



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

Кафедра Гидрологии суши

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
(бакалаврская работа)

На тему Создание физической модели участка р. Оредеж. Сравнение
результатов, полученных на модели и натурных измерений

Исполнитель Васильев Никита Александрович

Руководитель Доцент

Гаврилов Илья Сергеевич

«К защите допускаю»
Заведующий кафедрой

геогр. наук. Исаев Дмитрий Игоревич

(подпись)

«ИИИ» 2018 г.

Санкт-Петербург
2018

СОДЕРЖАНИЕ.

1 Оглавление

ВВЕДЕНИЕ.....	4
2 1. 1 Физико-географическая характеристика Лен. области.....	5
3 1.1.1 Рельеф.....	5
4 1.1.2 Почвенный покров.....	6
5 1.1.3 Растительность.....	7
6 1.1.4 Гидрология.....	7
7 1.1.5 Климат.....	8
8 1.2 Физико-географическая характеристика Гатчинского района.....	9
9 1.2.1 Рельеф.....	10
10 1.2.2 Гидрология.....	10
11 1.2.3 Климат.....	10
12 2.Физическое моделирование.....	11
13 2.1. Основные понятия теории физического моделирования.....	12
14 3. Создание физической модели участка р. Оредеж.....	14
15 3.1.1. Условия подобия систем с одной преобладающей силы. ..	26
16 3.1.2 Критерий подобия систем, под воздействием сил тяжести.	27
3.2.1 Расчетные формулы для масштабных отношений основных.....	29
17 3.2.2 Масштабные отношения характеристик потока для случая, когда преобладающей является сила тяжести.....	30
18 3.2.3 Масштабные отношения характеристик потока для случая, когда преобладающей является сила трения.....	32
19 3.2.4. Возможности учета единовременного воздействия на поток жидкости различных сил.....	34

20	3.3.1 Ограничительные условия применения законов подобия и правил моделирования.....	37
	3.3.2 Условия совместного действия нескольких сил	38
21	3.3.3 Соответствие режима движения жидкости на модели режиму движения в натуре.....	41
22	3.3.4. Соответствие состояния потока на модели (спокойное или бурное) состоянию его в натуре	42
23	3.3.5. Условия подобия подвижности наносов	43
24	3.3.6. Условия подобия шероховатости	44
25	3.3.7. Условия отсутствия кавитации.....	46
26	3.3.8. Расчет моделей речных русел с неразмываемым ложем...	47
27	3.3.9. Моделирование движения потока в открытом русле с искажением масштабов.	53
28	3.3.10. Моделирование речных русел с размываемым ложем....	56
	4.1 результаты моделирования.....	60
	4.2 Вывод из сравнения полученных данных.....	65
	Заключение	66

ВВЕДЕНИЕ.

Моделирование - исследование какого-либо явления путем построения и изучения модели («заместителя», «схемы» или «представителя») оригинала («прототипа», «натурного объекта»). Моделирование - одна из основных категорий теории познания (гносеологии, от греч. «гносис» — познание, «логос» - слово, понятие, сущность). Это любой метод научного исследования: теоретический или экспериментальный. Математическое моделирование - исследование явления на схеме оригинала («прототипа», «натурного объекта») с помощью математического описания физических законов, действующих на схеме. Физическое моделирование - исследование явления путем построения и изучения физической модели оригинала («прототипа», «натурного объекта»), выполняемые на основе принципов теории подобия и размерностей.

Математические уравнения, описывающие физические законы, представляют собой математические модели физических явлений, так как эти уравнения описывают не реальные явления, а их схематизацию - модель. Степень приближения модели к действительности зависит от уровня развития науки и техники. В ряде случаев решение практических задач сопряжено с непреодолимыми математическими трудностями. Часто математическая постановка задачи вообще отсутствует, так как исследуемое явление настолько сложно, что для него пока еще нет удовлетворительной схематизации. Тогда главную роль играют экспериментальные методы исследований.

1. Физико – географическая характеристика.

2 1. 1 Физико-географическая характеристика Лен. области

Ленинградская область расположена на северо – западной части Европейской территории России и является частью Русской равнины. На севере граничит с Республикой Карелия, на юге – с Новгородской и Псковской областями; на востоке – с Вологодской областью, на западе – с Эстонией, на северо-западе – с Финляндией. Омывается такими озерами как: Ладожское, Онежское, Финским заливом и Балтийским морем.

Область занимает площадь 85. 9 тысяч километров и простирается с севера на юг на 100 – 325 км, а с запада на восток – 446 км.

3 1.1.1 Рельеф

Часть данной территории делится на: северо-западную – неизменную и восточную, юго-восточную и южную- возвышенную. Северо- западная часть расположена по большей части в пределах Прибалтийской низменности.

Прибалтийская низменность – достаточно монотонная слабоволнистая равнина, особенностью которой является ряд возвышенностей и понижений.

Северо – Западная часть территории расположена в пределах Валдайской возвышенности, которая широкой дугой окантовывает Прибалтийскую низменность и простирается от восточного берега Онежского озера до города Великие Луки, сообщаясь далее с границами территорий Белоруссии и Литвы.

Преобладающий равнинный характер данной территории также местами не соблюдается из-за таких холмистых возвышенностей как:

Вепсовская возвышенность, Тихвинская гряда, Лемболовские и Токсовские высоты.

Территория Северо-Запада расположена по большей части в границах Русской платформы и сформирована совокупностью осадочных дочетвертичных отложений, залегающих под четвертичными на архейском или протерозойском кристаллическом фундаменте. Только самая северная окраина территории – коим является север Карельского перешейка- и так же относится к южной окраине Балтийского щита и сформирована из древнейших кристаллических пород архейско-протерозойского комплекса, сложенного из различного рода гнейса и сланцев.

Значительную часть площади данной территории занимают низменности с малыми абсолютными высотами (Волховская и Приильменная низины), густой гидрологической сетью, большим количеством озер и болот. Ордовикское плато, западная часть которого имеет название Ижорской возвышенности, восточная – Путиловское плато, которое резко поднимается к югу от монотонно низменного побережья Финского залива.

4 1.1.2 Почвенный покров

Почвенный покров Ленинградской области является очень разнообразным, что имеет прямую связь с особенностями рельефа и пород формирующих почву, различными условиями увлажнения, стока атмосферных вод и уровня стояния грунтовых вод. Основными процессами почвообразования являются подзолообразование и заболачивание, что выражено положением территории в зоне с морозным, насыщенном влагой климате, а также преобладающей лесной, преимущественно хвойной растительностью.

Значительную часть земель данной территории составляют песчаные и суглинистые подзолистые почвы, зачастую завалуненные. Особую группу представляют дерново-карбонатные почвы.

Глубина промерзания почвы во многом зависит от рельефа местности, а также от интенсивности нарастания минусовых температур воздуха и наличия снежного и покрова растительности, механического состава почвы и ее степени увлажнения.

Оттаивание почвы, как правило, происходит сверху и протекает сначала медленно, до стаивания снежного покрова, а затем процесс ускоряется под влиянием солнечных лучей, на болотах почва может оставаться промерзшей и летом.

5 1.1.3 Растительность

Ленинградская область располагается преимущественно в зоне тайги. Большая часть территории области находится в пределах области подзоны южной тайги, северо-восток – в области подзоны средней тайги. Растительность некоторых юго-западных районов по своему характеру расположения принадлежит к подзоне хвойно-широколиственных лесов.

Леса занимают большую часть территории области. Состав местных лесов представлен главным образом мелколиственными породами: березой, сосной, ольхой. Наибольшая лесистость наблюдается на севере и северо-востоке области. Значительную часть территории занимают болота, луговая растительность занимает до 10% площади, преобладают суходольные луга.

6 1.1.4 Гидрология

Водные объекты на местности распределяются в зависимости от рельефа и геологического строения. Озера занимают около 15%, болота – около 18% местности. Большая часть озер ледникового происхождения, они сконцентрированы в восточной холмистой части области, в северной части Карельского перешейка. Маленький участок Финского залива входит в состав Ленинградской области на западе. Речная сеть области густая и разветвленная. Исключением считается Ордовикское плато, где дождевые и талые воды поглощаются карстовыми воронками, поэтому реки здесь отсутствуют. Наиболее крупные реки – Нева, Свирь, Волхов, Вуокса, Луга.

Самая полноводная из них считается река Нева. Имеется несколько тысяч малых рек. В питании рек Ленинградской области преобладают осадки в виде снега: их доля от общего стока составляет около 60%; на дожди приходится 20%, 10% дают грунтовые и подземные воды.

7 1.1.5 Климат

Климат Ленинградской области атлантико-континентальный, характеризуется умеренно-прохладной зимой и нежарким влажным летом. Весна и осень носят затяжной характер. Частая смена морских и континентальных, арктических воздушных масс, активная циклоническая деятельность обуславливают неустойчивый и изменчивый характер погоды во все сезоны. Переход от сезона к сезону постепенный.

Зима мягкая, однако длительная, наступает с образования устойчивого снежного покрова во второй половине ноября (восточные районы) – в первой декаде декабря (западные районы). Наиболее мягкой и неустойчивой бывает первая половина зимы, в особенности на западе области. С продвижением на восток зима становится более резкой, а в северно-восточных районах приобретает черты суровости. За зиму отмечается до 25 дней с оттепелью, наибольшая их повторяемость (10 – 12 дней) наблюдается в декабре.

Снежный покров держится 100 – 150 дней, его средняя высота достигает максимальных значений в феврале. На полевых участках она составляет от 25 -30 см в западных районах до 40 – 50 см – в восточных.

Теплый период наступает в первой декаде апреля и длится до конца октября – начала ноября (200 – 220 дней). Повышение температуры воздуха от 0 до +10 °С весной происходит за 40 дней. Продолжительность периода снеготаяния 12 – 23 дня, почва полностью оттаивает к началу мая. Осенью падение температуры от +10 до 0 °С происходит за 1. 5 месяца. Весенние

заморозки возможны до конца мая – первой декады июня, осенние начинаются обычно в первой декаде сентября.

Одним из самых теплых месяцев года является июль (средняя температура воздуха $+16^{\circ}\text{C}$). Самым холодным месяцем в западных районах является февраль (средняя температура воздуха -9°C), на остальной территории – январь (-11°C).

Рассматриваемая территория относится к зоне избыточного увлажнения. Этого объясняется сравнительно небольшим переходом тепла и хорошо развитой здесь циклонической деятельностью, которая активно проявляется во все сезоны года.

На распределение осадков большое влияние оказывает орографические особенности местности и подстилающей поверхности, ведущие к нарушению осадков. В среднем в год на большей части рассматриваемых районов выпадает 550-750 мм осадков.

На территории области преобладают ветры юго-западных и западных направлений, несущие влажный воздух атлантического происхождения. Скорость ветра в зимние месяцы составляет 3.5 – 4.0 м/с, на побережьях водоемов увеличивается до 5.5 – 6.0 м/с. Сильные ветры (15 м/с и более) отмечаются преимущественно в холодный период. На большей части территории бывает до 10 – 15 дней в году с такими ветрами; в прибрежных районах – до 20 - 25 дней.

