,16 | 0,02 |
| 8:30 | 14,56 | 244 | 0,19 | 0,02 |
| 9:00 | 14,6 | 350 | 0,29 | 0,02 |
| 9:30 | 14,7 | 467 | 0,38 | 0,02 |
| 10:00 | 14,76 | 516 | 0,41 | 0,03 |
| 10:30 | 14,85 | 579 | 0,45 | 0,03 |
| 11:00 | 14,93 | 630 | 0,48 | 0,04 |
| 11:30 | 15 | 647 | 0,48 | 0,04 |
| 12:00 | 15,05 | 665 | 0,49 | 0,04 |
| 12:30 | 15,08 | 657 | 0,48 | 0,04 |
| 13:00 | 15,09 | 639 | 0,46 | 0,03 |
| 13:30 | 15,1 | 625 | 0,45 | 0,03 |
| 14:00 | 15,12 | 619 | 0,45 | 0,03 |
| 14:30 | 15,13 | 606 | 0,44 | 0,03 |
| 15:00 | 15,13 | 604 | 0,44 | 0,03 |
| 15:30 | 15,12 | 601 | 0,43 | 0,03 |
| 16:00 | 15,12 | 596 | 0,43 | 0,03 |
| 16:30 | 15,12 | 596 | 0,43 | 0,03 |
| 17:00 | 15,13 | 612 | 0,44 | 0,03 |
| 17:30 | 15,13 | 616 | 0,45 | 0,03 |
| 18:00 | 15,13 | 629 | 0,45 | 0,03 |
| 18:30 | 15,14 | 646 | 0,47 | 0,03 |
| 19:00 | 15,17 | 673 | 0,48 | 0,03 |
| 19:30 | 15,2 | 716 | 0,51 | 0,04 |

Табл. 1.2 Данные расходов, скоростей, уклонов и уровней воды с 21 по 25/X на IV створе

| Дата | Время | Уровень, м усл. | Расход, м ³ /с | Скорость средняя, м/с | Уклон, % |
|--------|-------|--------------------|------------------------------|-----------------------------|-------------|
| 21.окт | 20:00 | | | | |
| | 21:00 | | | | |
| | 22:00 | | | | |
| | 23:00 | | | | |
| | 0:00 | | | | |
| 22.окт | 1:00 | | | | |
| | 2:00 | | | | |
| | 3:00 | | | | |
| | 4:00 | | | | |
| | 5:00 | | | | |
| | 6:00 | | | | |
| | 7:00 | 14,56 | 423 | 0,29 | 0,01 |
| | 8:00 | 14,53 | 403 | 0,28 | 0,01 |
| | 9:00 | 14,51 | 374 | 0,26 | 0,01 |
| | 10:00 | 14,49 | 340 | 0,23 | 0,01 |
| | 11:00 | 14,49 | 313 | 0,22 | 0,01 |
| | 12:00 | 14,49 | 280 | 0,19 | 0,01 |
| | 13:00 | 14,48 | 254 | 0,18 | 0,01 |
| | 14:00 | 14,47 | 236 | 0,16 | 0,01 |
| | 15:00 | 14,47 | 222 | 0,15 | 0,01 |
| | 16:00 | 14,44 | 199 | 0,14 | 0,01 |
| | 17:00 | 14,43 | 183 | 0,13 | 0,01 |
| | 18:00 | 14,43 | 159 | 0,11 | 0,01 |
| | 19:00 | 14,43 | 137 | 0,1 | 0,01 |
| | 20:00 | 14,43 | 125 | 0,09 | 0,00 |
| | 22:00 | 14,41 | 95 | 0,06 | 0,00 |
| | 0:00 | 14,41 | 76 | 0,05 | 0,00 |
| 23.окт | 2:00 | 14,41 | 69 | 0,05 | 0,00 |
| | 4:00 | 14,41 | 66 | 0,04 | 0,00 |
| | 6:00 | 14,41 | 64 | 0,04 | 0,00 |
| | 8:00 | 14,41 | 60 | 0,04 | 0,00 |
| | 10:00 | 14,41 | 60 | 0,04 | 0,00 |
| | 10:30 | 14,41 | 86 | 0,06 | 0,00 |

| | | | | | |
|--------|-------|-------|-----|------|------|
| | 11:00 | 14,42 | 112 | 0,08 | 0,01 |
| | 11:30 | 14,49 | 202 | 0,14 | 0,02 |
| | 12:00 | 14,52 | 296 | 0,2 | 0,01 |
| | 12:30 | 14,54 | 368 | 0,25 | 0,01 |
| | 13:00 | 14,56 | 426 | 0,29 | 0,01 |
| | 13:30 | 14,56 | 459 | 0,31 | 0,01 |
| | 14:00 | 14,56 | 480 | 0,33 | 0,01 |
| | 14:30 | 14,56 | 486 | 0,33 | 0,01 |
| | 15:00 | 14,56 | 489 | 0,33 | 0,01 |
| | 15:30 | 14,56 | 489 | 0,33 | 0,01 |
| | 16:00 | 14,56 | 489 | 0,33 | 0,01 |
| | 16:30 | 14,56 | 496 | 0,34 | 0,01 |
| | 17:00 | 14,56 | 501 | 0,34 | 0,01 |
| | 17:30 | 14,56 | 513 | 0,35 | 0,01 |
| | 18:00 | 14,56 | 528 | 0,36 | 0,01 |
| | 18:30 | 14,57 | 558 | 0,38 | 0,02 |
| | 19:00 | 14,59 | 586 | 0,4 | 0,02 |
| | 19:30 | 14,61 | 622 | 0,42 | 0,02 |
| | 20:00 | 14,62 | 660 | 0,45 | 0,02 |
| | 20:30 | 14,64 | 690 | 0,46 | 0,02 |
| | 21:00 | 14,65 | 723 | 0,48 | 0,02 |
| | 21:30 | 14,68 | 760 | 0,52 | 0,02 |
| | 22:00 | 14,69 | 778 | 0,52 | 0,02 |
| | 22:30 | 14,71 | 815 | 0,54 | 0,02 |
| | 23:00 | 14,72 | 840 | 0,56 | 0,02 |
| | 23:30 | 14,74 | 864 | 0,57 | 0,02 |
| | 0:00 | 14,75 | 890 | 0,58 | 0,02 |
| 24.OKT | 1:00 | 14,75 | 890 | 0,58 | 0,02 |
| | 2:00 | 14,72 | 834 | 0,55 | 0,02 |
| | 3:00 | 14,68 | 740 | 0,5 | 0,02 |
| | 4:00 | 14,64 | 681 | 0,46 | 0,02 |
| | 5:00 | 14,6 | 609 | 0,41 | 0,01 |
| | 6:00 | 14,54 | 536 | 0,37 | 0,01 |
| | 7:00 | 14,5 | 468 | 0,32 | 0,01 |
| | 8:00 | 14,47 | 403 | 0,28 | 0,01 |
| | 8:30 | 14,45 | 369 | 0,26 | 0,01 |

| | | | | | |
|--------|-------|-------|-----|------|------|
| | 9:00 | 14,44 | 324 | 0,23 | 0,01 |
| | 9:30 | 14,43 | 303 | 0,21 | 0,01 |
| | 10:00 | 14,43 | 303 | 0,21 | 0,01 |
| | 10:30 | 14,43 | 322 | 0,22 | 0,01 |
| | 11:00 | 14,44 | 363 | 0,25 | 0,01 |
| | 11:30 | 14,47 | 401 | 0,29 | 0,01 |
| | 12:00 | 14,49 | 457 | 0,32 | 0,01 |
| | 12:30 | 14,5 | 505 | 0,35 | 0,01 |
| | 13:00 | 14,58 | 546 | 0,37 | 0,01 |
| | 13:30 | 14,54 | 575 | 0,39 | 0,01 |
| | 14:00 | 14,55 | 600 | 0,41 | 0,01 |
| | 14:30 | 14,56 | 614 | 0,42 | 0,01 |
| | 15:00 | 14,57 | 619 | 0,42 | 0,01 |
| | 15:30 | 14,57 | 619 | 0,42 | 0,01 |
| | 16:00 | 14,57 | 619 | 0,42 | 0,01 |
| | 16:30 | 14,57 | 619 | 0,42 | 0,01 |
| | 17:00 | 14,57 | 620 | 0,42 | 0,01 |
| | 17:30 | 14,57 | 620 | 0,42 | 0,01 |
| | 18:00 | 14,57 | 620 | 0,42 | 0,01 |
| | 18:30 | 14,57 | 620 | 0,42 | 0,01 |
| | 19:00 | 14,57 | 642 | 0,44 | 0,02 |
| | 19:30 | 14,58 | 693 | 0,45 | 0,02 |
| | 20:00 | 14,59 | 693 | 0,47 | 0,02 |
| | 20:30 | 14,6 | 724 | 0,49 | 0,02 |
| | 21:00 | 14,63 | 756 | 0,51 | 0,02 |
| | 21:30 | 14,65 | 790 | 0,53 | 0,02 |
| | 22:00 | 14,69 | 816 | 0,54 | 0,02 |
| | 22:30 | 14,7 | 836 | 0,56 | 0,02 |
| | 23:00 | 14,71 | 857 | 0,57 | 0,02 |
| | 23:30 | 14,71 | 849 | 0,57 | 0,02 |
| | 0:00 | 14,71 | 846 | 0,56 | 0,02 |
| 25.OKT | 1:00 | 14,71 | 811 | 0,54 | 0,02 |
| | 2:00 | 14,65 | 711 | 0,48 | 0,02 |
| | 3:00 | 14,6 | 649 | 0,44 | 0,02 |
| | 4:00 | 14,56 | 562 | 0,38 | 0,02 |
| | 5:00 | 14,52 | 489 | 0,33 | 0,01 |

| | | | | |
|-------|-------|-----|------|------|
| 6:00 | 14,48 | 414 | 0,29 | 0,01 |
| 7:00 | 14,45 | 350 | 0,24 | 0,01 |
| 8:00 | 14,41 | 287 | 0,2 | 0,01 |
| 8:30 | 14,41 | 255 | 0,18 | 0,01 |
| 9:00 | 14,41 | 222 | 0,16 | 0,01 |
| 9:30 | 14,41 | 218 | 0,15 | 0,01 |
| 10:00 | 14,41 | 229 | 0,16 | 0,01 |
| 10:30 | 14,43 | 264 | 0,18 | 0,01 |
| 11:00 | 14,45 | 318 | 0,22 | 0,01 |
| 11:30 | 14,49 | 367 | 0,25 | 0,01 |
| 12:00 | 14,51 | 419 | 0,29 | 0,01 |
| 12:30 | 14,54 | 460 | 0,31 | 0,01 |
| 13:00 | 14,56 | 502 | 0,34 | 0,01 |
| 13:30 | 14,57 | 537 | 0,36 | 0,01 |
| 14:00 | 14,57 | 562 | 0,38 | 0,01 |
| 14:30 | 14,57 | 577 | 0,39 | 0,02 |
| 15:00 | 14,57 | 591 | 0,4 | 0,02 |
| 15:30 | 14,57 | 599 | 0,41 | 0,02 |
| 16:00 | 14,57 | 604 | 0,41 | 0,02 |
| 16:30 | 14,57 | 604 | 0,41 | 0,02 |
| 17:00 | 14,57 | 607 | 0,42 | 0,02 |
| 17:30 | 14,57 | 607 | 0,42 | 0,02 |
| 18:00 | 14,57 | 605 | 0,41 | 0,02 |
| 18:30 | 14,57 | 602 | 0,41 | 0,02 |
| 19:00 | 14,57 | 602 | 0,41 | 0,02 |
| 19:30 | 14,57 | 602 | 0,41 | 0,02 |

Табл. 1.3 Данные расходов, скоростей, уклонов и уровней воды с 21 по 25/X на VI створе

При построении поперечных профилей гидростворов использовались такие данные как расстояние от постоянного начала (м) и отметки (м. усл), указаны в таблицах 1.4-1.6.

| Расстояние от пост. начала, м | Отметки м. усл. |
|-------------------------------------|--------------------|
| 0 | 18 |
| 10 | 17,5 |
| 15 | 15,5 |
| 25 | 15 |
| 34 | 14,7 |
| 41 | 14,9 |
| 44 | 14,6 |
| 54 | 14,4 |
| 73 | 12,8 |
| 76 | 12,8 |
| 83 | 12,1 |
| 94 | 11,9 |
| 105 | 10,9 |
| 115 | 10,4 |
| 121 | 10,4 |
| 125 | 10,4 |
| 135 | 9,14 |
| 145 | 9,1 |
| 175 | 10,1 |
| 185 | 10,1 |
| 195 | 9,57 |
| 205 | 9,81 |
| 215 | 10,2 |
| 226 | 10,3 |
| 232 | 9,97 |
| 245 | 9,65 |
| 251 | 10,2 |
| 255 | 9,57 |
| 265 | 9,2 |
| 275 | 9,25 |
| 285 | 13,7 |
| 305 | 16,5 |
| 320 | 18,7 |

Табл. 1.4 Данные о расстоянии от постоянного начала (м) и отметках (м. усл), используемые для построения поперечного профиля гидроствора II

| Расстояние от пост. начала, м | Отметки м. усл. |
|-------------------------------|-----------------|
| -8 | 16,5 |
| 0 | 16,3 |
| 25 | 15,8 |
| 38 | 15,3 |
| 83 | 11,5 |
| 125 | 10,9 |
| 132 | 10,8 |
| 148 | 10,5 |
| 188 | 10,1 |
| 191 | 10,0 |
| 207 | 10,1 |
| 232 | 10,1 |
| 261 | 9,9 |
| 263 | 9,98 |
| 295 | 9,81 |
| 311 | 9,4 |
| 316 | 9,11 |
| 326 | 9,3 |
| 339 | 12,1 |
| 349 | 13,5 |
| 354 | 14,6 |
| 366 | 15,9 |
| 375 | 17,0 |

Табл. 1.5 Данные о расстоянии от постоянного начала (м) и отметках (м. усл), используемые для построения поперечного профиля гидроствора IV

| Расстояние от пост. начала, м | Отметки м. усл. |
|-------------------------------------|--------------------|
| -2 | 15,2 |
| 0 | |
| 40 | 13,5 |
| 60 | 11,9 |
| 70 | 11,4 |
| 72 | 11,1 |
| 80 | 10,3 |
| 100 | 8 |
| 110 | 7,05 |
| 115 | 6,63 |
| 118 | 6,35 |
| 125 | 5,12 |
| 135 | 4,45 |
| 150 | 4,5 |
| 158 | 4,31 |
| 165 | 4,17 |
| 193 | 4,4 |
| 200 | 5,7 |
| 205 | 5,85 |
| 210 | 6,5 |
| 215 | 7,7 |
| 220 | 10,1 |
| 245 | 11,5 |
| 250 | 13,2 |
| 265 | 15,0 |

Табл. 1.6 Данные о расстоянии от постоянного начала (м) и отметках (м. усл.),
используемые для построения поперечного профиля гидроствора VI

Глава 2. Зависимость скорости от гидравлических характеристик

В данной главе рассмотрена зависимость скорости потока от ширины русла, т.е. от площади поперечного сечения. Для того, чтобы выявить зависимость, необходимо было построить поперечный профиль русла р. Свирь для каждого исследуемого гидроствора.

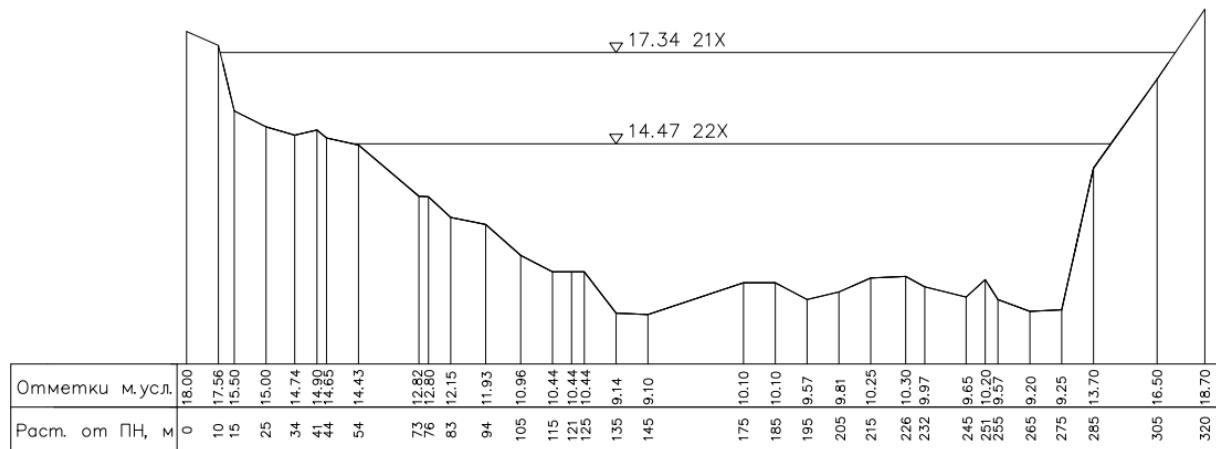


Рис. 2.1 Поперечный профиль русла р. Свирь в гидростворе II

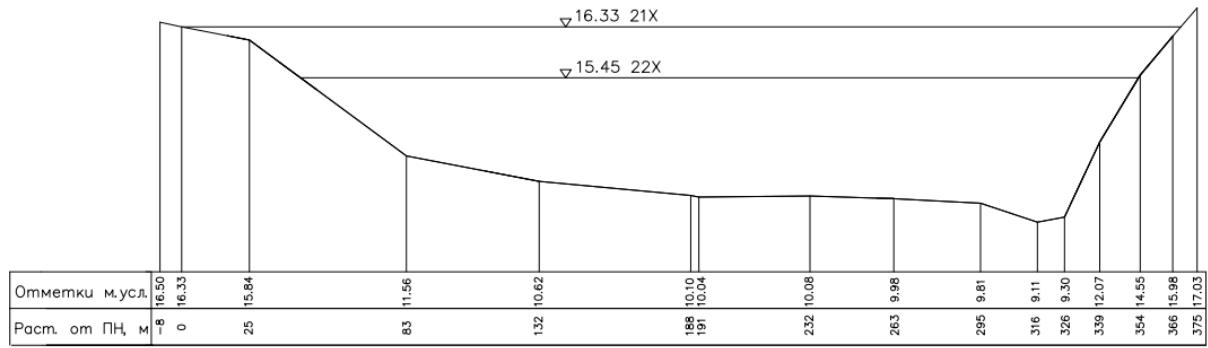


Рис. 2.2 Поперечный профиль русла р. Свирь в гидростворе IV

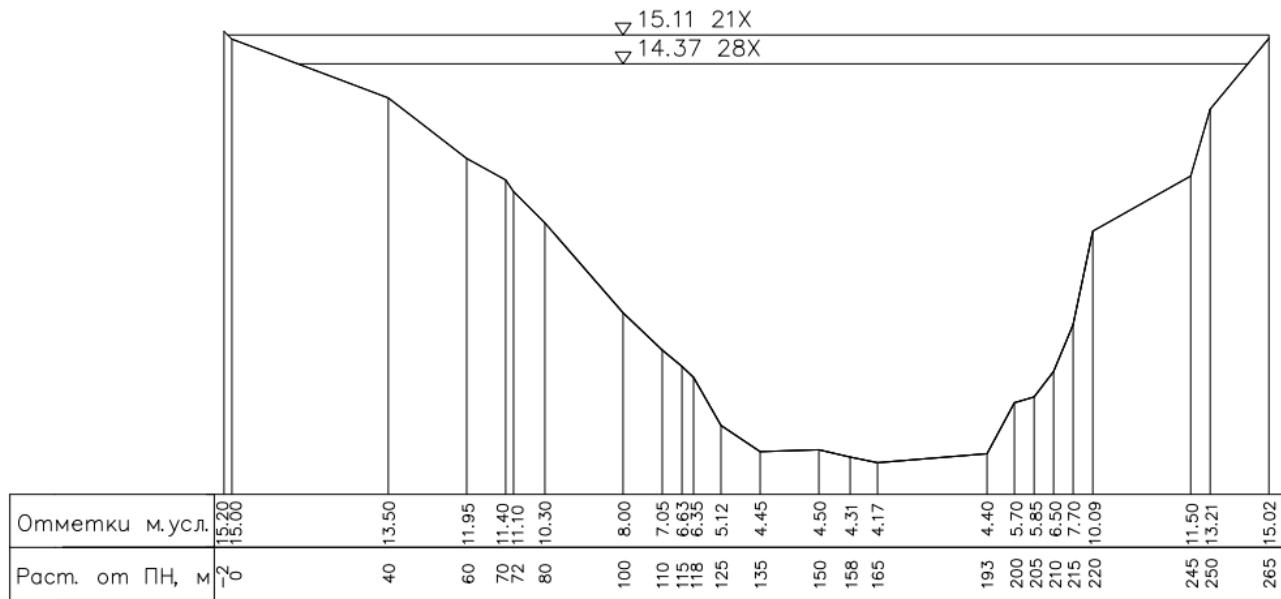


Рис. 2.3 Поперечный профиль русла р. Свирь в гидростворе VI

С их помощью рассчитаны площадь живого сечения и смоченный периметр при различных значениях уровня воды на каждом гидростворе (Табл. 2.1-2.6). На основании полученных данных строились кривые зависимости площади живого сечения от уровня воды (Рис. 2.4-2.9), демонстрирующая выраженную прямую корреляционную связь между исследуемыми параметрами: рост уровня воды сопровождается увеличением площади живого сечения, тогда как его снижение приводит к уменьшению площади.

| H, м (усл.) | Площадь живого сечения ω , м ² |
|----------------|---|
| 10 | 47,3 |
| 11 | 202 |
| 12 | 383 |
| 13 | 586 |
| 14 | 806 |
| 15 | 1049 |
| 16 | 1330 |
| 17 | 1622 |

Табл. 2.1 Площадь живого сечения для соответствующего уровня в створе II

| $H, \text{ м}$ (усл.) | Площадь живого сечения $\omega, \text{ м}^2$ |
|--------------------------|---|
| 10 | 23,8 |
| 11 | 203 |
| 12 | 450 |
| 13 | 721 |
| 14 | 1012 |
| 15 | 1323 |
| 16 | 1656 |

Табл. 2.2 Площадь живого сечения для соответствующего уровня в створе IV

| $H, \text{ м}$ (усл.) | Площадь живого сечения $\omega, \text{ м}^2$ |
|--------------------------|---|
| 10 | 573 |
| 11 | 722 |
| 12 | 898 |
| 13 | 1093 |
| 14 | 1307 |
| 15 | 1554 |

Табл. 2.3 Площадь живого сечения для соответствующего уровня в створе VI

| $H, \text{ м}$ (усл.) | Смоченный периметр χ |
|--------------------------|------------------------------|
| 10 | 126,2 |
| 11 | 208 |
| 12 | 236 |
| 13 | 269 |
| 14 | 295 |
| 15 | 345 |
| 16 | 374 |
| 17 | 396 |

Табл. 2.4 Смоченный периметр для соответствующего уровня в створе II

| H, м (усл.) | Смоченный периметр χ |
|----------------|------------------------------|
| 10 | 78,3 |
| 11 | 235 |
| 12 | 283 |
| 13 | 311 |
| 14 | 340 |
| 15 | 369 |
| 16 | 404 |

Табл. 2.5 Смоченный периметр для соответствующего уровня в створе IV

| H, м (усл.) | Смоченный периметр χ |
|----------------|------------------------------|
| 10 | 200,0 |
| 11 | 234 |
| 12 | 266 |
| 13 | 293 |
| 14 | 328 |
| 15 | 369 |