8 1.2 Физико-географическая характеристика Гатчинского района

Гатчинский район расположен на северо-западе европейской части России и входит в состав Ленинградской области (Приложение А. 1). На северо-востоке граничит с городом Санкт – Петербургом, на востоке – с Тосненским районом, на юге – с Лужским, на западе – с Волосовским, на северо-западе – с Ломоносовским. Район занимает площадь 2.94 тыс. км², что составляет 3.45% от площади всей области.

9 1.2.1 Рельеф

Большая часть территории района расположена на Лужско – Оредежской возвышенности. Высоты (до 100 м) имеют здесь очень плавные перепады. В целом для территории района характерен полого – холмистый равнинный рельеф. Ярко выраженные возвышенные ландшафты преобладают лишь на северо-западе, где в пределы района входит восточная часть Ижорской возвышенности. Для этой территории характерны краевые моренные гряды и холмы.

Геологические отложения ордовикского периода преобладают в северной части района, а в южной – девонского. В основном, они покрыты слоем ледниковых отложений четвертичного периода. Исключение составляют берега реки Оредеж, где девонские породы выходят прямо на поверхность.

10 1.2.2 Гидрология

По территории района протекает множество рек, крупнейшими из которых являются Ижора и Оредеж.

Река Оредеж является притоком реки Луга. Ее длина составляет 200 км, ширина реки меняется от 15 до 30 м, средняя глубина 1.0 – 1.5 м. Берет начало из Кикеренских болот близ деревни Донцо. Общая площадь водосбора 3400 км². Замерзает в декабре, вскрывается в апреле.

Крупнейшими озерами района являются Вялье и Орлинское. Большая часть территории района, особенно в юго-восточной части, заболочена.

11 1.2.3 Климат

Климат района атлантико-континентальный. Морские воздушные массы объясняют сравнительно мягкую зиму с частыми оттепелями и умеренно-теплое, а временами временами прохладное лето. Средняя температура января -8 °С, июля +17 °С. Годовое количество осадков 650 – 700 мм, в зимний период выпадают преимущественно в виде снега. Преобладают западные и южные ветры. Весной и летом наблюдается

явление белых ночей. Минимальная зарегистрированная температура составляет -44°C , максимальная $+34^{\circ}\text{C}$.

12 2. Физическое моделирование.

Данная работа посвящена физическому моделированию явлений. Если говорить об основе физического моделирования - методах подобия и размерностей, - то наиболее общими из них являются последние. Теория подобия исходит из того, что математические уравнения, описывающие изучаемый процесс, известны; на основе анализа этих уравнений выносятся суждения об основных законах подобия. Теория размерностей, располагая более совершенным математическим аппаратом, при формулировании этих законов обходится без математических уравнений. При этом необходимо знать только параметры (в том числе физические константы), влияющие на процесс. Однако в этом таится большая опасность недоучета того или иного существенного фактора, что повлечет за собой искажение и обесценивание результатов экспериментального исследования.

Наконец, существует еще один путь отыскания законов подобия - это метод соотношения сил, действующих в системах («динамическое» подобие), который связывают с именем Ньютона. Для его применения необходимо знать действующие силы и Их размерности. Соотношения этих сил дают некоторые безразмерные комбинации, играющие огромную роль в методах подобия и размерностей, которые носят название чисел подобия. Ниже приводится описание всех трех методов.

С другой стороны, существующие пробелы при изучении курса высшей математики в этих направлениях и специальностях создают трудности с освоением метода размерностей. В этих условиях остается единственная возможность познания основ физического моделирования явлений, которая связана с методом соотношения сил Ньютона. Но все отмеченные методы теории физического моделирования не существуют в полной изоляции друг от друга, поэтому для освоения метода соотношения сил Ньютон потребуются знания основных положений методов теории

подобия и размерностей. Так из метода подобия это такие понятия, как подобие, характерная и безразмерная величины. Из метода размерностей - это величины, имеющие независимые размерности, л - теорема (формулировка и выводы, опуская доказательство). В методах комбинаций чисел подобия и фрагментов можно ограничиться только формулировками соответствующих теорем, сосредоточив основное внимание на следствиях из этих теорем. Следуя указанным путем, можно освоить объем знаний, необходимый для решения прикладных задач в области физического моделирования гидравлических явлений, прочно увязанный с методами физического моделирования в целом.

13 2.1. Основные понятия теории физического моделирования

Моделирование предполагает исследование свойств оригинала посредством изучения свойств его модели, более удобной для решения задачи исследования и находящейся с оригиналом в определенном соотношении. Основная задача моделирования - по результатам исследования модели дать заключение о характере протекания процессов в оригинале и о внутренних связях между параметрами, определяющими эти процессы. Моделирование включает в себя построение модели, изучение ее и перенос полученных сведений на оригинал. Перенос сведений возможен только при существовании взаимно однозначного соотношения между оригиналом и моделью, которое называется подобием.

Под оригиналом понимается объект, свойства которого подлежат изучению методом моделирования. Понятие «оригинал» имеет широкую интерпретацию: это естественные и искусственные объекты, различные явления и процессы, в них протекающие. Под явлением понимается совокупность процессов, характеризующих функционирование объекта, проявляющихся в виде изменения состояний и режимов работы.

Изменение состояния или режима работы в пространстве и во времени определяется некоторыми показателями, которые называются параметрами. Следовательно, процесс понимается как закономерное изменение в пространстве и во времени одних параметров относительно группы других независимых параметров. Пример из области гидротехники: объект - водосливная плотина, явление - сопряжение бьефов; процесс - изменение второй сопряженной глубины гидравлического прыжка в плоских условиях в зависимости от перепада уровней между верхним и нижним бьефами и от удельного расхода воды на гребне водослива. В строительном деле вместо слова «оригинал» чаще всего употребляется слово «натура».

Под моделью понимается вспомогательный объект, имеющий некоторые идентичные черты с оригиналом, отражающий отдельные особенности поведения оригинала и служащий для получения такой информации о нем, которую затруднительно или вообще невозможно получить путем непосредственного изучения оригинала. Например, на оригинале (в натуре), каким является мостовая опора, практически невозможно изучить в явлении местного размыва русла процесс изменения во времени глубины воронки размыва при прохождении волны паводка. На модели такая задача легко реализуется.

В общем случае понятие «модель» довольно широкое: это и специально созданная экспериментальная установка, и символическое описание оригинала (чертеж, схема), и математическое уравнение, и иной условный образ, который находится в определенном соответствии с изучаемым объектом - оригиналом, а именно: подобен ему.

Следует отметить особенность модели: она всегда конкретна; для нее всегда имеется адекватная физическая реальность; моделей самих по себе в отрыве от этой реальности не существует [9]. Основная задача модели - прогноз по результатам моделирования поведения оригинала в ситуациях, отличных от тех, на основании которых была построена модель. Естественно, должны быть установлены правила переноса этих результатов

с модели на натуру, в основе которых лежат законы перехода от параметров, характеризующих модель, к параметрам природы.

Понятие «подобие» допускает широкое трактование. Наиболее простое и понятное - это геометрическое подобие. В простейшем случае речь идет о подобии многоугольников с одинаковым числом сторон, и в частности, для треугольников теорема звучит так: треугольники подобны, если у них соответственные углы равны, а сходственные стороны пропорциональны.

14 3. Создание физической модели участка р. Оредеж

Создание физической модели участка р. Оредеж в районе базы практики РГГМУ занимались студенты всех курсов гидрологического факультета РГГМУ.

Для создания гидравлической модели участка р. Оредеж на русловой площадке, расположенной в учебной лаборатории водных исследований кафедры гидрометрии использовались различные приемы и технологии. В первую очередь использовался программный комплекс Autodesk AutoCAD. Первым делом была нарисована русловая площадка в различных масштабах 1:50, 1:75, 1:100, и помещен на нее ортофотоплан участка реки Оредеж. Это было сделано для определения оптимального масштаба, при котором в русловую площадку помещается весь выбранный участок реки, а получаемая ширина русла могла бы позволить производить различные эксперименты на модели. Примеры выбора масштабов с ширинами русла приведены на рисунках 3.1-3.3.

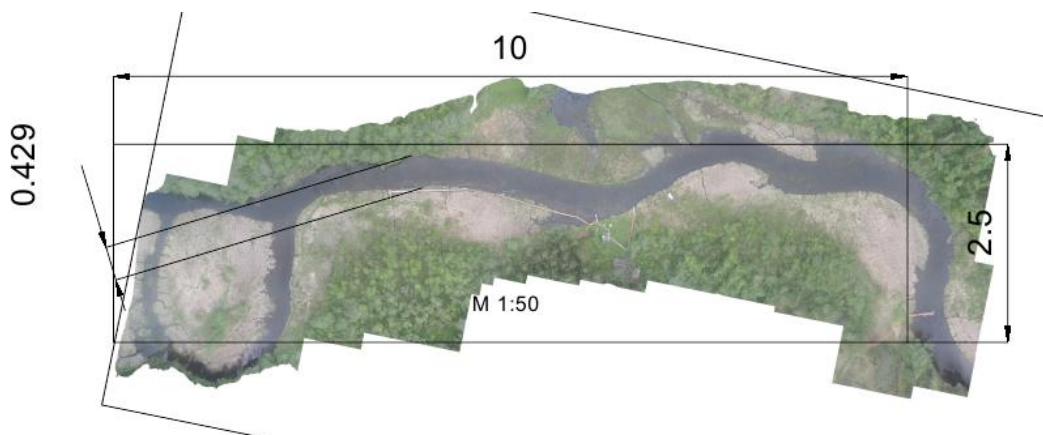


Рисунок 3.1 Участок моделирования в масштабе 1:50

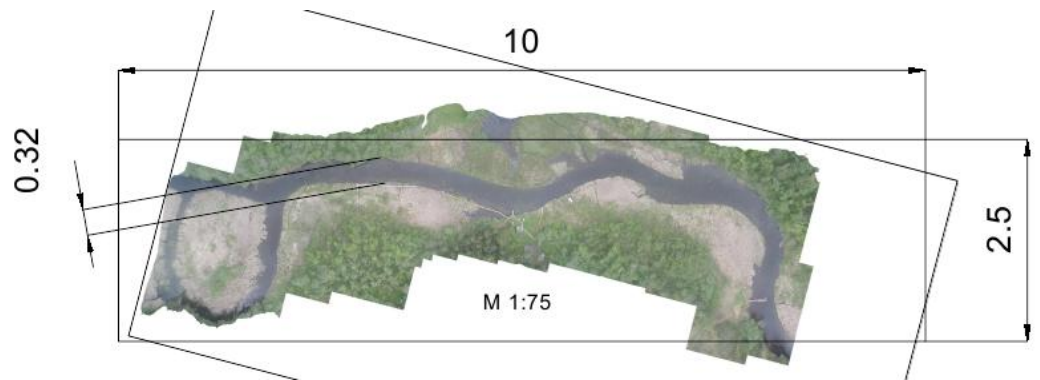


Рисунок 3.2 Участок моделирования в масштабе 1:750

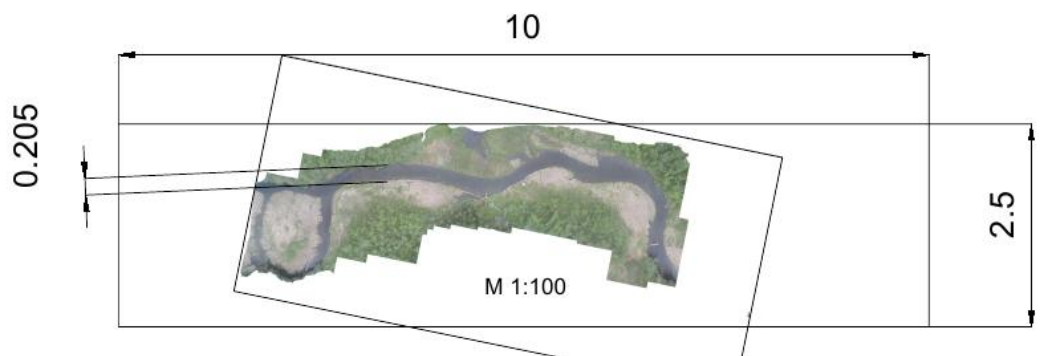


Рисунок 3.3 Участок моделирования в масштабе 1:100

В результате был выбран масштаб 1:75. В остальные масштабы либо не попадает весь участок моделирования (1:50), либо ширина русла становится крайне малой (1:100), что не позволит проводить эксперименты и измерять гидрологические величины.