Табл. 2.6 Смоченный периметр для соответствующего уровня в створе VI

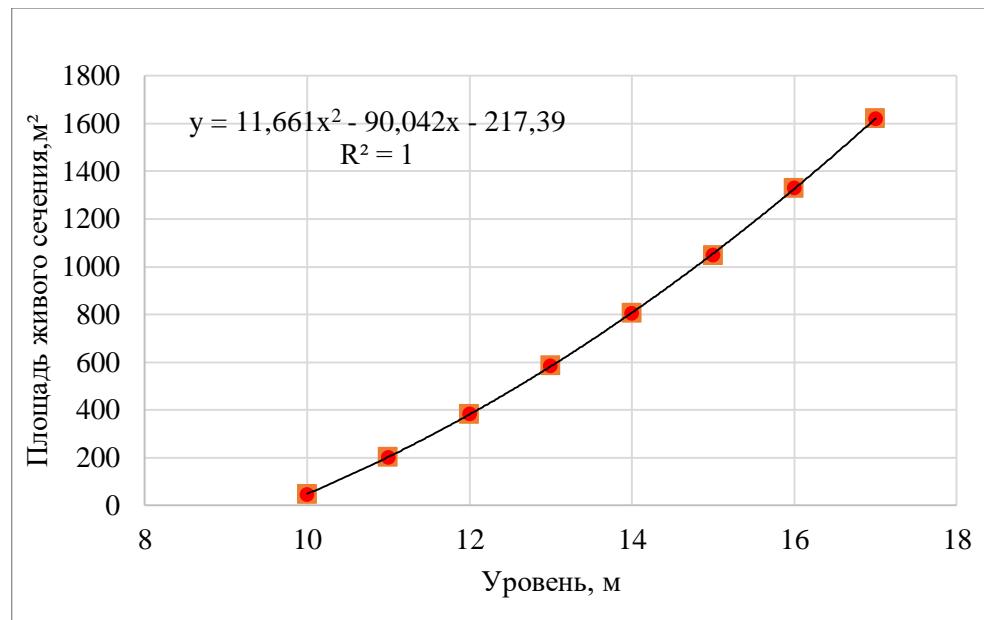


Рис. 2.4 Зависимость площади живого сечения от уровня воды для створа II

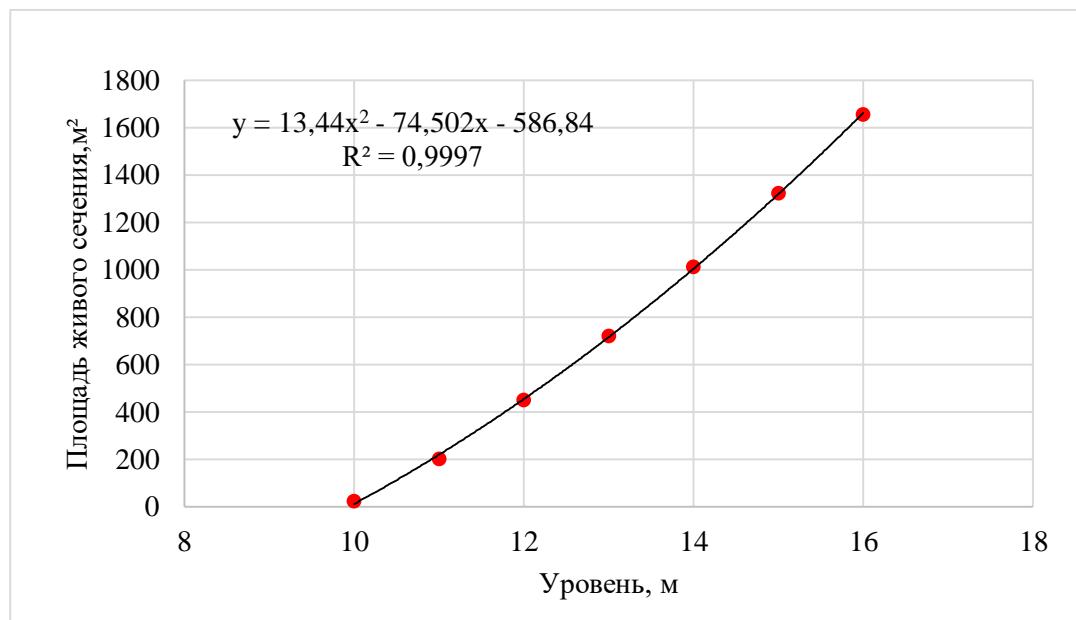


Рис. 2.5 Зависимость площади живого сечения от уровня воды для створа IV

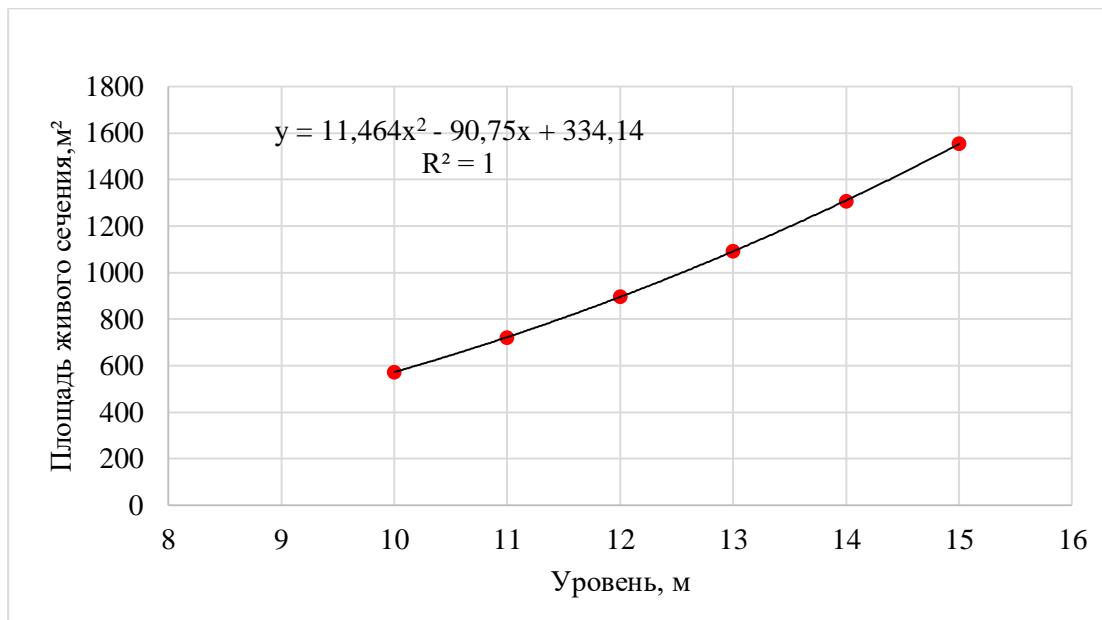


Рис. 2.6 Зависимость площади живого сечения от уровня воды для створа VI

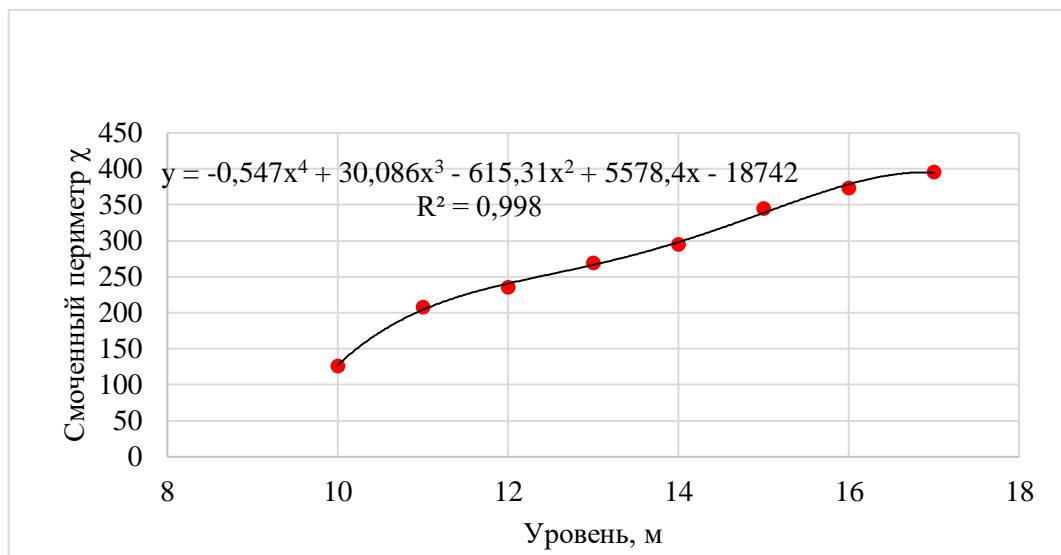


Рис. 2.7 Зависимость смоченного периметра от уровня воды для створа II

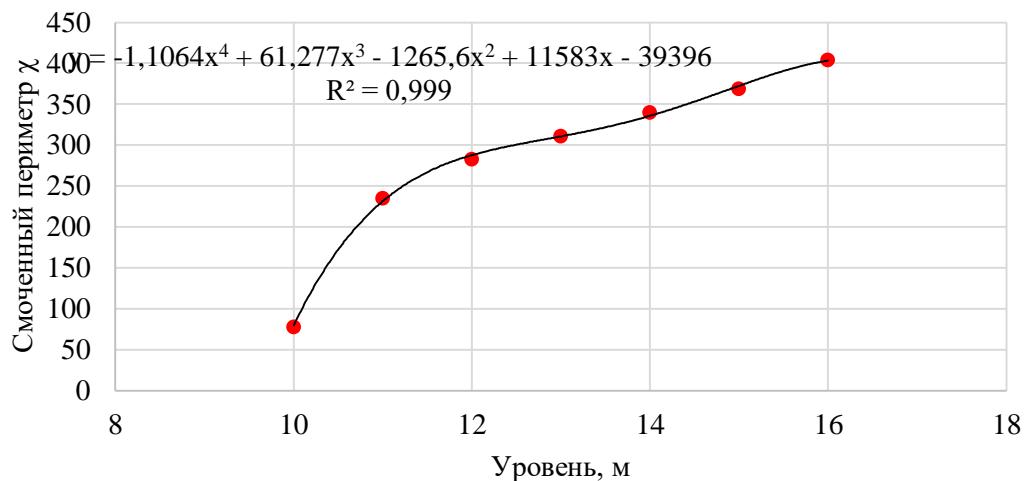


Рис. 2.8 Зависимость смоченного периметра от уровня воды для створа IV

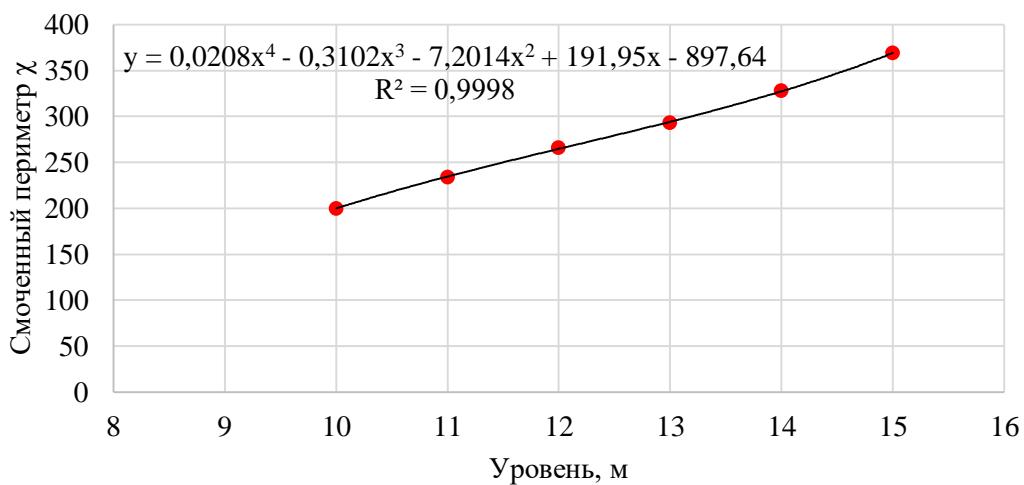


Рис. 2.9 Зависимость смоченного периметра от уровня воды для створа VI

На основе полученных эмпирических уравнений связи рассчитывалась динамика площади водного сечения и смоченного периметра с временным шагом 15 минут. Анализ зависимостей скорости от площади поперечного сечения $V = f(F)$, построенных для трех исследуемых створов (Рис. 2.10-2.12), выявил наличие петли Сен-Венана, что свидетельствует о неустановившемся

движении потока, но можно заметить, как с каждым последующим створом петля меняет свою форму, и поток всё более приобретает черту установившегося движения.

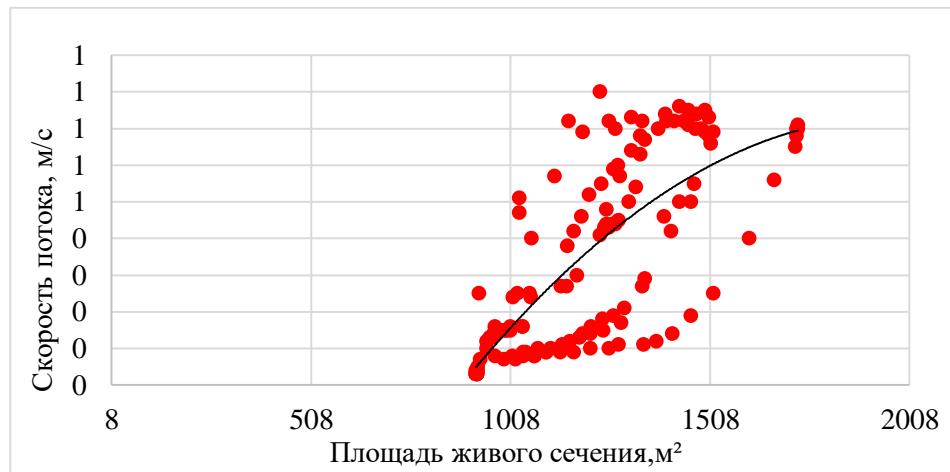


Рис. 2.10 Эмпирическая кривая зависимости скорости потока от площади водного сечения для створа II

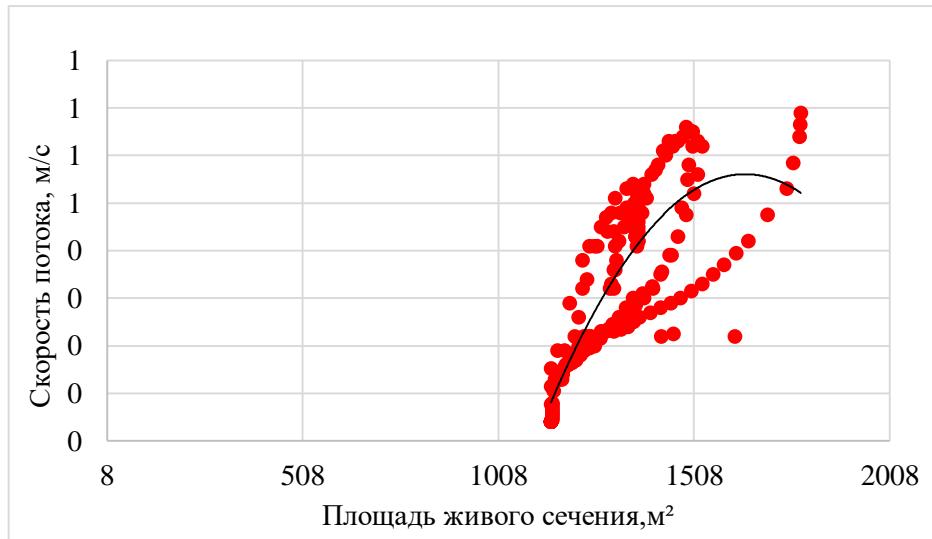


Рис. 2.11 Эмпирическая кривая зависимости скорости потока от площади водного сечения для створа IV

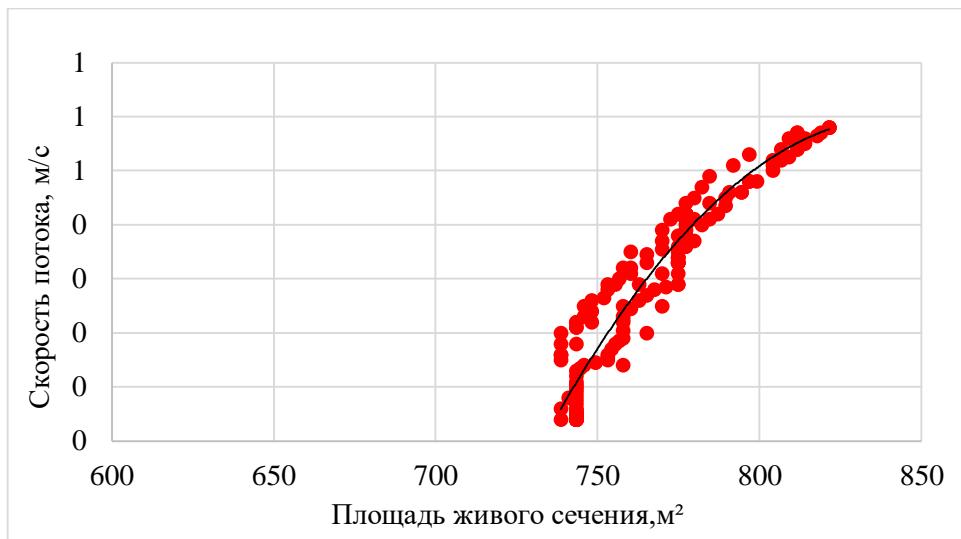


Рис. 2.12 Эмпирическая кривая зависимости скорости потока от площади водного сечения для створа VI

Связь неоднозначная, поэтому решалась через систему уравнений Сен-Венана, которая довольно полно описывает в одномерной гидравлической идеализации движение неустановившегося потока в русле. В результате ее решения находят функции $Q = f(x, t)$ и $H = f(x, t)$. Для каждого створа с координатой x_0 из измерений известны зависимости $C = f(H)$ и $I = f(t)$ (здесь $I = -\partial H / \partial x$ - уклон водной поверхности), то подставляя производную $\partial Q / \partial x = -\partial F / \partial t$ из уравнения неразрывности в динамическое уравнение, последнее можно записать в виде дифференциального уравнения в обыкновенных производных:

$$dQ/dt = f_1(x_0, t)Q^2 + f_2(x_0, t)Q + f_3(x_0, t)$$

$$f_1 = \frac{-g}{C^2 RF}, \text{ где } C = R^{1/6} / n, \quad f_2 = \frac{2\alpha}{F} \cdot \frac{\partial F}{\partial t}; \quad \frac{\partial F}{\partial t} \approx \frac{\Delta F}{\Delta t}, \quad f_3 = gIF$$

где

Решить его - значит найти для каждого створа зависимость $Q = f(t)$ при известных начальном расходе воды, коэффициентах $f_1(x_0, t)$ и $f_2(x_0, t)$ и свободном члене $f_3(x_0, t)$. Так как $F = f(H)$, $C = f(H)$ и $R = f(H)$, то при измеренных значениях H и I имеем $Q = f(H, \partial H / \partial x, \partial H / \partial t)$, так как $\partial H / \partial x = -I$, а $\partial H / \partial t$

определяется функцией $H(t)$ при непрерывном или дискретном, но достаточно частом измерении H . Таким образом, при плавно изменяющемся движении зависимость $Q = f(H)$ определяется нелинейным дифференциальным уравнением первого порядка с переменными коэффициентами, которое, по существу, является уравнением петлеобразной зависимости $Q = f(H)$. (Формально-математически - это так называемое уравнение Риккати.) [5]

Полученное уравнение петли можно решить численными методами, в данном случае уравнение решалось методом Эйлера.

На основании вычисленных значений расхода в трех контрольных створах были определены соответствующие скорости течения. Для оценки согласия математической модели было проведено сопоставление полученных расчетных значений скорости и расхода с результатами натурных измерений, выполненных в каждом створе, которое показало хорошее соответствие (Рис. 2.13-2.18).