Русловая площадка как в AutoCAD, так и в натуре была размечена на квадраты размером 1x1 м, по которым в дальнейшем и будет создаваться модель (рисунки 3.4-3.5).

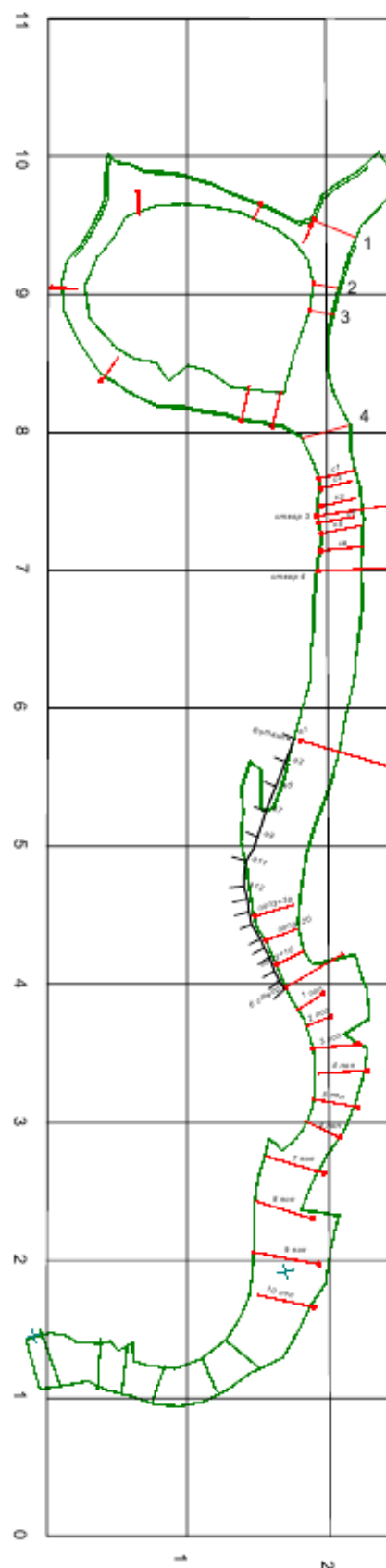


Рисунок 3.4 Разбивка русловой площадки на квадраты в AutoCAD

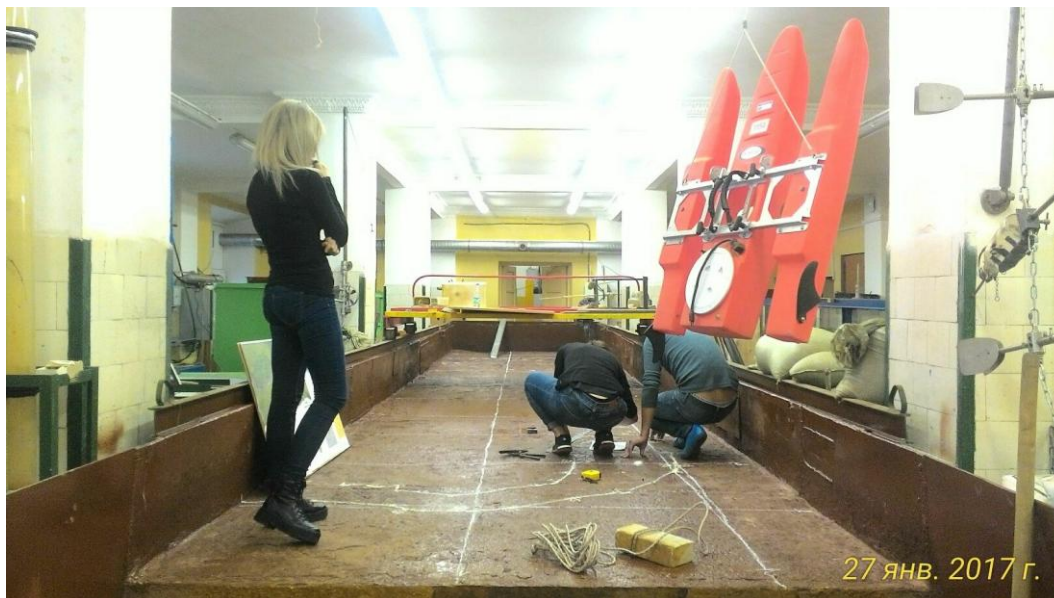


Рисунок 3.5 Разбивка русловой площадки на квадраты

По ортофотоплану в AutoCAD была определена урезная линия, соответствующая отметки 91,000 м БС и отмечено ее положение в координатах русловой площадки. Урез воды был перенесен на площадку в меле, а затем поднят на высоту, соответствующую отметки 91,000 м БС. Высота подбиралась в соответствии вертикального масштаба проектируемой модели 1:20 (Рисунок 3.6).

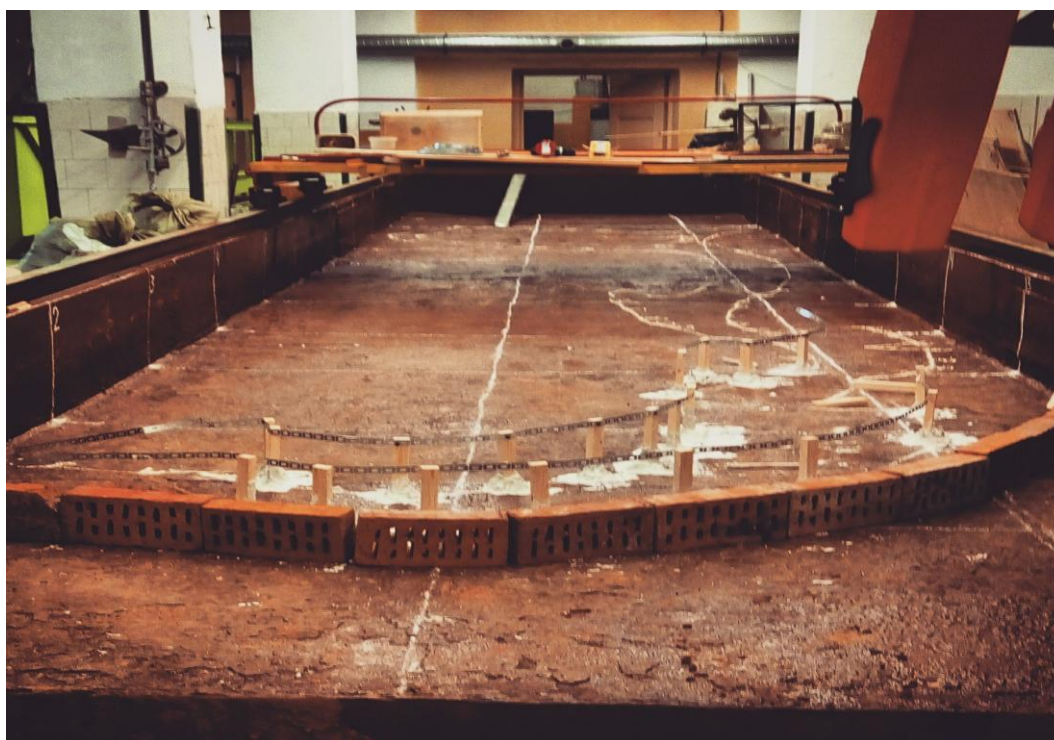


Рисунок 3.6 Положение урезной линии

Следующим шагом была произведена отсыпка песчаной подложки оставшейся части модели, для экономии бетона (Рисунок 3.7)



Рисунок 3.7 Песчаная подложка

Следующим этапом создания модели стало формирование русла р. Оредеж на русловой площадке. Было принято решение о детализации нашей модели и поперечные профили были взяты с дискретностью 10 метров в натуре, что соответствует 13 см нашей модели. Для этого были использованы данные промеров глубин русла с практик по ГМИ, выполненных студентами в разные года (с 2015 по 2017 гг.). Обработаны книжки для записи промеров глубин, в которых расчетные значения были приведены к выбранному уровню воды, соответствующему отметки 91,000 м БС и построены поперечные профили при этой отметки (рисунок 3.8).