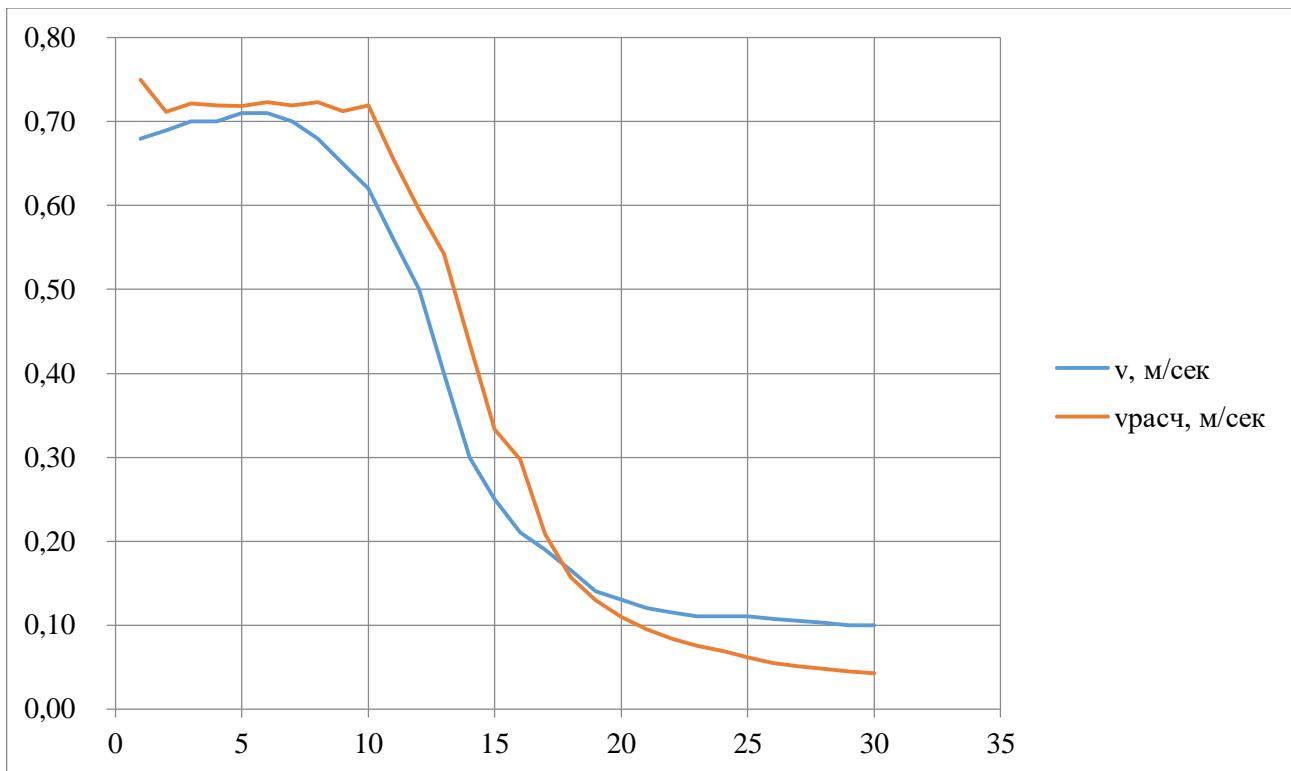


Рис. 2.13 График расчетных значений скорости и фактических по створу II

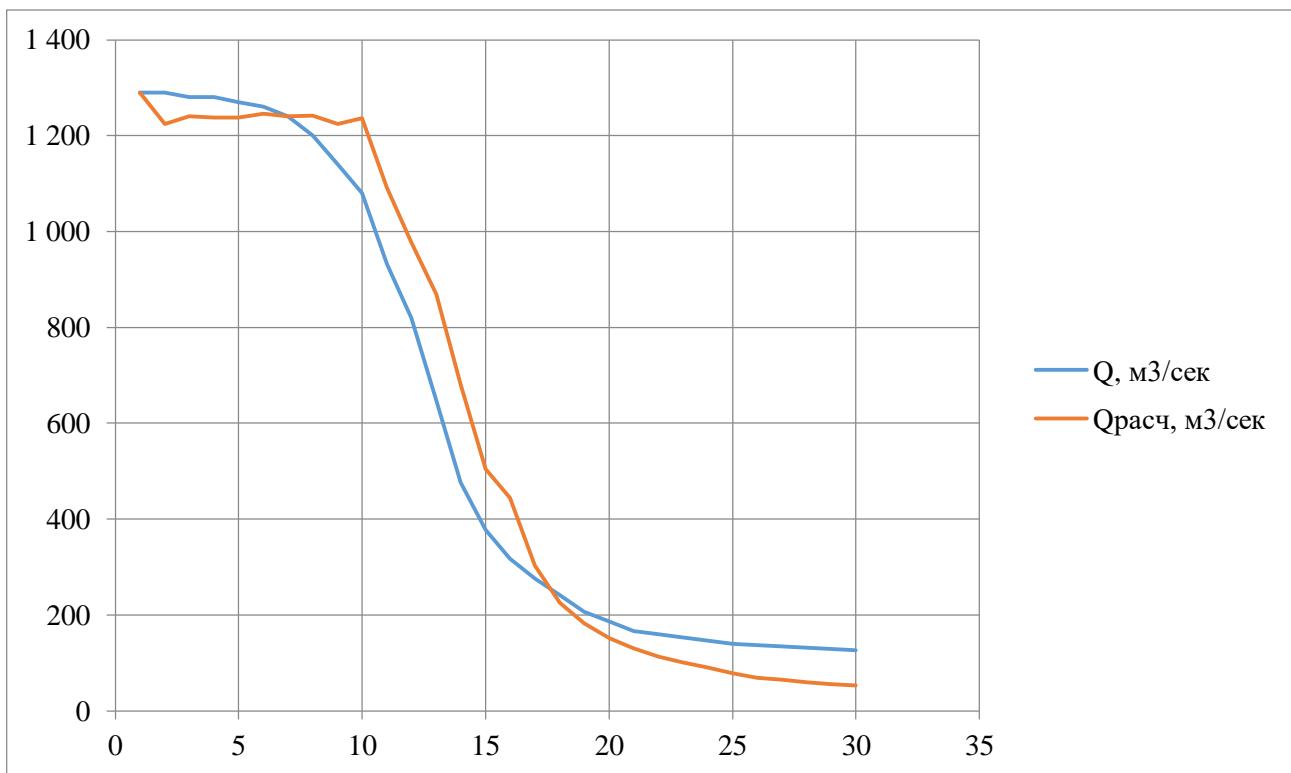


Рис. 2.14 График расчетных значений расхода и фактических по створу II

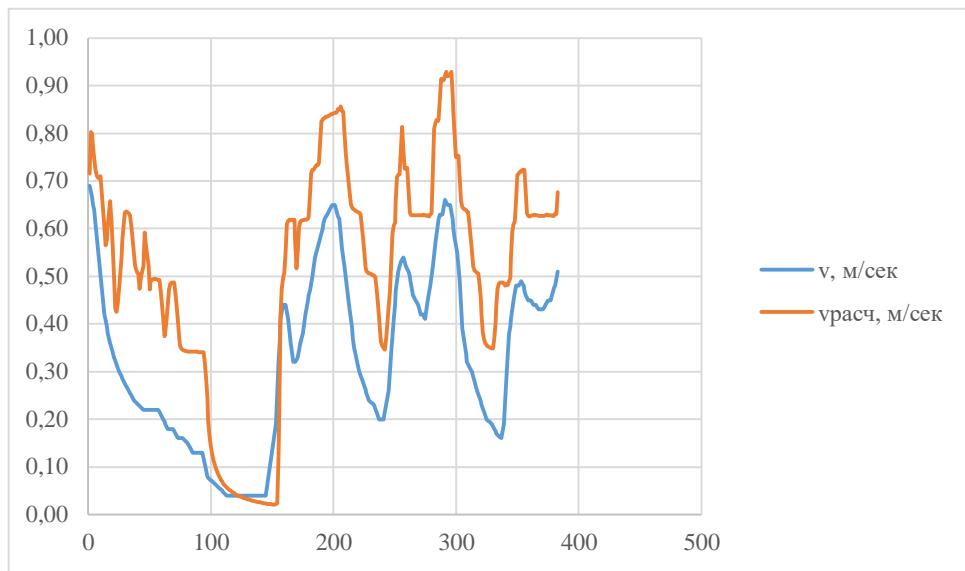


Рис. 2.15 График расчетных значений скорости и фактических по створу IV

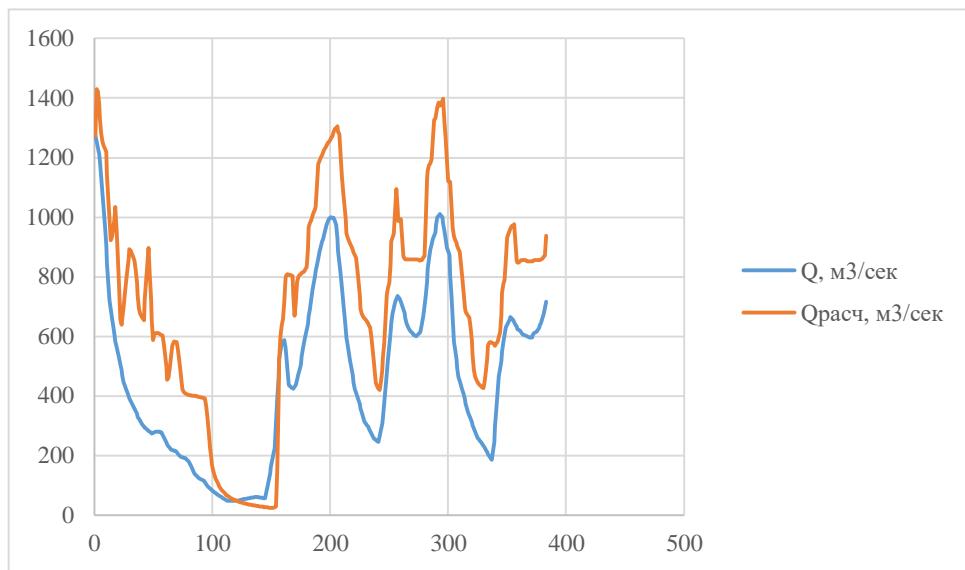


Рис. 2.16 График расчетных значений расхода и фактических по створу IV

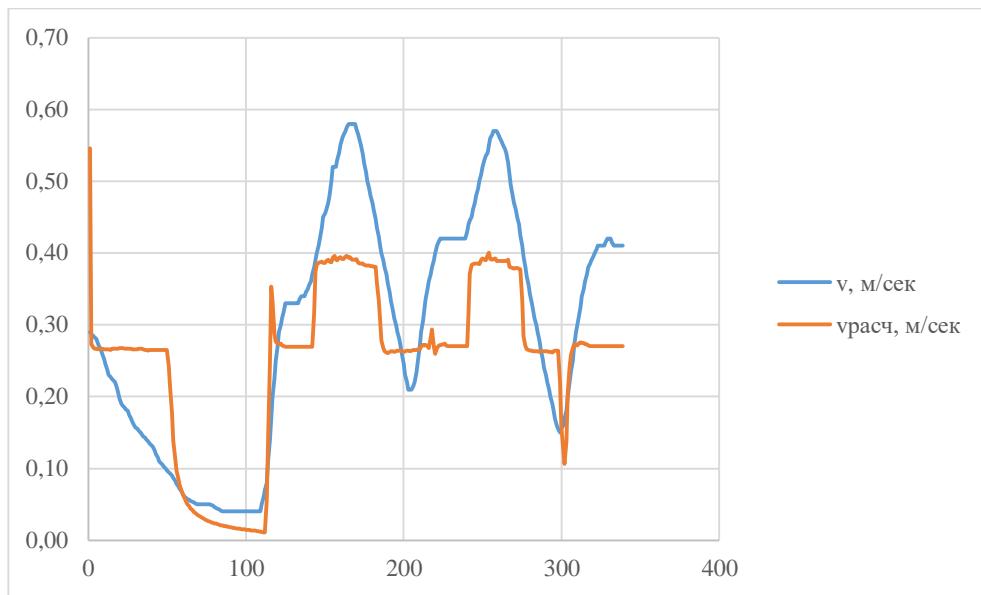


Рис. 2.17 График расчетных значений скорости и фактических по створу VI

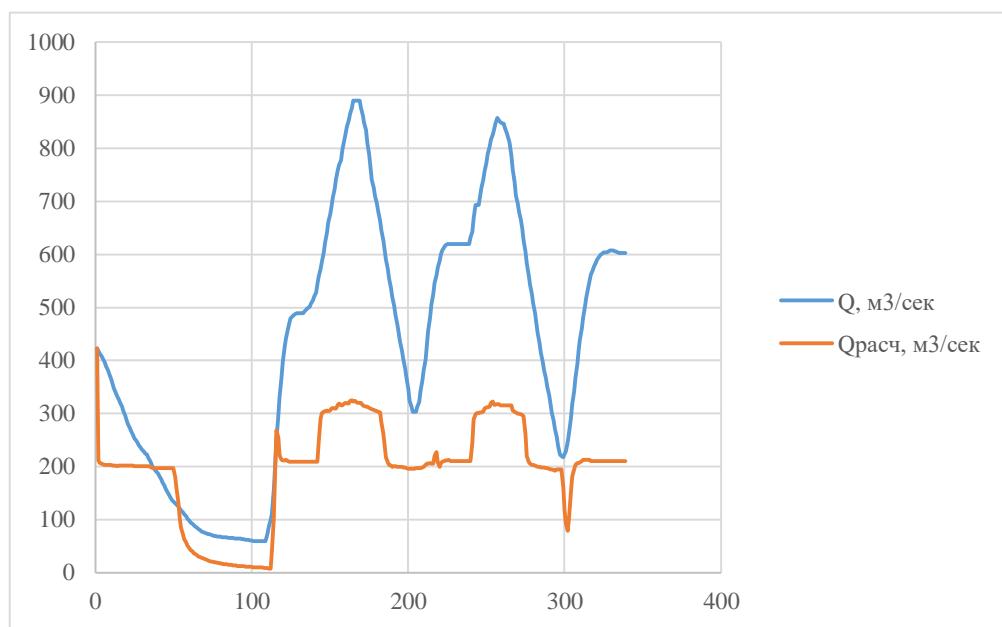


Рис. 2.18 График расчетных значений расхода и фактических по створу VI

Глава 3. Способы моделирования скоростных характеристик потока

3.1. Математическое моделирование гидрологических процессов

3.1.1. Учёт факторов, влияющих на параметры модели

Моделирование — это способ описания объектов, явлений и процессов, предусматривающий наибольшее приближение к реальной действительности с учетом всех обстоятельств. Теперь неизбежно следует дать определение самому понятию «математическая модель» — это математическое представление реальности, приближенное описание какой-либо ситуации, объектов или явлений с математической точки зрения. [1]

Она предназначена для прогнозирования поведения реального объекта и позволяет изучить процессы и проверить гипотезы, когда это невозможно сделать напрямую.

Математическое моделирование занимает важное место в области гидрологии, поскольку оно создает базу данных гидрологических характеристик и дает возможность прогнозировать расходы и уровни воды.

Реки — это динамичные системы, где вода постоянно формирует сложные потоки с непостоянными скоростными характеристиками. Понимание этих характеристик — ключевой аспект в различных областях, от гидроэнергетики и судоходства до экологии и управления водными ресурсами.

Скорость воды в реке — это не константа, а величина, которая изменяется как во времени, так и в пространстве. На неё влияют множество взаимосвязанных факторов, определяющих скорость потока. Например,

- увеличение расхода приводит к увеличению скорости;
- изменение уровня воды влияет на площадь поперечного сечения потока, что, в свою очередь, влияет на скорость;
- сужения русла приводят к увеличению скорости, расширения же — к её уменьшению;

- извилистость русла создаёт зоны завихрений и турбулентности, усложняя распределение скорости;
- наличие камней, растительности, или искусственных сооружений увеличивает шероховатость и снижает скорость и т.д.

Математическое моделирование речного стока требует тщательного учета всех этих факторов, способных влиять на параметры, такие как скорость, расход и уровень воды.

3.1.2 Классификации математических моделей

Математические модели стока могут быть классифицированы по различным критериям, включая методику, уровень детализации и типы используемых данных. Но любая математическая модель так или иначе связывает воздействие на изучаемый гидрологический объект (например, интенсивность осадков) и реакцию объекта, т.е. выход (например, расход воды в замыкающем створе речного водосбора).

Существуют различные подходы к моделированию, включая как детерминированные (динамические), так и стохастические модели. Динамические модели определяют жесткую однозначную связь между причиной (вход) и следствием (выход). В модель входят задаваемые параметры – коэффициенты, характеризующие физические свойства моделируемого объекта, которые предполагаются известными. Эти параметры могут распределяться по речному бассейну (т.е. представлять функции независимых переменных, от которых зависят и величины на выходе). В этом случае имеем модель с распределёнными параметрами. Формально – это дифференциальное уравнение в частных производных.