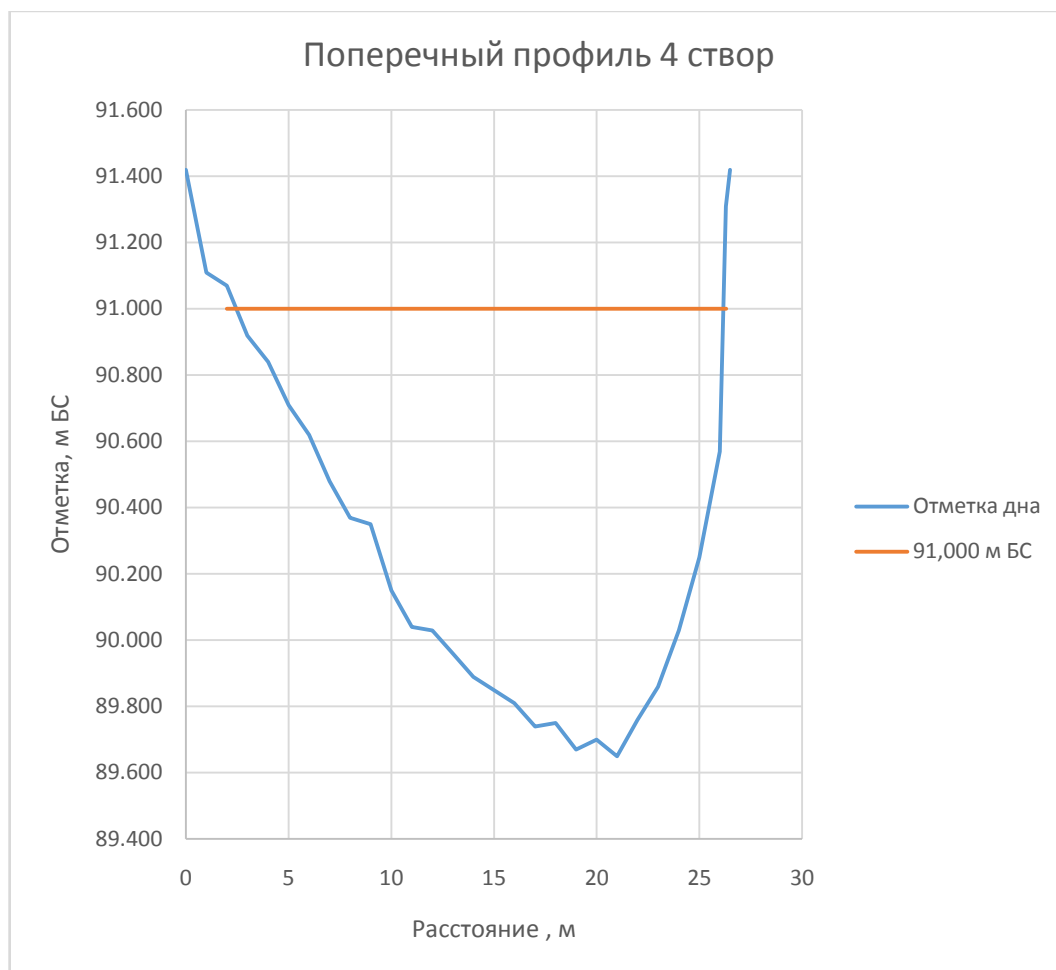


Рисунок 3.8 Поперечный профиль, приведенный к отметке 91,000 м БС

Полученные поперечные профиля были построены в AutoCAD в соответствующих масштабах (Горизонтальный – 1:75, вертикальный – 1:20). Пример такого профиля представлен на рисунке 3.9.

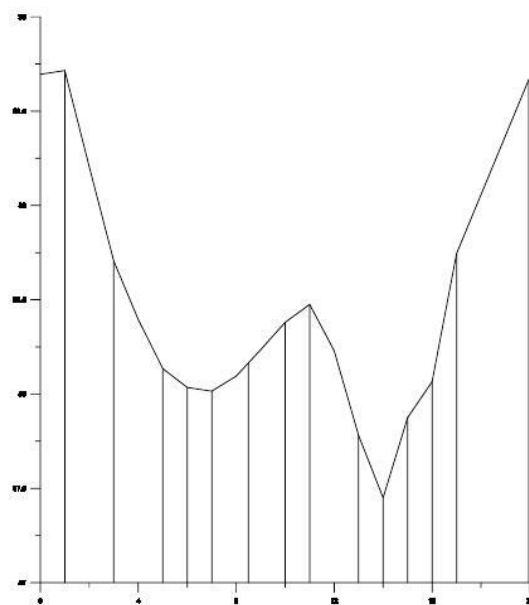


Рисунок 3.9 Поперечный профиль в масштабах проектируемой модели.

Следующим шагом следовал перенос этих профилей на листы фанеры. Для этого использовался проектор. В результате были получены поперечники на фанере (Рисунок 3.10-3.11).

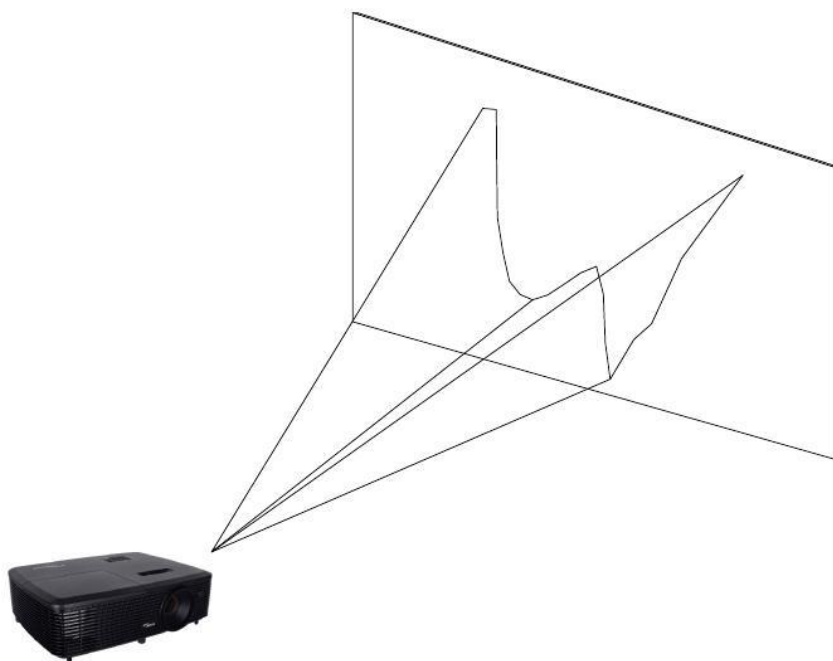


Рисунок 3.10 Перенос профилей с использованием проектора.



Рисунок 3.11 Поперечные профили на фанере

Выпиленные из фанеры серии поперечных профилей (Рисунок 3.12) были закреплены на русловой площадке в пределах ранее отмеченной урезной линии (Рисунок 3.13).

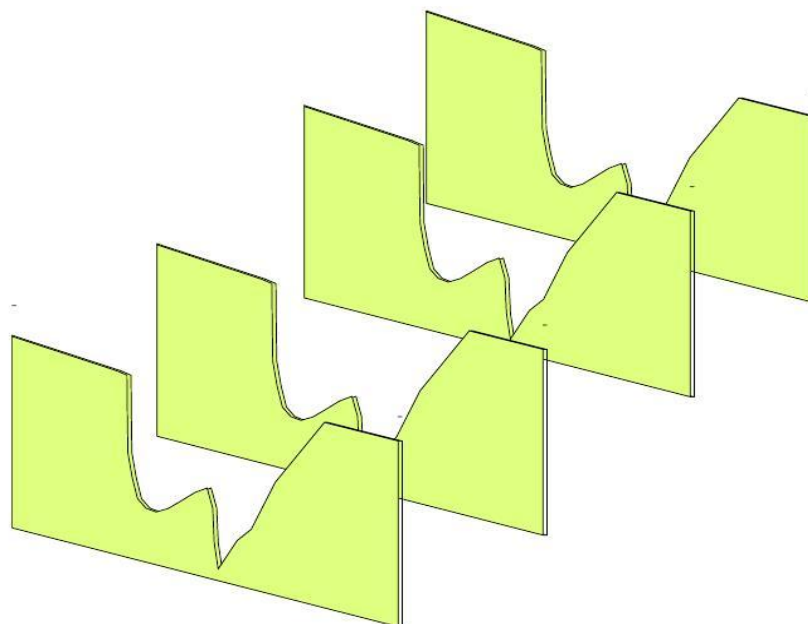


Рисунок 3.12 Серия поперечных профилей



Рисунок 3.13 Закрепление поперечных профилей в моделируемом русле.

После закрепления всех профилей в русле были произведены бетонные работы. Русло реки и малая часть поймы были забетонированы (См. рисунок 3.13). В результате получилось неразмываемое русло с песчаной подложкой (Рисунок 3.14)

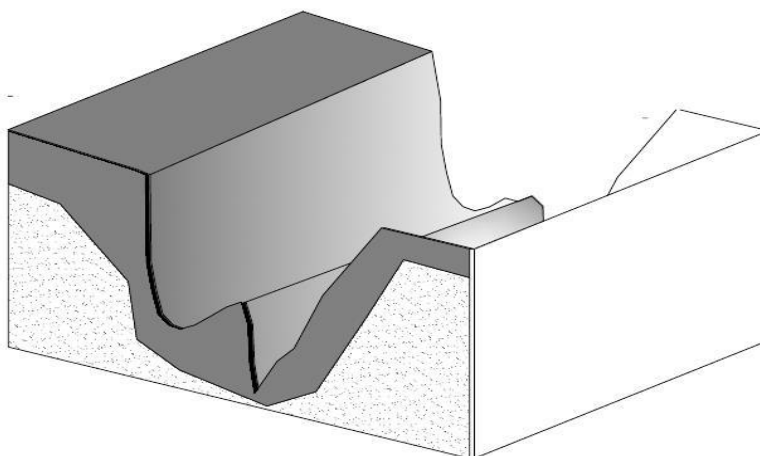


Рисунок 3.14 Разрез неразмываемого русла

Конечным итогом первого этапа стала физическая модель участка р. Оредеж в районе базы практики РГГМУ (Рисунок 3.15). В

результате можно начинать проводить первые эксперименты на модели, но не превышать отметку уровня воды, соответствующую значением 91,000 м БС. Превышение этой отметки приведет к размыву песчаной подложки под поймой и коренным берегом.



Рисунок 3.15 Физическая модель р. Оредеж.

Следующим этапом стало создание поймы и коренного берега р. Оредеж на модели. Это позволит использовать модель во всем диапазоне изменения уровня воды в р. Оредеж, а также возможность моделирования различных ситуаций, к примеру прорыв плотины и т.д. Для этого использовались данные с практик по ГМИ, а именно морфометрические створы и тахеометрические съемки участка р. Оредеж (Рисунки 3.16-3.17). Положение морфостворов на модели было получено с использованием ортофотоплана.

Таблица данных по промерам глубин р.Оредеж	
Расстояние, м	Отметка и, м БС
17.6	90.5
17.0	90.4
16.0	90.1
15.0	90.1
14.0	90.1
13.0	89.7
12.0	90.0
11.0	89.8
10.0	89.7
9.0	89.6
8.0	89.5
7.0	89.5
6.0	89.6
5.0	89.5
4.0	89.7
3.0	89.7
2.0	90.1
1.0	90.4
0.0	91.0



ԸՆԾԱԳԻՑ ԳԲԸՈՒ ԲԱՆԱԿՈՇԱԿԱՆ

— Ըստե՞սք Նոնո քմեր հոգիքս չ'ըստե՞սք ինչ' քնորոգ' և

W'geb': 1:100
W'sob': 1:1000

р.Ореджк

ПЛАН УЧАСТКА ПОСТА №3

Изм.	Кол-во	Лист	№ док.	Подп.	Дата
Плм. отд.	1	Визирован И.С.	1507/30		
Гл. спец.	1	Визирован Т.М.			
Вед. отд.	1	Закреплен К.			
Инженер					
Н. контр.					

Статья	Лист	Листов
п	1	1
	МВНССО РФ	
	РГТМУ	

24

высота русловой площадки не позволяла создать коренные берега в масштабе по высоте, то было принято решение сделать их по максимальной высоте лотка.



Рисунок 3.18 Создание поймы и коренных берегов

Следующим шагом стало бетонирование поймы и коренных берегов, но из-за нехватки времени этот шаг не был сделан до конца.