Однако часто тот же речной бассейн можно рассматривать интегрально, идеализируя его как точку, в которой сосредоточены физические параметры. Такая ситуация возникает, когда не важно, как происходит процесс формирования расхода воды, а важно знать только его изменение в замыкающем створе. Отсюда название модели – модель с сосредоточенными параметрами. То есть – это обыкновенные дифференциальные уравнения с одним независимым аргументом (временем). [4]

Стохастические модели, в свою очередь, учитывают неопределенности и случайные колебания в процессе формирования стока. Такие модели могут включать в себя методы статистики и вероятности и подходят для анализа сложных систем, где присутствует значительная изменчивость данных, таких как осадки или уровень грунтовых вод. Они представляют собой важный инструмент в условиях недостаточности информации и могут использоваться для оценки рисков, связанных с наводнениями и другими гидрологическими событиями.

Каждый тип модели имеет свои преимущества и недостатки, что определяет их выбор в зависимости от конкретной задачи. Например, детерминированные модели могут быть менее устойчивыми к изменениям вводных данных, тогда как стохастические модели могут быть полезными для долгосрочных прогнозов.

3.1.3 Связь уравнения Сен-Венана и геометрией русла при построении математической модели

$$-\frac{\partial H}{\partial x} = Q^2 / (C^2 RF^2) + [1/(gF)] \frac{\partial Q}{\partial t} + [2\alpha Q / (gF^2)] \frac{\partial Q}{\partial x}$$

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial F}{\partial t} = 0,$$

Связь между поведением потока и геометрией русла формируется на основе принципов сохранения массы и импульса. Уравнение Сен-Венана, представляющее собой систему уравнений, описывает эти принципы, позволяя

моделировать изменения скорости потока в зависимости от изменения площади поперечного сечения.

При анализе сужений русел необходимо учитывать ряд факторов, включая влияние шероховатости поверхности, наличие препятствий и т.д. Эти параметры могут существенно изменить поведение потока, приводя к образованию вихрей, ослаблению потока и изменению направления. Уравнение Сен-Венана учитывает эти тонкости, предоставляя возможность более точно моделировать гидрологические процессы и прогнозировать поведение потока в условиях изменения русла. Это особенно важно для проектирования гидро сооружений и оценки их воздействия на окружающую среду. Например, в процессе проектирования мостов и дамб инженеры используют эти уравнения для учета возможных изменений в скорости и направлений течения, что позволяет избежать потенциальных проблем, связанных с эрозией.

Уравнение Сен-Венана для идеального несжимаемого потока предполагает, что сумма произведений площади поперечного сечения и скорости потока на разных участках течения постоянна. Это свойство становится особенно актуальным при сужении, когда изменение площади поперечного сечения приводит к увеличению скорости потока для сохранения этого соотношения.

Моделирование с использованием уравнений Сен-Венана в сочетании с экспериментальными данными позволит выявить критические точки в профиле потока, где воздействие сужения наиболее выражено. Наблюдения показывают, что успех управления потоками во многом зависит от правильного учета особенностей сужений, что позволяет оптимизировать проектирование и уменьшить риск возникновения неприятных ситуаций, таких как затопление или эрозия берегов.

3.2. Лабораторное моделирование гидрологических процессов

Согласно А. Эйнштейну: «Все познание реального мира исходит из опыта и завершается им» и там же «самая блестящая математическая теория не дает сама по себе никакой гарантии истины и может не иметь никакого смысла, если она не проверена наиболее точными наблюдениями, возможными в науке о природе». [3] Поэтому в гидрологии широко используется лабораторное моделирование, которое позволяет проводить точные эксперименты и наблюдения, воспроизводя природные процессы в контролируемых условиях.

Физическое моделирование, которое характеризуется прежде всего тем, что исследования проводятся на установках, обладающих физическим подобием, сохраняющим природу явлений. В отличие от сложных и дорогостоящих полевых измерений, лабораторное моделирование позволяет воспроизвести изучаемые явления в контролируемой среде, что значительно упрощает анализ и интерпретацию результатов. Основа лабораторного моделирования скоростей потока – создание физической модели исследуемого объекта в уменьшенном масштабе. Эта модель, как правило, представляет собой упрощенную копию реальной системы, воспроизводящую её основные геометрические характеристики. Однако, простое уменьшение размеров не гарантирует адекватное воспроизведение всех параметров потока. Для достижения подобия между моделью и прототипом (реальной системой) необходимо соблюдать критерии геометрического, кинематического и динамического подобия.

Геометрическое подобие подразумевает сохранение геометрических пропорций между моделью и прототипом. Все линейные размеры модели уменьшаются в одном и том же масштабе. Однако, даже при идеальном геометрическом подобии, модель может неточно отражать реальные процессы, если не соблюдены другие критерии.

Кинематическое подобие предполагает подобие скоростей и ускорений в модели и прототипе. Это достигается путем соблюдения определенных соотношений между скоростями и временами в модели и прототипе.

Динамическое подобие подразумевает подобие сил, действующих в модели и прототипе. Это наиболее сложный критерий, требующий учета сил трения, гравитации, инерции и других факторов. Для достижения динамического подобия часто приходится использовать жидкости с другой вязкостью, чем вода, или изменять уклон русла модели.

Преимущества лабораторного моделирования:

- Возможность проведения экспериментов в контролируемых условиях.
- Возможность визуализации течения и детального анализа гидродинамических процессов.
- Повторность экспериментов и высокая точность измерений.
- Возможность изучения влияния различных факторов на скорость потока путем изменения параметров модели.

Ограничения лабораторного моделирования:

- Сложности в достижении полного подобия между моделью и прототипом.
 - Ограничения масштаба моделирования, что может привести к искажению некоторых эффектов.
 - Невозможность воспроизведения некоторых факторов, таких как влияние ветра или биологических процессов.

3.3 Отношение лабораторного и математического моделирования

Работа с моделями требует особого внимания к параметрам и алгоритмам, которые используются для их построения. Для установления и использования в математических моделях надежных зависимостей, для калибровки и верификации моделей (установления их пригодности) принципиальное значение

имеет получение необходимых натурных данных для моделируемого объекта. Одной из основных сложностей при математическом моделировании течений в речных руслах и поймах, деформаций речных русел и транспорта наносов в реках является моделирование гидравлических сопротивлений размываемых русел. В настоящее время для описания гидравлических сопротивлений в речной гидравлике используют такие показатели, как коэффициент Шези, коэффициент шероховатости и коэффициент Дарси, с помощью которых пытаются в недифференцированном виде выразить всю совокупность русловых сопротивлений.

Примером полной зависимости результатов математического моделирования от физических методов исследований может служить работа аргентинского исследователя Х. Прендеса, который в связи со строительством гидроузла на р. Паране и водохранилища Чепетон выполнил математическое моделирование трансформации морфологии русла в нижнем бьефе этого гидроузла. Средний многолетний расход воды в реке на этом участке в естественных условиях составляет $16\ 000\ м^3/с$, а средняя крупность донных отложений - 0,30 мм (0,12-1,00 мм). В математической модели для прогноза характеристик общего размыва русла и трансформации водной поверхности потока на участке реки длиной 55 км через 25 лет после ввода в строй гидроузла, были использованы различные формулы для расчета расхода донных наносов (Г.И. Шамова, К.Н. Россинского, Ф. Енгелунда, Ф. Тофалетти, Е. Мейер-Петера).

На рис. 3 представлены результаты расчетов трансформации русла р. Парана по одной и той же одномерной математической модели Прендеса при использовании перечисленных выше формул. Как следует из рисунка, использование в этой модели формулы Шамова, наиболее распространенной в СССР, дало максимальную величину размыва в нижнем бьефе всего 1,0 м и максимальную величину намыва дна 2,2 м в створе, удаленном от плотины на 27 км, тогда как использование наиболее популярной на западе формулы Мейэр – Петера дало величину наибольшего размыва 9,2 м. Намыв в том же створе, в 27

км ниже плотины, составил 6,1 м. Расчетные величины понижения уровня воды в нижнем бьефе при расходе воды 16 000 м³/с за прогнозируемый период при использовании формул Шамова и Мейэр - Петера составили соответственно 0,36 и 0,85 м.

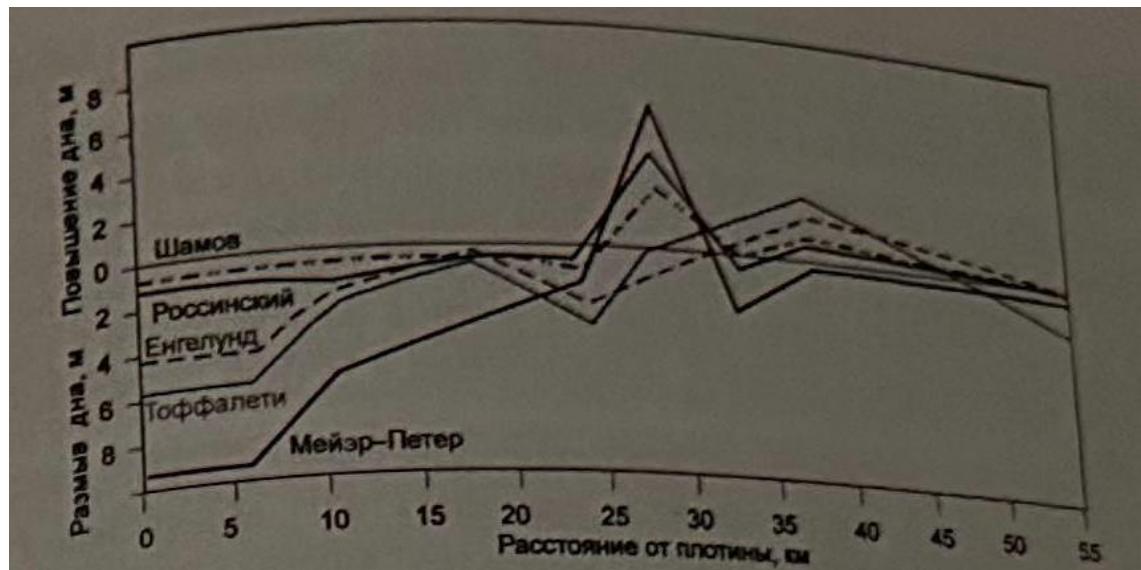


Рис.3 Прогноз формирования русла в нижнем бьефе плотины Чепетон на р. Паране, согласно математической модели Х. Прендеса

Приведенный пример показывает, что добиться однозначности в подобных математических моделях возможно только на основе более детального физического анализа формул, используемых для расчета расхода донных наносов и проведения тщательных натурных исследований.

Современные математические (компьютерные) модели, предназначенные для описания течений в реках, прогнозирования русловых деформаций и т.д. продолжают традиции советской научной школы, и для них характерны те ограничения и недостатки, о которых шла речь выше: чрезмерно упрощенный способ задания гидравлических сопротивлений «подбором коэффициента шероховатости», неопределенности при выборе расчетных зависимостей для оценки расхода и стока донных наносов в моделях трансформации речного русла, упрощения и искажения реальных физических процессов при их одномерной и двухмерной схематизации и реализации в компьютерных моделях.

Авторы «Экспериментальных исследований и гидравлического моделирования речных потоков и руслового процесса» А.Б. Клавен и З.Д. Копалиани считают, что математические методы в едином комплексе с физическими методами в ближайшие десятилетия будут играть все более заметную, но все же подчиненную роль по отношению к физическим методам исследований, до того момента, пока не будет математических уравнений, адекватно описывающих русловой процесс.

Глава 4. Экспериментальная часть

Практическая часть работы была направлена на экспериментальную проверку поведения русла реки при изменении площади поперечного сечения, а также построение математической модели на основе полученных данных. Целью эксперимента стало получение навыков лабораторного моделирования.

Исследование проводилось на экспериментальной установке кафедры «Водно-технических изысканий». Она состояла из лотка длиной 4,9 м и шириной 0,63 м, в котором была смоделирована ситуация сужения русла потока. Поверх установки расположена передвигающаяся тележка, на которой монтируются приборы для измерения отметок свободной поверхности, значений и направлений скорости течения. На бортах искусственного русла нанесены пронумерованные створы, на которых во время опыта производились измерения гидравлических элементов. Створы по длине лотка нанесены равномерно через каждые 1,5 метра. До сужения русла измерения проводились на пяти вертикалях, а уже после сужения русла (т.е. установки кирпичей размером $25 \times 12 \times 6,5$ см по боковым частям лотка (Прил. В, рис. В1) данные снимались только на створах № 2,3,4. Также были заданы условия: движение потока турбулентное, установившееся, вода подавалась с таким расчетом, чтобы в лотке установилась глубина $\approx 0,05$ м.

Сначала производились нивелировка рельефа свободной поверхности и измерение глубин во всех створах. Эти работы выполнялись с помощью шпицемасштаба, который перемещается с помощью тележки. Отметки свободной поверхности снимались на всех вертикалях каждого створа, а глубины (h) в трех – (у бортов h л. б., п. б. и посередине h ц.) (Табл. 4.1-4.3). По этим данным был рассчитан уровень воды на каждой вертикали (Табл. 4.4-4.6), и построены профили уровня воды на каждом створе до и после сужения русла (Рис. 4.1-4.3). Для демонстрации изменения уровня был построен График распределения уровня по его средним значениям на каждом створе по длине потока (Рис.4.4).

Измерения скорости производились с помощью микровертушки ГМЦМ-1 (Прил. В, рис. В2)). По результатам измерений, представленных в таблицах 4.7-4.9, были построены эпюры распределения скоростей потока (Рис. 4.5-4.7).

Также для демонстрации изменения скорости был построен график распределения скорости по ее средним значениям на каждом створе по длине потока (Рис. 4.8).

| Отметки свободной поверхности, см | | |
|-----------------------------------|------------|---------------|
| № скоростной вертикали | До сужения | После сужения |
| 1 | 16,9 | 14,3 |
| 2 | 17,0 | 14,4 |
| 3 | 17,1 | 14,5 |
| 4 | 17,3 | 14,6 |
| 5 | 17,3 | 14,8 |

Табл. 4.1 Отметки свободной поверхности I створа

| Отметки свободной поверхности, см | | |
|-----------------------------------|------------|---------------|
| № скоростной вертикали | До сужения | После сужения |
| 2 | 16,5 | 14,3 |
| 3 | 16,6 | 14,6 |
| 4 | 16,8 | 14,7 |

Табл. 4.2 Отметки свободной поверхности II створа

| Отметки свободной поверхности, см | | |
|-----------------------------------|---------------|---------------|
| № скоростной вертикали | До сужения | После сужения |
| 1 | 16,8 | 14,1 |
| 2 | 17,0 | 14,3 |
| 3 | 17,2 | 14,5 |
| 4 | 17,2 | 14,6 |
| 5 | 17,6 | 14,7 |

Табл. 4.3 Отметки свободной поверхности III створа

| До сужения | | После сужения | |
|------------------------|-------------|------------------------|-------------|
| Отметка по глубине, см | Уровень, см | Отметка по глубине, см | Уровень, см |
| 12,3 | 4,6 | 11,9 | 2,4 |
| 12,2 | 4,9 | 12,3 | 2,2 |
| 12,6 | 4,7 | 12,2 | 2,6 |
| Ср. значение | 4,8 | | 2,4 |

Табл. 4.4 Отметки уровня воды по створу I

| До сужения | | После сужения | |
|------------------------|-------------|------------------------|-------------|
| Отметка по глубине, см | Уровень, см | Отметка по глубине, см | Уровень, см |
| 11 | 5,5 | 9,8 | 4,5 |
| 12,7 | 3,9 | 9,6 | 5 |
| 13,5 | 3,3 | 9,7 | 5 |
| Ср. значение | 4,2 | | 4,8 |

Табл. 4.5 Распределение уровня воды по створу II

| До сужения | | После сужения | |
|------------------------|-------------|------------------------|-------------|
| Отметка по глубине, см | Уровень, см | Отметка по глубине, см | Уровень, см |
| 10,7 | 6,1 | 11,2 | 2,9 |
| 13,2 | 4 | 9,5 | 5 |
| 14,3 | 3,3 | 14,3 | 0,4 |
| Ср. значение | 4,5 | | 2,8 |

Табл. 4.6 Распределение уровня воды по створу III

| Скорость, м/с | | |
|------------------------------|------------|------------------|
| № скоростной вертикали | До сужения | После сужения |
| 1 | 0,31 | 0,22 |
| 2 | 0,30 | 0,26 |
| 3 | 0,25 | 0,26 |
| 4 | 0,27 | 0,24 |
| 5 | 0,3 | 0,22 |

Табл. 4.7 Результаты измерения скоростей на I створе

| Скорость, м/с | | |
|------------------------------|---------------|------------------|
| № скоростной вертикали | До сужения | После сужения |
| 2 | 0,30 | 0,33 |
| 3 | 0,30 | 0,30 |
| 4 | 0,31 | 0,32 |

Табл. 4.8 Результаты измерения скоростей на II створе

| Скорость, м/с | | |
|------------------------------|---------------|------------------|
| № скоростной вертикали | До сужения | После сужения |
| 1 | 0,31 | 0,28 |
| 2 | 0,29 | 0,30 |
| 3 | 0,26 | 0,33 |
| 4 | 0,29 | 0,24 |
| 5 | 0,32 | 0 |

Табл. 4.9 Результаты измерения скоростей на III створе

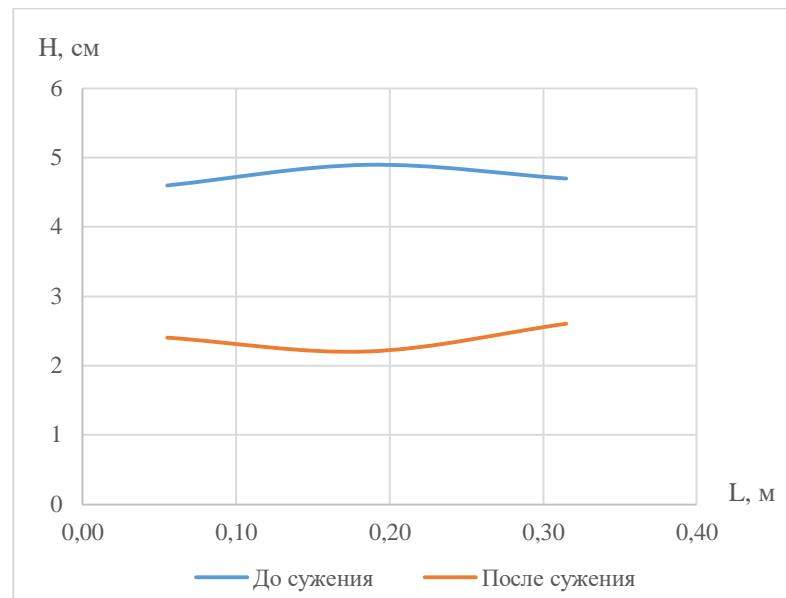


Рис. 4.1 Профиль уровня воды в створе I

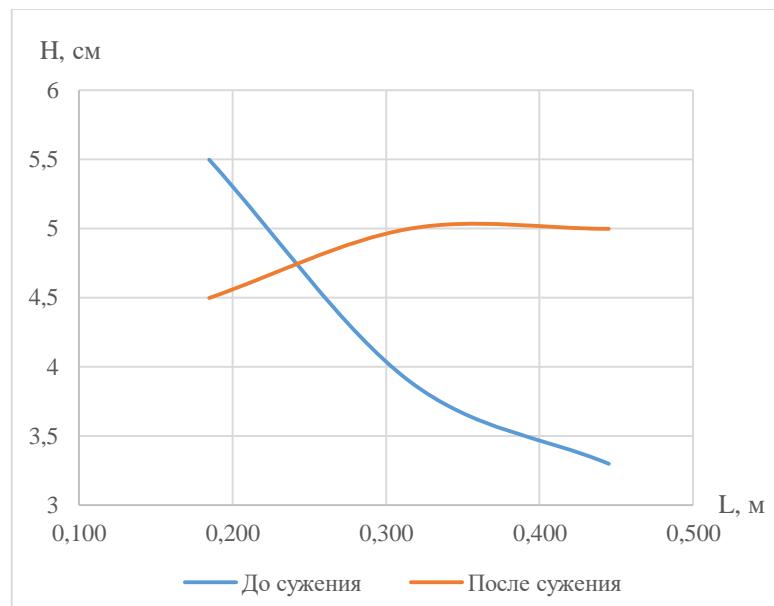


Рис. 4.2 Профиль уровня воды в створе II

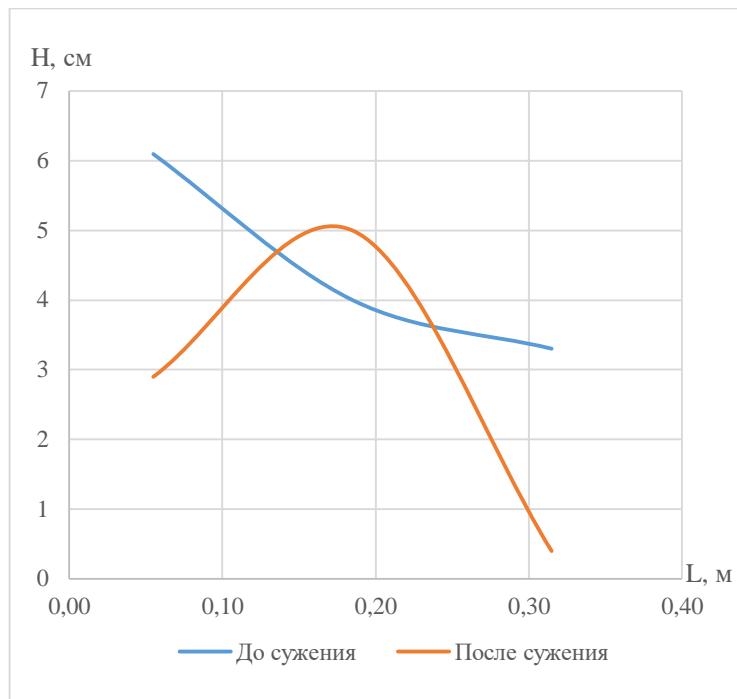


Рис. 4.3 Профиль уровня воды в створе III

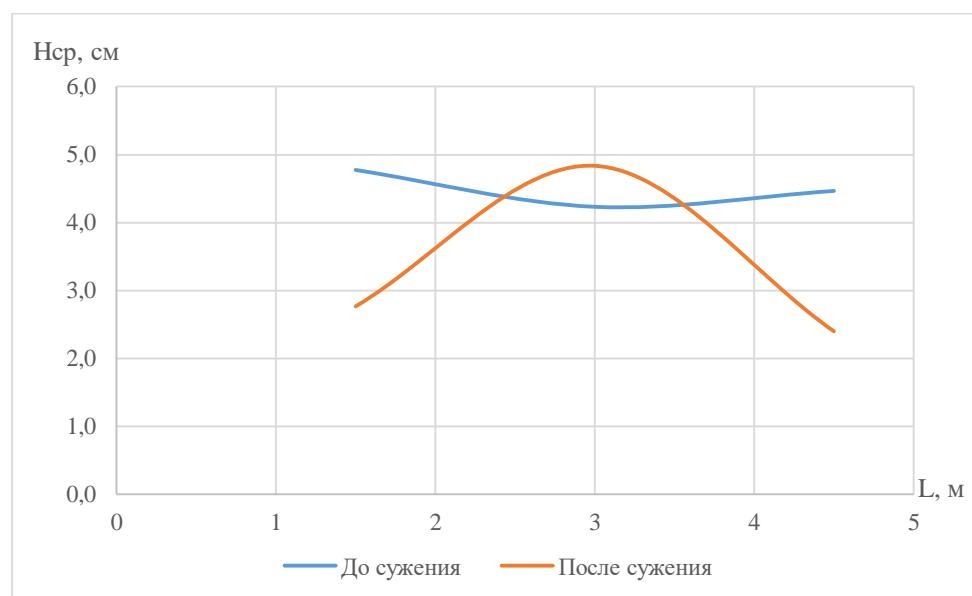


Рис. 4.4 График распределения уровня по его средним значениям на каждом створе по длине потока

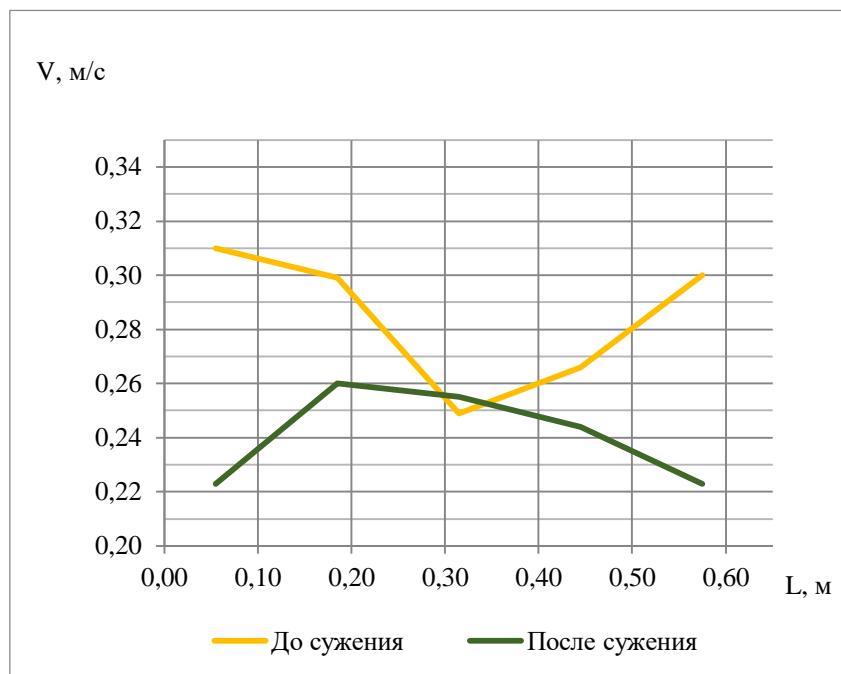


Рис. 4.5 Эпюры распределения скоростей потока на I створе

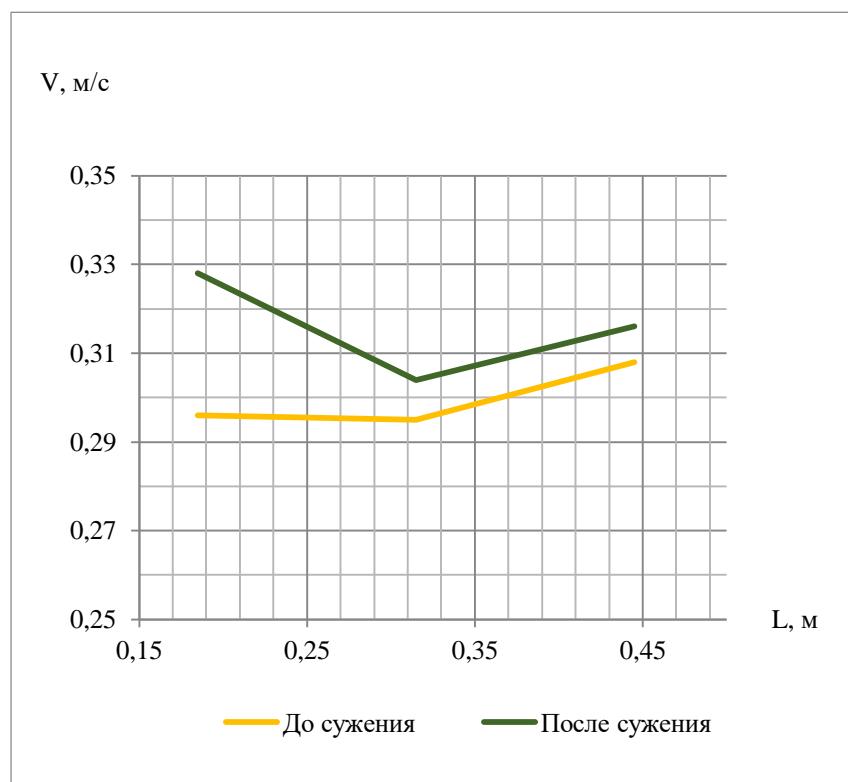


Рис. 4.6 Эпюры распределения скоростей потока на II створе

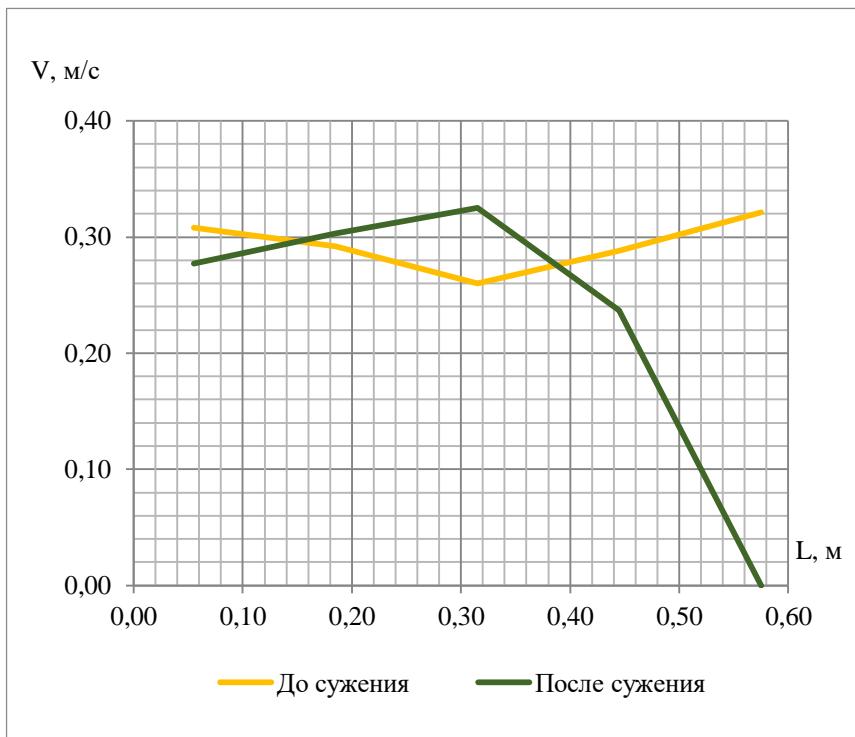


Рис. 4.7 Эпюры распределения скоростей потока на III створе

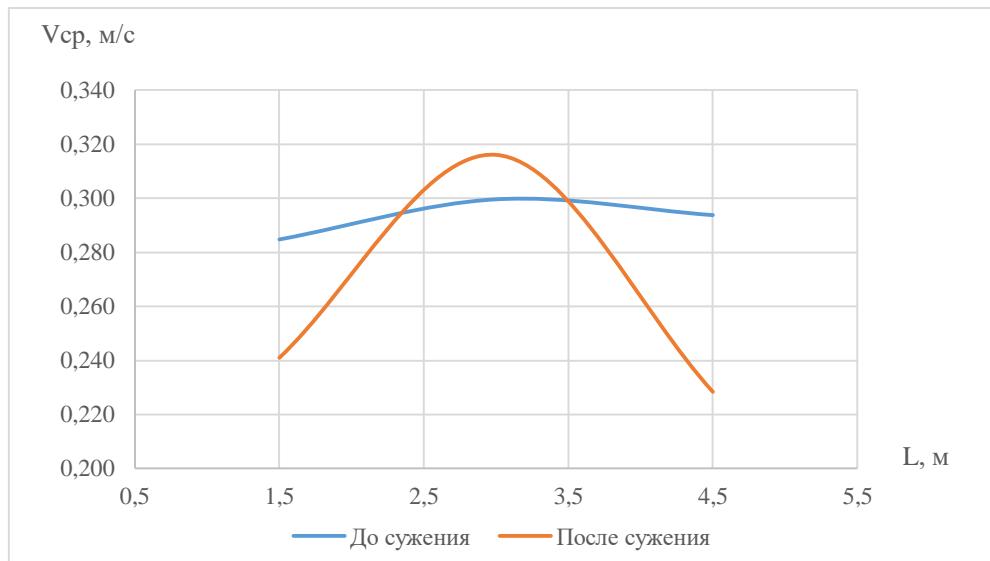


Рис. 4.8 График распределения скорости по ее средним значениям на каждом створе по длине потока