Помимо основных работ на модели, производились дополнительные, такие как создание леса, кустарника, мостков и бани. Все это старались делать в масштабах модели и прибегали к различным способам решения (Рисунок 3.19).



Рисунок 3.19 Созданные мостки на физической модели
Предполагается дальнейшая работа над моделью.

15 3.1.1. Условия подобия систем при воздействии одной преобладающей силы.

При проведении опытов экспериментальных механических систем приходится иметь дело с воздействием различных сил: тяжести, трения, поверхностного натяжения, упругости и др. Величина этих сил определяется различными физическими размерными коэффициентами. Но так как свойства среды при изучении явлений уже были заданы, то, следовательно, заданы и отношения указанных различных физических коэффициентов (объемных весов, коэффициентов вязкости и пр.). Поэтому в механически одинаковых системах, кроме трех отношений для основных единиц измерения, существуют так же отношения и для физических размерных коэффициентов. Из всех этих отношений три выбираются произвольно, а значения остальных получаются на основании нижеприведенных зависимостей.

Как уже было замечено выше, при синхронном действии нескольких соизмеримых между собой сил очень трудно, а иногда даже невозможно, обеспечить единство изучаемых в лабораторных условиях систем. Тем не

менее часто оказывается, что из нескольких действующих сил, в пределах определенной области изучаемого явления, только одна сила является преобладающей по величине и действенности воздействия. Тогда представляется вполне возможным, в границах всей данной области, учитывать влияние на изучаемый процесс только одной доминирующей силы, а влиянием остальных сил пренебречь или учесть их путем применения специальных условий и исправлений. В этих случаях можно обеспечить приблизительное, но довольно близкое подобие двух систем и производить с помощью формул подобия соответствующие пересчеты.

При выходе за границы этой области может оказаться, что доминирующей силой уже является другая сила и тогда моделирование надо проводить по другой силе.

К таким доминирующим силам в практике речного моделирования, как при абсолютно свободном движении жидкости, так и при наличии каких-либо сооружений, чаще всего относятся две силы - сила тяжести и сила трения. Исходя из этого ограничимся рассмотрением условий подобия при преобладающем воздействии каждой из этих двух сил.

16 3.1.2 Критерий подобия систем, находящихся под воздействием сил тяжести.

Масштабный множитель для сил двух схожих систем, когда главенствующими являются силы тяжести, может быть записан в виде

$$a_f = \frac{F}{f} = \frac{\gamma_n L^3}{\gamma_{ml}^3} = a_\gamma a_l^3$$

Сравнение этого выражения с общим выражением масштабного отношения сил инерции по закону подобия Ньютона приводит к следующему выражению

$$a_p a_l^2 a_u^2 = a_\gamma a_l^3$$

Или

$$\frac{a_p a_n^2}{a_\gamma a_l} = 1$$

изменение масштабных множителей отношением соответствующих физических характеристик дает:

$$\frac{\rho_H U^2 \gamma_M l}{\rho_M u^2 \gamma_H L} = 1$$

После замены удельного веса γ произведением ρg и сокращения ρ это выражение принимает вид

$$\frac{U^2 g_M l}{u^2 g_H L} = 1$$

Откуда
$$\frac{U^2}{g_H L} = \frac{u^2}{g_M l} = Fr = \text{idem}$$

Таким образом, оказывается, что критерием подобия для систем, находящихся под влиянием сил тяжести, является безразмерное число Фруда, называемое иногда критерием гравитационного подобия.

Этот важный критерий служит основой для получения расчетных формул подобия, по которым уже и производится расчет модели на основе данных натурных измерений и так же пересчет всех важнейших физических характеристик потока на натуру по результатам модельных исследований, когда преобладающей силой является сила тяжести.

3.1.3. Критерий подобия систем находящихся под воздействием сил трения.

В случае преобладающего действия сил трения в жидкости связь характеристик потока определяется следующим законом:

$$F_{\text{тр}} = -\mu S \frac{du}{dn}$$

жидкости на площади S ; μ -динамический коэффициент вязкости; $\frac{du}{dn}$ — градиент скорости по нормали.

Отношение для сил трения в двух сопоставляемых системах.

$$a_{f_{тр}} = \frac{F_{тр}}{f_{тр}} = \frac{\mu_H S_H \frac{du}{dn}}{\mu_M S_M \frac{du}{dn}} = a_\mu a_l^2 a_u a_l^{-1} = a_\mu a_l a_u$$

Сопоставление с выражением при водит к равенству

$$a_p a_l^2 a_n^2 = a_\mu a_l a_u$$

Или

$$\frac{a_p a_l a_u}{a_\mu} = 1$$

Замена масштабных множителей отношением соответствующих физических характеристик позволяет записать

$$\frac{p_H L U_{\mu M}}{p_M l u_{\mu H}} = 1$$

Заменяя динамический коэффициент вязкости кинематическим, перепишем это выражение:

$$\frac{L U_{\mu M}}{l u \gamma_m} = 1$$

$$\text{Откуда } \frac{U L}{\gamma_H} = \frac{u l}{\gamma_M} = Re = idem.$$

Данные видоизменения показывают, что критерием подобия двух систем, находящихся под воздействием сил внутреннего трения, является число Рейнольдса. Равенство является основой при расчете модели и при переносе результатов опыта на натуру в случае, когда преобладающей силой является сила внутреннего трения.

3.2.1 Расчетные формулы для масштабных отношений основных физических характеристик потока при наличии одной преобладающей силы.

При выводе расчетных формул для масштабных отношений можно ограничиться рассмотрением лишь таких задач, в которых изучаемые физические процессы обусловлены влиянием какой-либо одной преобладающей силы — силы тяжести или силы трения. Задачи, в которых в качестве преобладающих сил оказываются другие силы или же одновременно действует две соизмеримые силы, оказываются значительно сложнее для исследования. Кратко они будут рассмотрены далее, а более подробные сведения по этим вопросам, в пределах существующих в настоящее время возможностей их решения, можно увидеть в специальной литературе, рекомендуемой настоящим пособием.

17 3.2.2 Масштабные отношения характеристик потока для случая, когда преобладающей является сила тяжести.

В тех случаях, когда характер изучаемых процессов в потоке жидкости подобия (закону подобия Фруда).

Чтобы правильно построить модель исследуемого объекта, например участка реки, надо выбрать геометрический масштаб (вопрос о выборе масштаба будет освещен ниже) и вычислить по данным гидрометрических наблюдений на участке реки и по формулам подобия все основные физические характеристики для модели, отвечающие условиям подобия. После выполнения намеченных экспериментов, физические характеристики модели по этим же формулам пересчитываются на натуру.

Расчетные формулы, отвечающие условиям подобия для этих вычислений, можно получить на основе тождественности для природы и модели критерия Фруда, пользуясь принципом размерности.

Тождество переписывается так

$$\frac{U^2}{u^2} = \frac{g_H L}{g_M l'}$$

$$\text{После чего получается } a_u = \frac{U}{u} = \sqrt{\frac{g_H L}{g_M l}} = a_g^{\frac{1}{2}} a_l^{\frac{1}{2}} = a_l^{\frac{1}{2}} \quad (4.23)$$

Принимая здесь, а так же ниже $g_n = g_M$, получаем, что $a_g = 1$.

Используя такой же прием, легко получим выражения

масштабных множителей для всех остальных основных физических характеристик, отвечающих условиям подобия, и по ним произведем все необходимые вычисления: для расходов

$$a_q = \frac{Q_H}{Q_M} = \frac{\Omega U}{\omega u} = a_l^2 a_u$$

$$\text{Или } a_Q = a_l^2 a_g^{1/2} a_l^{1/2} = a_g^{1/2} a_l^{5/2} = a_l^{5/2}$$

Для времени протекания подобных процессов

$$a_u = \frac{U}{u} = \frac{Lt}{Tl} = \frac{a_l}{a_t}$$

$$\text{Или } a_t = \frac{a_l}{a_u} = \frac{a_l}{a_g^{1/2} a_l^{1/2}} = \frac{a_l^{1/2}}{a_g^{1/2}} = a_l^{1/2}$$

$$\text{Для ускорений } a_j = \frac{a_u}{a_t} = \frac{a_g^{1/2} a_l^{1/2} a_g^{1/2}}{a_l^{1/2}} = a_g = 1$$

Для сил

$$a_f = \frac{\gamma_H L^3}{\gamma_M l^3} = a_\gamma a_l^3 = a_l^3 *$$

Масштабный множитель для давления получим из соображений, что давление можно выразить через силу, отнесенную к единице площади:

$$a_p = \frac{P}{p} = \frac{F_\omega}{f\Omega} = a_f a_\omega^{-1} = a_\gamma a_l^3 a_l^{-2} = a_\gamma a_l = a_l$$

Отношение уклонов можно получить, исходя из величины падения ΔH и Δh на соответствующих участках для природы и модели:

$$a^i = \frac{I}{i} = \frac{\Delta H l}{\Delta h L} = \frac{a_h}{a_l} = 1$$

т. е. в натуре и на модели уклоны равны. ($j = i$)

Для работ потоков жидкости масштабный множитель будет

$$a_A = \frac{A_H}{A_M} = \frac{FL}{fl} = a_f a_l = a_\gamma a_l^3 a_l = a_\gamma a_l^4 = a_l^4$$

И, наконец, для их мощностей

$$a_N = \frac{N_H}{N_M} = \frac{A_H t}{A_M T} = a_A a_t^{-1} = a_\gamma a_l^1 a_l^{-\frac{1}{2}} = a_\gamma a_l^{\frac{7}{2}} = a_l^{\frac{7}{2}}$$

Правила Фруда применяются при моделировании движения жидкости в открытых потоках, так как в этом месте движение в основном обусловлено силами тяжести. Эти правила употребляются так же и при моделировании движения воды через водосливы, отверстия, насадки и прочие гидравлические и гидротехнические устройства и сооружения открытого типа.

Следует заметить, что при этом, так называемом, безнапорном движении,

Для возможности использования указанных формул придется добавить еще некоторые важные зависимости, учитывающие гидравлическое сопротивление (трение по длине), связанное с числом Рейнольдса.

18 3.2.3 Масштабные отношения характеристик потока для случая, когда преобладающей является сила трения.