Наблюдая за поведением потока до сужения русла, никаких русловых деформаций не обнаружено. В пределах первого створа наибольшие значения скорости течения зафиксированы в прибрежных зонах, тогда как в осевой части потока наблюдалось незначительное снижение скорости. Такая же ситуация

наблюдалась на втором и третьем створах. Однако после изменения геометрии русла было отмечено изменение структуры потока: наблюдалось увеличение скорости в центральной части и снижение в прибрежных областях. Во втором створе распределение скоростей по ширине створе в целом осталось неизменным, но сами значения скоростей несколько увеличились. Также замечено, что при установке кирпича в этом створе происходит переформирование донных отложений (Прил. В, рис. В3). В третьем створе максимальные скорости стали наблюдаваться в центре потока, произошло смещение русла к левому берегу (Прил. В, рис. В4). Это свидетельствует о том, что в будущем необходимо уточнить и дополнить модель граничными условиями.

Анализируя профили уровней воды в створах, можно заметить, как до стеснения русла на первом створе наибольший уровень зарегистрирован на третьей скоростной вертикали, а уже после сужения на этой же вертикали наблюдался наименьший уровень воды. На втором створе, где как раз и происходило изменение площади поперечного сечения, до ее уменьшения уровень понижался от левого к правому берегу, в то время как после сужения зафиксировано обратное изменение тренда – уровень возрастал в том же направлении. На третьем створе до сужения русла уровень, как и на втором створе уменьшался по мере приближения к правому берегу, а после сужения наблюдался резкий скачок уровня на третьей скоростной вертикали, сопровождаемый резким снижением на четвертой и пятой вертикалях, что приводит к аккумуляции наносов на правом берегу (Прил. В, рис. В4).

В результате анализа профилей средних значений уровней воды по трем створам вдоль направления потока, установлено, что, как и максимальные скорости течения, наибольшие значения уровня воды наблюдались в зоне стеснения русла.

Глава 5. Математическое моделирование скоростного режима потока

В этой главе представлено построение математической модели по результатам лабораторного моделирования.

Математическая модель строилась в программе Simcenter STAR-CCM+. Это программное обеспечение для моделирования на основе вычислительной гидродинамики (CFD), разработанное Siemens Digital Industries Software. Simcenter STAR-CCM+ позволяет моделировать и анализировать целый ряд инженерных задач, связанных с течением жидкости, теплопередачей, напряжением, потоком твердых частиц, электромагнетизмом и связанными с ними явлениями.

Построение математической модели в данной программе осуществлялось в следующем порядке:

Создание геометрии: на этом этапе создавалась геометрическая модель исследуемого лотка (Прил. Г, рис. Г1; Прил. Д, рис. Д1), т.е. объекта моделирования. Следующим этапом стало создание расчетной сетки (Прил. Г, рис. Г2; Прил. Д, рис. Д2) - выбор метода её построения, настройка параметров, проверка качества сетки. Далее задавались граничные условия (вход, выход, стенки, дно) и параметры начальных и граничных условий (скорость потока), физические свойства материалов (плотность, вязкость, теплопроводность и т.д.) и выбирались расчетные модели (жидкость/газ/турбулентный поток/ламинарный и т.д.).

Последним этапом построения стал запуск расчета и вывод результатов (Прил. Г, рис. Г3; Прил. Д, рис. Д3).

Далее была произведена валидация модели, т.е. сравнение результата моделирования с экспериментальными данными (табл. 5).

Проведенное сравнение результатов математической модели с данными лабораторного эксперимента показало их высокую степень соответствия. Полученные значения параметров математической модели согласуются с экспериментальными данными, что подтверждает ее адекватность и

достоверность. Успешная апробация модели свидетельствует о корректности выбранных математических методов, исходных допущений и расчетных алгоритмов.

| Математическая модель | | | |
|--------------------------------|---------|---------|---------|
| Средняя скорость в створе, м/с | | | |
| | Створ 1 | Створ 2 | Створ 3 |
| До сужения | 0,300 | 0,300 | 0,300 |
| После сужения | 0,300 | 0,327 | 0,327 |

| Лабораторная модель | | | |
|--------------------------------|---------|---------|---------|
| Средняя скорость в створе, м/с | | | |
| | Створ 1 | Створ 2 | Створ 3 |
| До сужения | 0,285 | 0,300 | 0,294 |
| После сужения | 0,241 | 0,316 | 0,228 |

Табл. 5 Сравнительная таблица результатов математического и лабораторного моделирования

Заключение

Основная цель работы заключалась в изучении влияния изменения площади поперечного сечения на скоростной режим потока, что имеет важное значение для управления водными ресурсами, предотвращения наводнений и обеспечения безопасности гидротехнических сооружений. В представленной работе проведено исследование скоростных характеристик стока реки Свирь, и выявлена зависимость скорости потока от площади живого сечения.

В процессе написания данной бакалаврской работы были освоены навыки проведения лабораторного и математического моделирования. Лабораторное моделирование позволило изучить поведение потока при сужении русла. Эксперимент показал, что уменьшение площади поперечного сечения приводит к увеличению скорости в центральной части потока и снижению в прибрежных зонах. Наблюдались также изменения уровня воды и формирование побочней, что подтверждает значительное влияние геометрии русла.

Математическое моделирование продемонстрировало высокую степень соответствия с лабораторным моделированием - модель успешно воспроизвела изменения скорости потока. Это подтверждает возможность использования таких моделей для прогнозирования поведения речных систем в реальных условиях.

Метод работы может быть применен для проектирования и эксплуатации гидротехнических сооружений с целью минимизации рисков эрозии и разрушения.

Следует отметить, что лабораторные эксперименты проводились в упрощенных условиях, что может ограничивать их применимость к природным системам с более сложной динамикой. А также для повышения точности моделей рекомендуется расширить набор экспериментальных данных, включая дополнительные параметры, такие как шероховатость русла, турбулентность, градиент давления, вязкость воды, внешнее воздействие и т.д.

Проведенное исследование подтвердило гипотезу о значительном влиянии площади поперечного сечения на скоростные характеристики потока. Сочетание

лабораторного и математического моделирования позволило получить достоверные результаты, которые могут быть использованы для решения практических задач в области гидрологии.

Список литературы

1. Виноградов Ю.Б. Математическое моделирование в гидрологии: учеб. пособие для студ. учреждений высш. проф. образования / Ю. Б. Виноградов, Т.А. Виноградова. — М.: Издательский центр «Академия», 2010. — 304 с.
2. Гагарина Э.И., Матинян Н.Н., Счастная Л.С., Касаткина Г.А. Почвы и почвенный покров Северо-Запада России. СПб., 1995. – 236 с.
3. Гидроэлектростанции России. — М.: Типография Института Гидропроект, 1998. — 467 с.
4. Клавен А.Б., Копалиани З.Д. Экспериментальные исследования и гидравлическое моделирование речных потоков и руслового процесса. – СПб.: Нестор – История, 2011. – 504 с.
5. Коваленко В.В., Викторова Н.В., Гайдукова Е.В. Моделирование гидрологических процессов. Изд. 2-е исправ. и доп. Учебник. – СПб., изд. РГГМУ, 2006. - 559 с.
6. Коваленко В. В., Гайдукова Е. В. Практикум по дисциплине «Моделирование гидрологических процессов. Часть I. Динамические модели» (на базе языка С++). Учебное пособие. - СПб.: изд. РГГМУ, 2010. - 147 с
7. Ресурсы поверхностных вод СССР: Гидрологическая изученность. Т. 2. Карелия и Северо-Запад / под ред. Е. Н. Таракановой. — Л.: Гидрометеоиздат, 1965. — 700 с.
8. Севастьянов Д. В., Субетто Д. А., Сикацкая Е. Д., Степочкина О. Е. Особенности эволюции озерно-речной сети в бассейне Ладожского озера в голоцене // Вестник Санкт-Петербургского университета. Сер. 7. Геология. География.: Журнал. — СПб., 2001. — Вып. 1, № 7. — С. 88—100.
9. <https://www.murmansk.kp.ru/daily/27138/4229615/?ysclid=m38k7w2inu958812396> – [Электронный ресурс] : Интернет-статья.

Приложение А



Рис. А1 Разрушение моста на реке Кола

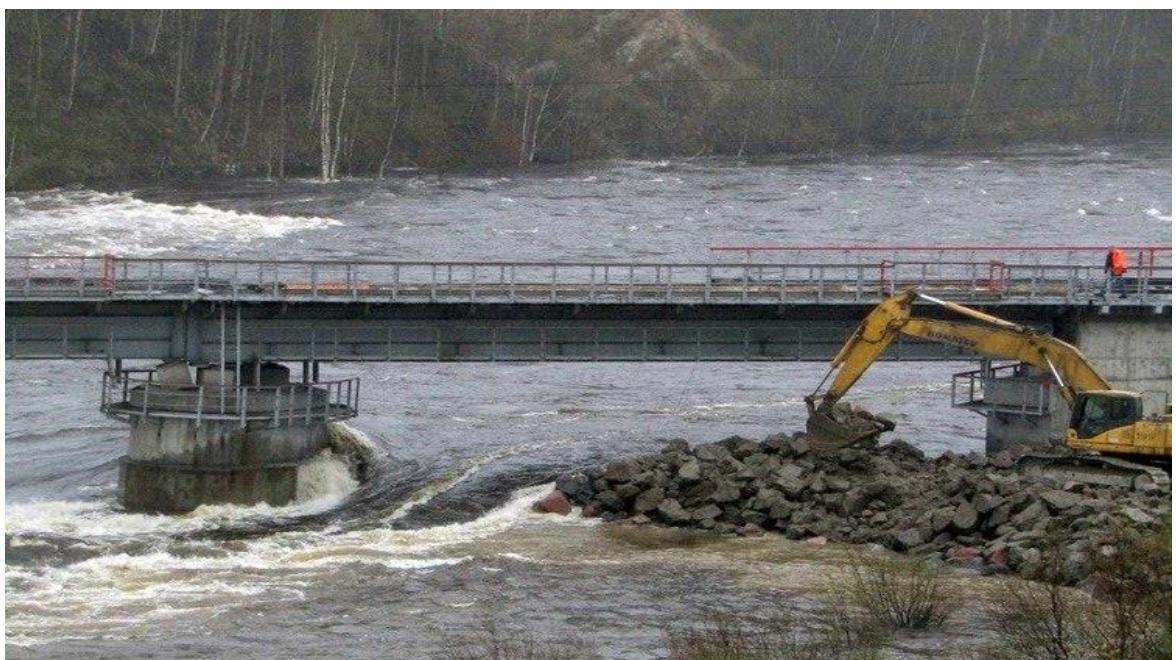


Рис. А2 Сужение русла реки Колы путем отсыпки

Приложение Б

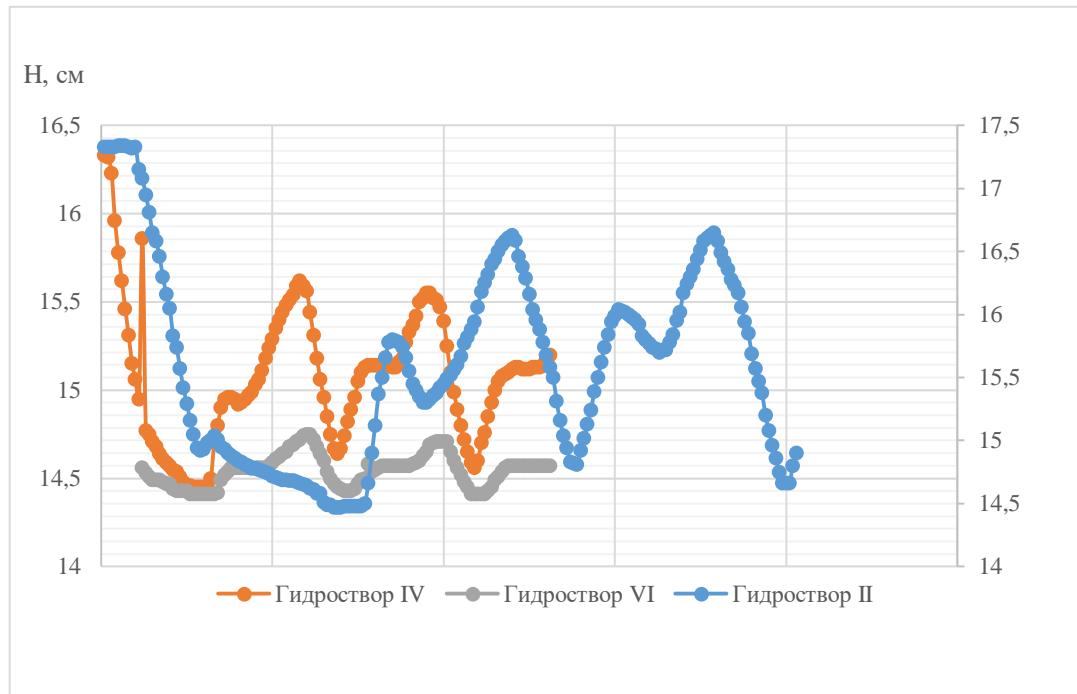


Рис. Б1 График зависимости $H = f(t)$ по трём исследуемым гидростворам

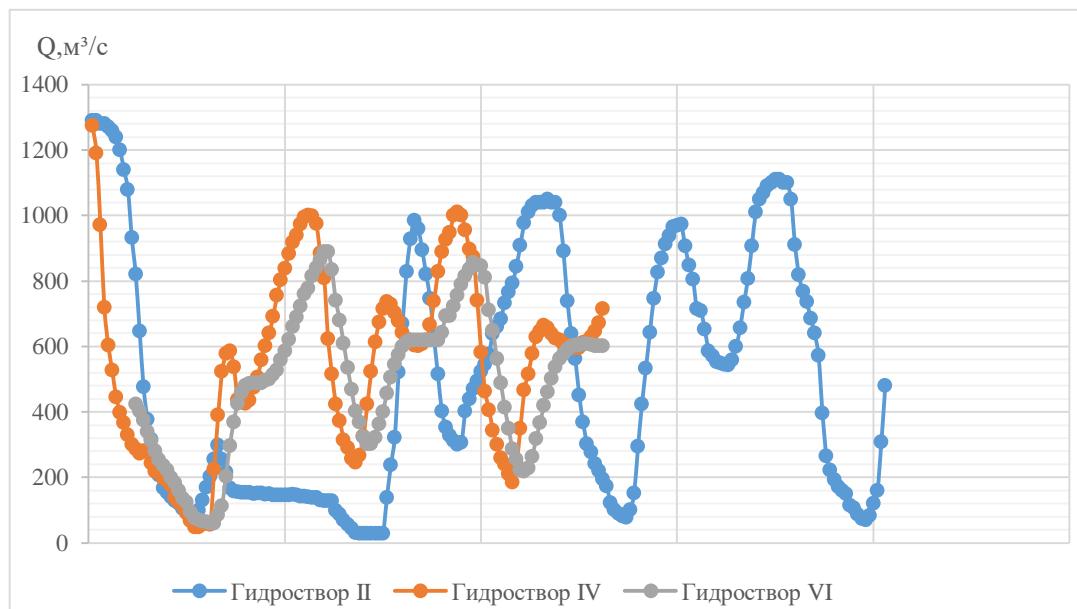


Рис. Б2 Графики зависимости $Q = f(t)$ по трём исследуемым гидростворам

Продолжение приложения Б

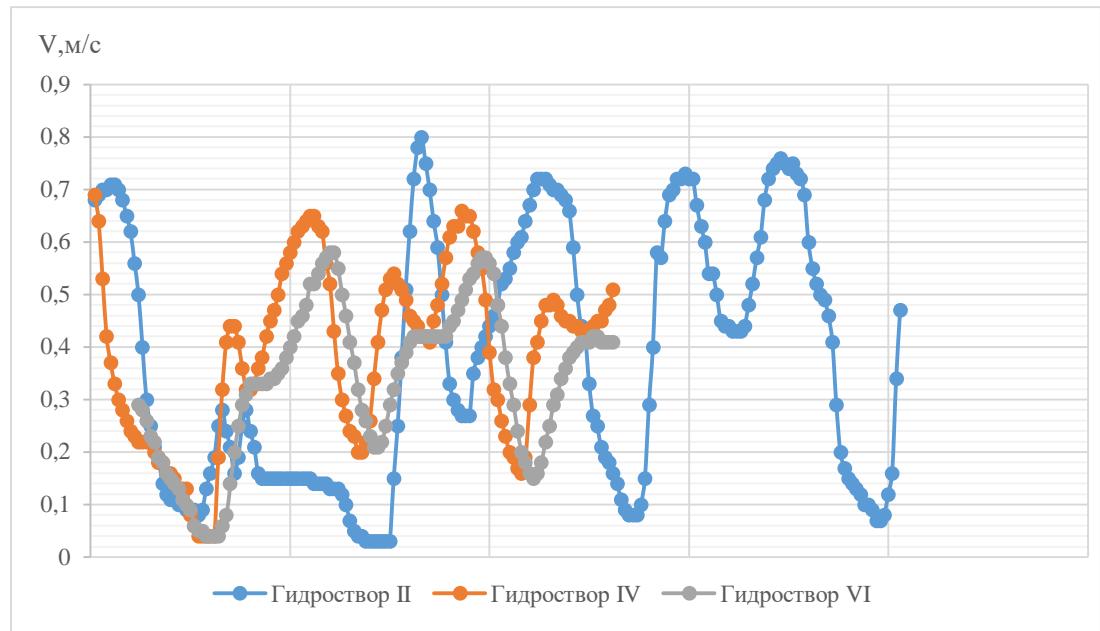


Рис. Б3 Графики зависимости $V = f(t)$ по трём исследуемым гидростворам

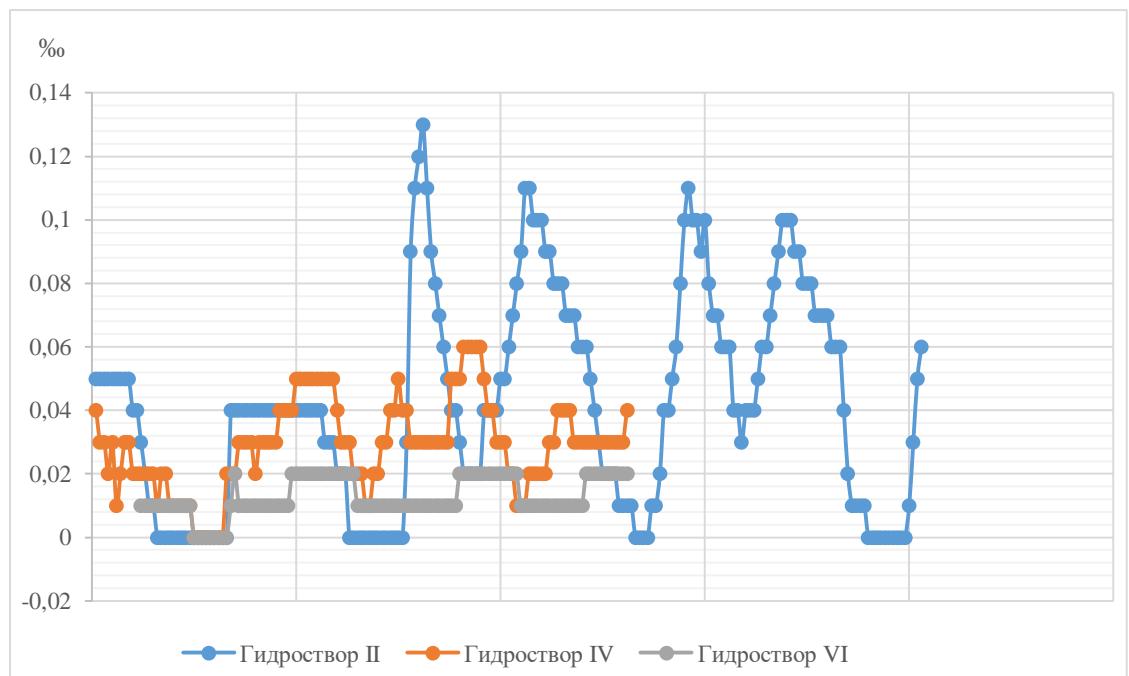


Рис. Б4 Графики зависимости $I = f(t)$ по трём исследуемым гидростворам

Приложение В



Рис. В1 Сужение русла с помощью установки кирпичей



Рис. В2 Измерение скорости потока вертушкой до сужения русла

Продолжение приложения В

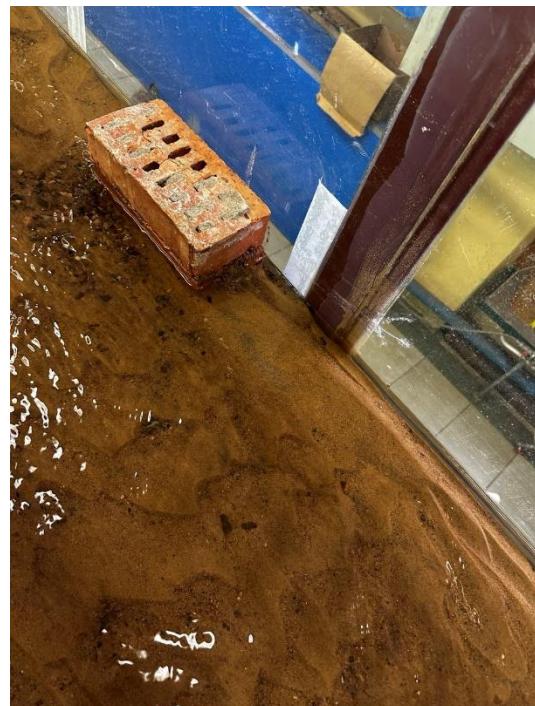


Рис. В3 Переформирование донных отложений после сужения русла



Рис. В4 Смещение русла к левому берегу после сужения русла



- аккумуляция наносов



- вектор направления потока

Приложение Г

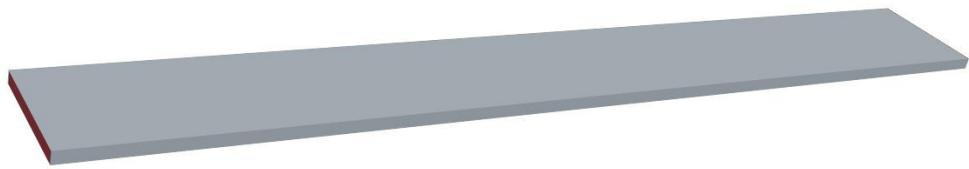


Рис. Г1 Геометрия лотка русла до сужения потока

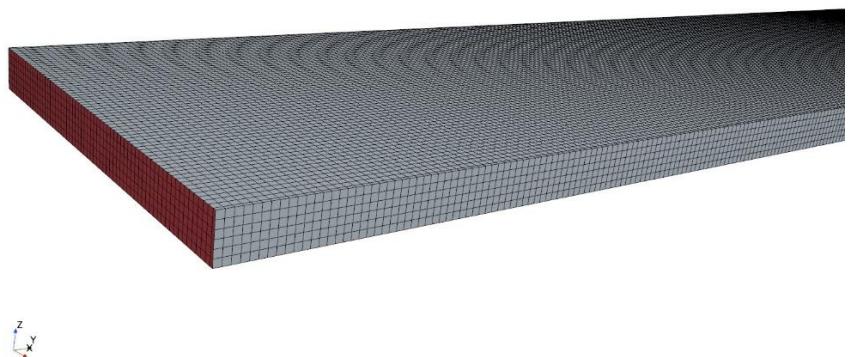


Рис. Г2 Сетка лотка

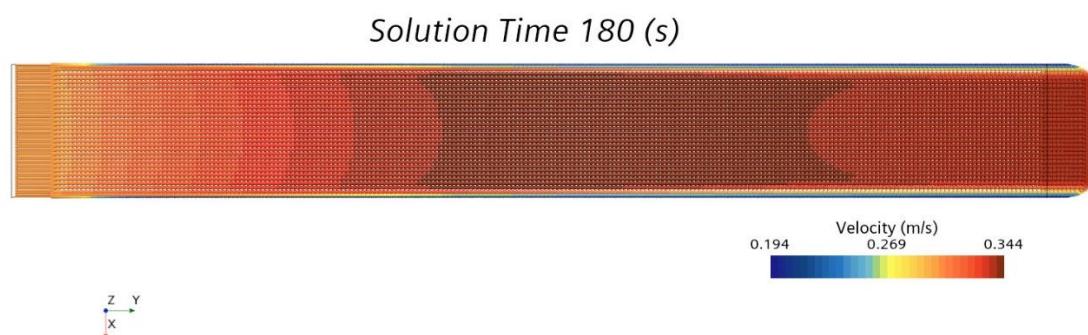


Рис. Г3 Векторное поле скоростей потока до сужения русла

Приложение Д

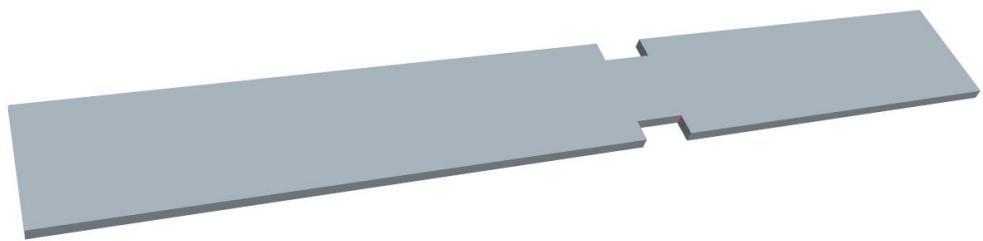


Рис. Д1 Геометрия лотка после сужения русла

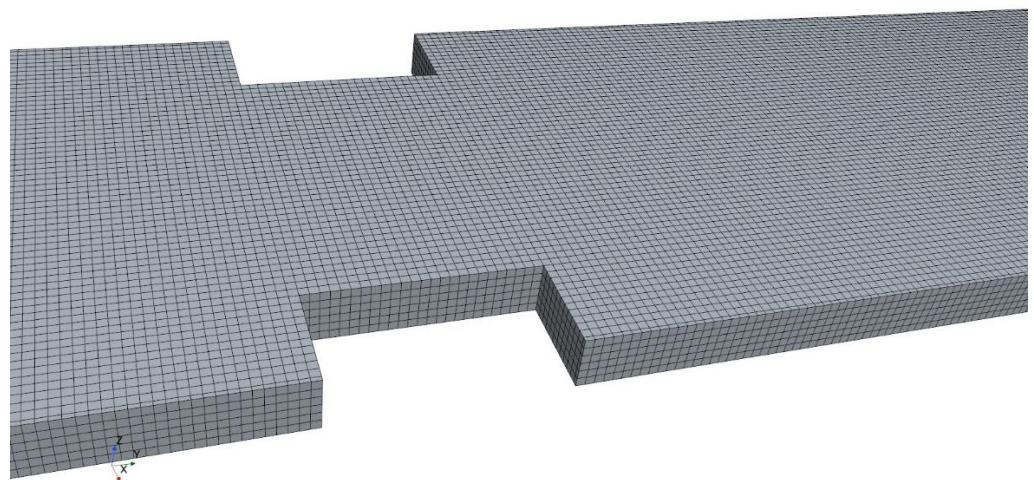


Рис. Д2 Сетка лотка

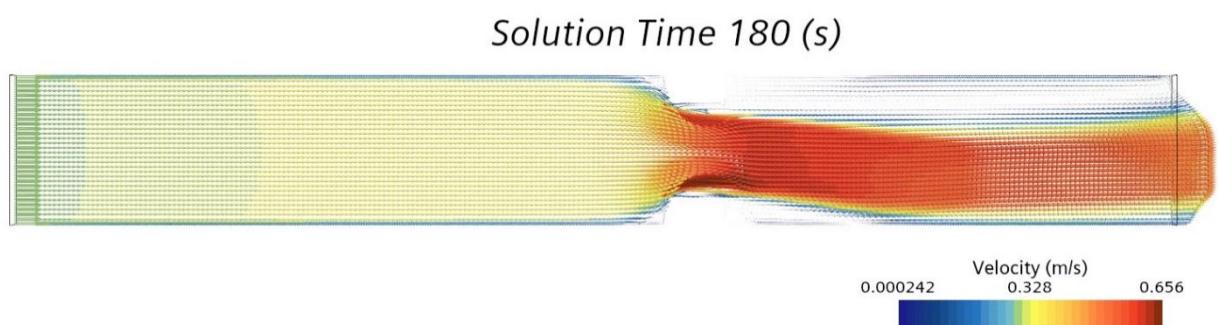


Рис. Д3 Векторное поле скоростей потока после сужения русла