В напорных системах движение жидкости обуславливается перепадом давления, являющимся движущей силой; влияние силы тяжести в этом случае оказывается незначительным. При действительно очень малых скоростях потока, когда имеет место ламинарный режим движения, а также и в некоторых других случаях, система может находиться под воздействием сил внутреннего трения. При этих условиях отношения между гидравлическими элементами потоков в натуре и на модели можно получить на основании тождественности критерия Рейнольдса

для скоростей

$$a_u = \frac{U}{u} = \frac{l_{vH}}{L_{vM}} = a_l^{-1} a_v$$

Для расходов

$$a_Q = \frac{Q_H}{Q_M} = \frac{\Omega U}{\omega u} = a_l^2 a_l^{-1} a_v = a_l a_v$$

Для времени протекания подобных процессов

$$a_u = \frac{U}{u} = \frac{L t}{l T} = \frac{a_l}{a_t}$$

Откуда

$$a_t = \frac{a_l}{a_u} = \frac{a_l}{a_l^{-1} a_v} = a_l^2 a_v^{-1}$$

И наиболее интересное – для сил трения

$$a_{f_{тр}} = \frac{F_{тр}}{f_{тр}} = \frac{\mu_H S_H \frac{dU}{dN}}{\mu_M S_M \frac{du}{dn}} = a_\mu a_l a_v a_l^{-1} = a_\mu a_p = 1$$

Для перепадов давления

$$a_{\Delta p} = \frac{\Delta P}{\Delta p} = \frac{F_{тр} \omega}{f_{тр} \Omega} = a_f a_l^{-2} = a_v^2 a_p a_l^{-2} = a_v a_l^{-2}$$

Для пьезометрических уклонов

$$a_{ip} = \frac{\Delta P l}{\Delta p L} = \frac{a_{\Delta p}}{a_l} = a_v^2 a_p a_l^{-3}$$

Для работ потоков жидкости

$$a_A = \frac{A_H}{A_M} = \frac{F L}{f l} = a_f a_l = a_v^2 a_p a_l = a_v^2 a_l$$

Для их мощностей

$$a_N = \frac{N_H}{N_M} = \frac{A_H t}{A_M T} = a_A a_t^{-1} = a_v^2 a_p a_l (a_v^{-1} a_l^2)^{-1} = a_v^3 a_p a_l^{-1} = a_v^3 a_l^{-1}$$

19 3.2.4. Возможности учета единовременного воздействия на поток жидкости различных сил.

При одновременном воздействии на поток жидкости различных по своему происхождению сил относительное влияние каждой из них, и их роль во взаимодействии с другими силами могут существенно изменяться при изменении некоторых количественных характеристик потока. Так, что при истечении жидкости через водосливы преобладающей силой можно считать силу тяжести лишь до определенного предела. Когда расход становится очень малым, роль преобладающей силы переходит к силе поверхностного натяжения и существующие расчетные формулы для пропускной способности водослива так же, как и формулы подобия, полученные из закона подобия Фруда, становятся неприменимыми.

При постановке лабораторных опытов по изучению речных потоков преобладающей является сила тяжести и модель рассчитывается по формулам подобия Фруда. Однако при мелких масштабах моделирования нередко может оказаться, что на пойменных участках модели, а иногда и в самом русле, вследствие очень малых глубин и скоростей, числа Рейнольдса достигают столь малой величины, что режим потока становится переходным или даже ламинарным и расчет гидравлических характеристик по закону подобия Фруда не может дать приемлемых результатов.

В таких случаях нужно строить модель в еще более крупном масштабе, либо применять другие приемы моделирования, выработанные практикой.

Для того чтобы нагляднее показать противоречивость формул подобия, применяемых для расчета моделей и обратного пересчета результатов опытов на натуру, достаточно привести значения масштабных множителей, полученных выше, лишь для двух законов подобия (Фруда и Рейнольдса) в виде сводной таблицы.

Аналогичная картина получится, если рассмотрим результаты расчета масштабных множителей и по другим законам подобия (Вебера, Коши и др.). Аналогичную таблицу можно найти в специальной литературе.

Здесь можно ограничиться тем, что мы рассмотрим лишь два, отмеченных выше, законов подобия, потому что именно они чаще всего применяются в практике моделирования. Сопоставляя выражения для масштабных множителей гидравлических характеристик, убеждаемся, насколько неправомерно совместное применение двух законов подобия при моделировании.

В самом деле, при соизмеримых силах тяжести и вязкости, действующих одновременно на поток, масштабные множители для основных гидравлических характеристик, полученные по законам подобия Фруда и Рейнольдса, должны совпадать. Если же взять для примера хотя бы такую важную характеристику, как скорость, то для нее из сводной таблицы найдем, что по закону помещенному выше. Похожая картина получится, если рассмотрим результаты расчета масштабных множителей и по другим законам подобия (Вебера, Коши и др.). Аналогичную таблицу можно найти в спец. литературе.

Здесь можно ограничиться рассмотрением лишь двух, отмеченных выше, законов подобия, потому что именно они чаще всего применяются в практике моделирования. Сопоставляя выражения для масштабных множителей гидравлических характеристик в графах 7 и 9 сводной таблицы, убеждаемся, насколько неправомерно совместное применение двух законов подобия при моделировании.

Действительно, *при соизмеримых силах тяжести и вязкости, действующих одновременно на поток, масштабные множители для основных гидравлических характеристик, полученные по законам подобия Фруда и Рейнольдса, должны совпадать. Если же взять для примера хотя бы такую важную характеристику, как скорость, то для нее из сводной таблицы

найдем, что по закону подобия Фруда $a_u = a_i^{1/2}$, а по закону подобия Рейнольдса $a_u = \frac{a_v}{a_i}$.

Легко заметить, сколь несовместимы эти масштабные отношения. Из сопоставления значения, а видно также, что неучет сил вязкости приводит к неточностям в результатах опытов и даже к ошибкам, которые могут быть сделаны по данным полученных из этих опытов. Степень искажения результатов эксперимента естественно связана с масштабом модели, потому что от него зависит как величина скорости в различных точках живого сечения модели, так и величина средней скорости, обуславливающей режим потока.

Совпадение масштабных множителей по обоим законам подобия можно достигнуть лишь в одном случае, если значения a_u , вычисленные по Фруду и Рейнольдсу, будут равны между собой. Для этого приравняем правые части выражений $a^{1/2} = \frac{a_v}{a_i}$. Откуда $a_v = a_i^{3/2}$

Для обеспечения данного равенства нужно на модели иметь вместо воды другую жидкость, для которой коэффициент кинематической вязкости был бы в $a_i^{3/2}$ раз меньше, чем для воды.

Если предположить, что модель создается в масштабе, равном одной сотой ($a_v = 100$), то

$$a_v = \frac{\nu_H}{\nu_M} = 100^{3/2} = 1000, \text{ откуда } \nu_M = \frac{\nu_H}{1000}$$

Вода обладает и без того достаточно небольшой вязкостью и получение в большом количестве жидкости, у которой кинематический коэффициент вязкости был бы ровно в тысячу раз меньше, чем у воды, не представляется реальным. По этой причине и оказывается невозможным обеспечение точного подобия для речных потоков при одновременном действии даже двух соизмеримых по величине сил.

20 3.3.1 Ограничительные условия применения законов подобия и правил моделирования.

Сравнение масштабных множителей для любой из физических характеристик потока, вычисленных по законам подобия Фруда и Рейнольдса, показывает, что они не только не согласовываются между собой, но даже оказываются противоречивыми. Значения множителя a_u , вычисленные по Фруду, прямо пропорциональны корню квадратному из a_l , а по Рейнольдсу они обратно пропорциональны линейному масштабному отношению a_l .

Если моделировать по закону Фруда, например в масштабе $\frac{1}{100}$ ($a_l = 100$), то для обеспечения подобия скорость потока на модели должна быть в 10 раз меньше, чем в натуре ($a_u = \frac{U}{u} = a_l^{1/2} = \sqrt{100}$).

При моделировании по Рейнольдсу ($a_u = \frac{U}{u} = a_l^{-1}$; $u = a_l U = 100U$), та же скорость должна быть в 100 раз больше, чем в натуре.

Вспоминая, что критерии подобия были приобретены путем приравнивания общего критерия Ньютона критерию Фруда и критерию Рейнольдса, можно прийти к выводу о том, что в случае воздействия на поток, помимо сил инерции и одной из основных сил (тяжести или вязкости), еще какой-либо силы, соблюдение точного подобия оказывается невозможным. Это вызывает необходимость работать в условиях приближенного подобия, дополняя законы подобия практическими правилами и приемами моделирования для разных частных условий движения потока.

В целях уменьшения погрешностей в гидролабораториях были выработаны практические правила и приемы моделирования, дополняя которыми строгие законы подобия, можно получить результаты исследования, приемлемой точности.

Первыми, достаточно четко сформулированными ограничительными условиями применения правил моделирования, были опубликованные в

1932 г. так называемые семь эйснеровых условий подобия. Затем, на протяжении всех последующих лет, они развивались и дополнялись другими учеными, разрабатывавшими вопросы методики экспериментальных исследований русловых потоков (А. П. Зегжда, А. А. Сабанеев, И. И. Леви, И. В. Егiazаров, М. А. Великанов, М. З. Абрамов, В. С. Кнороз, Б. А. Фидман, А. И. Лосиевский, Ф. И. Пикалов, Н. А. Ржаницын, и др.). Целым списком ученых за последние годы была проведена большая работа в области разработки и совершенствования новой методики исследований русловых потоков на напорно-воздушных моделях (А. Г. Аверкиев, Н. П. Гиляров, В. М. Лятхер, А. И. Прудовский и др.).

Ниже представляются ограничительные правила моделирования, следуя изложению Ф. Эйснера и А. П. Зегжда, а также некоторые из получивших позже распространение в гидролабораториях приемы моделирования открытых русловых потоков.

3.3.2 Условия совместного действия нескольких сил.

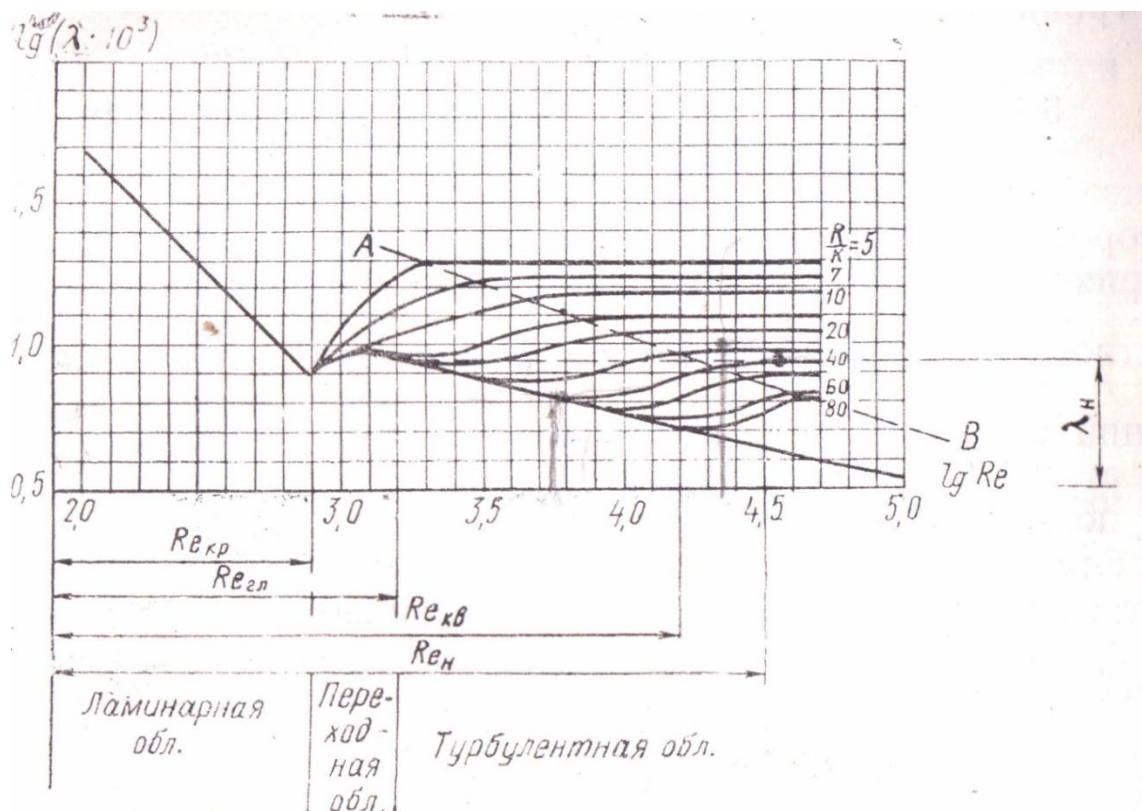
Законы подобия, как уже было наблюдено выше, могут обеспечить подобие только в случае, когда изучаемый процесс определен воздействием лишь одной силы. Задача моделирования русловых безнапорных потоков может успешно решаться лишь благодаря тому, что в натурных условиях во многих случаях воздействие ряда сил на изучаемое явление оказывается настолько малым по сравнению с основной силой, что им можно пренебрегать, не опасаясь возникновения заметных погрешностей. К таким силам, в обычных условиях, относятся, например, силы вязкости, капиллярности, упругости.

Тем не менее при достаточно мелком масштабе размеры потока на модели становятся очень малыми, резко уменьшается величина числа Рейнольдса и соответственно возрастает роль вязкости.

В этих случаях может появиться опасность такого увеличения второстепенных сил на модели, при котором они станут соизмеримыми с

основными силами, что приведет к искажению подобия. Тогда возникает необходимость сохранения на модели соответствующего взаимного соотношения влияния отдельных сил на ход изучаемого процесса в натуре. Этого можно достичь искажением масштаба модели и некоторыми другими мерами.

В некоторых случаях можно выделить одну преобладающую силу в качестве определяющей, влияние же второй силы следует учитывать специальными приемами. Так, например, в обычных экспериментах с речными моделями при достаточно больших значениях числа Рейнольдса определяющей силой является сила тяжести, по ней и производится расчет модели. Из графика А. П. Зегжда $\lambda = f(Re, \frac{R}{\kappa})$ легко усматривается, что в значительной области потока при больших значениях Re величина λ остается постоянной и здесь можно обеспечить достаточно точное подобие. Для избежания погрешностей за счет влияния сил внутреннего трения, в соответствии с расчетными масштабными множителями по Фрудру, принимается ряд дополнительных мер, которые вырабатываются и применяются с учетом конкретных условий изучаемого явления, характера объекта и опыта данной лаборатории. Чаще всего используется зависимость между коэффициентом Дар



си и

числом Рейнольдса Рис.1

Одним из надежных методов выявления существенных погрешностей за счет искажающего влияния второй силы (силы трения) является проведение экспериментов на моделях разного масштаба. В процессе проведения таких экспериментов и сопоставления результатов опытов, пересчитанных на натуру, производят соответствующие корректировки элементов модели. В результате этого можно обеспечить достаточную степень подобия в пределах определенной области значений чисел Fr и Re . Таким образом, там, где можно ожидать искажения за счет влияния сил трения, в результате опытов с речными моделями, рассчитанными по Фрудру, вносятся коррективы, отражающие влияние сил внутреннего трения и путем экстраполяции на натуру устанавливается зависимость $\lambda = f(Fr, Re)$. Это позволяет установить границы значений чисел Fr и Re , в которых для данного объекта и поставленной задачи исследования возможные отклонения оказываются в пределах допустимых погрешностей. Построение по результатам сопоставительных опытов графиков этих зависимостей поможет четко установить такие границы

21 3.3.3 Соответствие режима движения жидкости на модели режиму движения в натуре.

Второе правило Эйснера является очевидным. В речных потоках приходится почти всегда иметь дело с высокой степенью турбулентности.

Числа Рейнольдса $Re_H = \frac{UR_H}{\nu_H}$ здесь достигают

значений сотен тысяч и миллионов. Однако, если модель приходится строить в мелком масштабе, то на пойме очень часто глубины получаются столь малыми, что числа Рейнольдса становятся близкими к критическим, и режим потока на модели может оказаться переходным или даже ламинарным.

Например, на запланированном к моделированию участке реки в период паводка были установлены средние глубины в русле 9 м и на пойме 3 м. Скорость потока соответственно в русле $f_p \sim 1,50$ м/с и на пойме $U_n = 0,6$ м/с. Масштаб модели принят равным $M = 1/900$. Тогда получаем для модели значение скорости в русле $U_p = 1.50 \frac{м}{с}$ и на пойме $U_n = 0,6$ м/с.

Масштаб модели принят равным $M = 1/900$. Тогда получаем для модели значение скорости в русле $u_p = \frac{U_p}{\sqrt{a_1}} = \frac{1.50}{30} = 0.05$ м/с и на пойме $U_n =$

$\frac{0.60}{30} = 0.02 \frac{м}{с}$. Числа Рейнольдса на модели будут в русле $Re_m = \frac{u_h}{\nu_m} =$

$\frac{0.05 \cdot 0.01}{1 \cdot 10^{-6}} = 500$, а на пойме $Re_m = \frac{0.02 \cdot 0.0033}{1 \cdot 10^{-6}} = 66$.

Следовательно, поток на модели будет ламинарным и для обеспечения подобия надо увеличивать масштаб модели или переходить на искажение масштаба глубин или принимать другие меры для обеспечения турбулентного режима на модели.

Таким образом, нужно, чтобы наименьшее значение числа Рейнольдса на пойме модели было больше верхнего предела критического значения $Re_{кр}$. Это в известной степени определяет предел возможного наименьшего масштаба модели.

К сожалению, пределы критического значения числа Рейнольдса для открытых русловых потоков до сих пор нельзя считать достаточно четко установленными. Имеющиеся рекомендации недостаточно однозначны. Так, по опытам $Re_{кр} = 330$, Крея — $Re_{кр} = 1500—1600$. На основе своих опытов А. П. Зегжда рекомендует принимать с некоторым запасом $Re_{кр} 1000$. Необходимо учитывать, что эти данные получены из опытов в лаборатории с прямолинейными каналами прямоугольного сечения.

Правда вопрос о точном определении критического значения Re для нашей задачи не играет особо важной роли, так как модель чаще всего приходится проектировать с расчетом, чтобы поток на модели оказывался в автомодельной области, т. е. находился в пределах горизонтальных прямолинейных участков кривых $\lambda — f (Re, \frac{R}{k})$ которые начинаются при числах Re , значительно превышающих критическое значение.

При моделировании по Фруды Эйсер получает приближенную формулу для определения минимально допустимого масштаба, исходя из следующих соображений. Числа Рейнольдса на модели должны отвечать условию

$$Re_M = \frac{u R_M}{v_M} \geq Re_{кр}$$

После перехода к натуральным характеристикам, принимая $v_M = v_H$, найдем

$$Re_M = \frac{U R_H}{v_H a_l \sqrt{a_l}} \geq Re_{кр},$$

$$\text{Откуда легко получить } a_l \leq \left(\frac{U R_H}{v_M Re_{кр}} \right)^{\frac{2}{3}} = (30 \div 50) \left(\frac{Q}{B} \right)^{2/3}$$

22 3.3.4. Соответствие состояния потока на модели (спокойное или бурное) состоянию его в натуре

Спокойному или бурному состоянию потока в натуре должно соответствовать такое же состояние и на модели. Как известно, указанные два состояния потока определяются сопоставлением

его уклона с критическим уклоном: $i_{кр} = \frac{g}{ac_0^2}$

Где C_0 – коэффициент Шези, соответствующий глубине равномерного режима при данном уклоне дна потока; a — коэффициент Кориолиса.

Поэтому при определении уклонов на модели необходимо, чтобы для спокойных потоков

$$i \leq \frac{g}{ac_0^2}$$

и для бурных потоков $i \geq \frac{g}{ac_0^2}$

При этом рекомендуется сохранение запаса для определяемого уклона, равного 10—20% скорости, соответствующей критическому уклону.

23 3.3.5. Условия подобия подвижности наносов

Эти условия требуют, чтобы на модели начало трогания наносов с места и начало интенсивного их движения происходили бы при скоростях, соответствующих натурным скоростям, и процессы формирования русла по своему характеру были бы схожи натурным.

Вопрос этот по ряду причин чрезвычайно сложен. Сложности здесь начинаются уже с затруднений в проведении наблюдений и точных измерений характеристик этих процессов в натуре. Уменьшение размеров наносов для модели в соответствии с масштабом моделирования оказывается крайне маловероятным или же невозможным, так как при этом размеры крупинок получились бы столь малыми, что физические свойства их (этой пыли) не соответствовали бы свойствам натуральных наносов. Затруднения связаны и с недостаточной разработанностью физически обоснованных зависимостей для расчета перемещения наносов и русловых деформаций.

Поэтому при моделировании наносов склоняются не к уменьшению размеров частиц наносов, а к изменению естественных наносов искусственными, обладающими меньшим удельным весом и большей

подвижностью по сравнению с естественными. Так, в качестве наносов применяют на модели предварительно вымоченные древесные опилки, толченый шлак или пемзу, янтарный порошок и другие материалы.

В связи с этими сложностями каждая из лабораторий, проводящих такие исследования, вырабатывает свою методику исследований на моделях с размываемым руслом .

24 3.3.6. Условия подобия шероховатости

При моделировании русловых потоков для обеспечения подобия шероховатости на модели, казалось бы надо воспроизвести высоту выступов шероховатости, уменьшенную в λ_x раз. Однако такой путь не может дать положительных результатов по ряду причин, отмеченных ниже.

При разработке многочисленных формул для вычисления значений коэффициента Шези C в большинстве формул величина шероховатости характеризуется коэффициентом шероховатости n , который является комплексной характеристикой и не может определяться только высотой выступов.

Старание многих исследователей (Никурадзе, Зегжда и др.) найти возможность оценки величины шероховатости высотой выступов пока невозможно признать успешными, потому что в результате экспериментов они вынуждены были перейти от высоты выступов к оценке шероховатости с помощью условных характеристик (эквивалентная высота выступов, эффективная и т. и.), которые, кроме высоты, неявно отражают влияние других факторов и носят индивидуальный характер, связанный с условиями эксперимента.

Рядом опытов обнаружено , что при оценке шероховатости с помощью коэффициента шероховатости n надо учитывать не только высоту выступов шероховатости, но и их форму, плотность и характер расположения выступов. Но разработка таких приемов еще не доведена до

возможности их широкого практического использования как в расчетах, так и в моделировании. Поэтому уменьшение высоты выступов шероховатости на модели с учетом всех других факторов, характеризующих степень влияния шероховатости на величину гидравлического сопротивления, практически неосуществимо.

В настоящее время при лабораторных исследованиях русловых потоков вместо моделирования шероховатости широко пользуются моделированием величины коэффициента Дарси λ , подбирая опытным путем соответствующую шероховатость. Это оказывается не так сложно, тем более, что значение этого коэффициента в нормальных условиях (при отсутствии искажения масштаба) для модели оказывается равным натурному коэффициенту.

Шероховатость модели может быть определена на основании зависимости коэффициента Дарси λ от числа Рейнольдса Re , полученной путем многочисленных исследований при различной шероховатости и форме русла и имеющей вид

$$\lambda = \frac{2gRI}{u^2} = f(Re, \frac{k}{R})$$

где k – величина среднего выступа шероховатости; $\frac{k}{R}$ – относительная шероховатость. Пользуясь масштабными соотношениями, формулу можно переписать в следующем виде:

$$\lambda = \frac{2gR_M i}{u_M^2} = \frac{2g(a_l^{\frac{1}{2}})^2 R_H I}{U^2 a_l} = \frac{2gR_H I}{U^2} = \lambda_H$$

Следовательно, шероховатость модели можно подобрать, зная величину коэффициента Дарси в натуре, или определяя его по формуле, таким образом, чтобы

$$\lambda_M = \lambda_H$$

Вследствие отсутствия вполне надежных формул в лабораториях часто применяется экспериментальный метод предварительного подбора шероховатости, заключающийся в сопоставлении получаемых на модели уклонов при разной шероховатости с натурными уклонами, определенными при соответствующих расходах.

При неправильном подборе шероховатости не будет обеспечено равенство уклонов модели и натуры. В этих случаях пересчет на натуру результатов, полученных из опытов на модели, следует производить,

исходя из следующего: $U = C_H \sqrt{R_H I} = \sqrt{\frac{2g}{\lambda_H}} \sqrt{R_H I}$;

$$u = \sqrt{\frac{2g}{\lambda_M}} \sqrt{R_M I} \text{ . откуда } a_u = \sqrt{\frac{\lambda_M}{\lambda_H}} \sqrt{\frac{R_H I}{R_M i}} = \sqrt{\frac{\lambda_M}{\lambda_H}} \sqrt{a_i a_i}$$

В соответствии с этим изменяются и все формулы для вычисления масштабных отношений остальных характеристик потока.

25 3.3.7. Условия отсутствия кавитации

Явление кавитации — образование пустот внутри жидкости, заполненных ее парами при понижении в ней давления до величины, соответствующей упругости насыщенных паров при данной температуре — может привести к повреждению поверхности русла, сооружения, стенки трубопровода. Такая опасность возникает в связи с тем, что при восстановлении давления захлопываются пузырьки4 водяного пара, образующиеся в потоке. При этом происходит обратный переход пара из газообразного состояния в жидкое в форме ударов, которые и вызывают повреждение твердых поверхностей.

Это явление почти не встречается в русловых безнапорных потоках (за исключением горных рек, быстротоков и т. п.) и поэтому при гидрологических исследованиях с ним не приходится иметь дела. Но оно

имеет место при протекании воды через гидротехнические сооружения, напорные трубопроводы (насосы), сифоны и в ряде других случаев.

Нижняя граница поверхностной скорости, при которой не могут образовываться волны

При моделировании волнового процесса поверхностная скорость потока на модели должна быть более 0,23 м/с, иначе на поверхности жидкости на модели не будут образовываться волны и, следовательно, не будет выполняться подобие свободной поверхности в натуре и на модели. Это необходимо иметь в виду, например, при изучении обтекания выправительных сооружений на реках, мостовых опор, перемычек и т. п.

26 3.3.8. Расчет моделей речных русел с неразмываемым ложем.

Лабораторные исследования на сравнительно небольших моделях создают возможность не только систематического изучения руслового процесса, но и выделения отдельных факторов, оказывающих влияние на ход изучаемого процесса, что не всегда удастся сделать в натуре. Весьма существенной является также возможность проведения параллельных исследований в лаборатории и на реке, проверяющих и дополняющих друг друга. Наконец, большое значение имеют сокращенные сроки протекания изучаемого процесса *на модели по сравнению с натурными.

Таким образом, лабораторные исследования могут рассматриваться как существенная часть комплекса речных исследований.

В современных условиях лабораторные исследования речных потоков осуществляются на моделях с неразмываемым и размываемым ложем (жестких и размываемых), устраиваемых в неискаженном и искаженном масштабах и на напорно-воздушных моделях.

При этом следует отметить, что лабораторные исследования речных русловых водотоков весьма часто связаны с изучением взаимодействия потоков с моделями всякого рода гидротехнических сооружений. Изучение

руслоформирующего действия потока осуществляется на русловых моделях, расчет которых выполняется по специальным правилам

Задача расчета неразмываемых русловых моделей заключается в определении масштаба модели и характера ее поверхности, обеспечивающих наличие подобия при заданных плановых размерах моделируемого участка и гидравлических характеристиках потока в натуре. Для решения поставленной задачи должны быть заданы: 1) все характеристики и размеры объекта исследования (расход воды Q , скорость течения U , уклон свободной поверхности I и дна потока I_0 , гидравлический радиус R_H или площадь поперечного сечения Ω , вязкость воды или температура, поперечные и продольные профили); 2) размеры лабораторной русловой площадки (длина l , ширина b и глубина h) и предельный расход воды на модели $Q_{M \max}$.

Порядок расчета модели, по рекомендациям А. П. Зегжда, может быть следующий.

Исходя из размеров русловой площадки и наибольшего возможного расхода воды на модели $Q_{M \max}$ устанавливаются два предельных значения линейного масштаба:

$$a) \quad a'_{l1} = \frac{L}{l}, a''_{l1} = \frac{B}{b}, a'''_{l1} = \frac{H}{h};$$

$$b) \quad б) a_{l2} = \left(\frac{Q_H}{Q_{M \max}} \right)^{2/5}.$$

Из полученных a'_1 и a_{l2} выбирается наибольшее значение (наименьший масштаб) и оно принимается за предельно допустимый масштаб модели $a_{l \text{ доп.}}$.

По заданным натурным гидравлическим элементам потока определяется число Рейнольдса .

$$Re_H = \frac{UR_H}{\nu_H} \text{ и коэффициент Дарси } \lambda_H = \frac{2g R_H I_H}{U^2}.$$

По этим значениям из графика Зегжда выражающего зависимость $\lambda=f$ ($Re, \frac{R}{k}$) можно найти величину $\frac{R}{k}$

Для квадратичной области значения можно найти также вычислением по формуле Зегжда

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda_H}} = 4 \lg\left(\frac{R}{k}\right) + 4,25$$

или по формуле В. Н. Гончарова

$$\lambda_H = \frac{I}{\left(4 \lg \frac{6,15H}{\Delta}\right)^2}$$

где H — глубина потока; Δ — абсолютная высота выступов шероховатости.

Принадлежность режима потока к квадратичной области сопротивления должна быть подтверждена сравнением Re_{KB} с минимальным значением для этой области Re_{KB} по графику или по формуле

$$Re_{KB} = \frac{63}{\sqrt{\lambda_H}} \left(\frac{R}{k}\right)$$

Значение Re_{KB} на графике находится по прямой, соответствующей заданным λ_H и Re_H в месте перехода от горизонтального участка к наклонному (слева).

Принимая масштаб скорости по Фрудру $a_u = a_l^{1/2}$, определяется для моделируемого потока

$$\frac{Re_M}{Re_H} = \frac{UR_H}{v_H} : \frac{UR_M}{v_M} = a_u a_R a_v^{-1} = a_l^{3/2} a_v^{-1}$$

Учитывая, что в натуре и на модели жидкость одинаковая (вода) и коэффициенты вязкости приближенно равны, т. е. $a_v \sim 1$ имеем

$$Re_M = Re_H a_l^{-\frac{3}{2}}$$

Для выбранного предельно допустимого масштаба

$$Re_{доп} = Re_H a_{l_{доп}}^{-\frac{3}{2}}$$

Основная задача расчета заключается в определении масштаба

модели a_i и характера ее поверхности, при которых $\left(\frac{R}{k}\right)_M$ и Re_M

отвечали бы значению коэффициента Дарси λ , удовлетворяются условию $\lambda_m = \lambda_n$.

Проверка обеспеченности подобия модели натуре производится путем сопоставления $Re_{доп}$ и $Re_{кв}$, $Re_{гл}$ и $Re_{кр}$ с помощью графика Зегжда. $Re_{гл}$ — значение Re , при котором гладкое русло имеет λ равное натурному. Это значение соответствует точке пере $\lambda = f(Re, \frac{R}{k})$ с участком кривой, соответствующей гладкому руслу или же оно может быть определено по формуле Зегжда

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda_n}} = 4 \lg(Re_{гл} \sqrt{\lambda_n}) + 2,0.$$

Если в пределах турбулентной области такая точка отсутствует, то за нижний предел вместо $Re_{гл}$ берется $Re_{кр}$ из графика или принимается $Re_{кр} \sim 1000$.

Сопоставление этих характеристик приводит к возможности существования четырех случаев.

1 случай: $Re_{доп} > Re_{кв}$. В данном случае можно рассчитывать на полное подобие, так как Re_M попадает на участок графика (горизонтальная прямая), соответствующий автомодельной области. Для подобия необходимо иметь на модели $Re_M > Re_{кв}$ и подобрать шероховатость из условия

$$\left(\frac{R}{k}\right)_n = \left(\frac{R}{k}\right)_m.$$

При этом в правильно спроектированной модели автоматически будет обеспечено $\lambda_m = \lambda_n$

Масштаб модели определится, исходя из значения числа Рейнольдса для модельного потока (Re_M), равного минимально допустимому для области квадратичного сопротивления $Re_M = Re_{кв}$. Тогда искомый масштаб линейного размера будет $a_l = \left(\frac{Re_n}{Re_M}\right)^{2/3}$

$$\text{И шероховатость модели получится из условия } k_M = \frac{R_M}{\left(\frac{R}{k}\right)_n} = \frac{R_M}{a_l \left(\frac{R}{k}\right)_n}.$$

Затем по зависимости Зегжда $k=f(d)$, определяется крупность песка для устройства шероховатости ложа модели.

Так как устройство шероховатости путем наклейки зерен песка связано с техническими трудностями, то в лабораториях широко применяются модели с бетонной штукатуркой.

В этом случае масштаб модели выбирается так, чтобы число

Re_M и величина $\frac{R}{k}$ обеспечили согласно графика (рис. 2)

Для этого необходимо задаться рядом значений Re_M

задаться рядом значений k_M в пределах от $Re_{г\text{л}}$ до $Re_{\text{доп}}$ и для каждого из этих значений определить:

$$a_l = \left(\frac{Re_H}{Re_M} \right)^{2/3}, \left(\frac{R}{k} \right)_M = \frac{R_H}{a_l k_M},$$

где $k_M = 0,75$ мм для бетонной штукатурки без ожелезнения и $k_M = 0,65$ мм для бетонной штукатурки с ожелезнением. Для всех Re_M и вычисленной $\left(\frac{R}{k} \right)_M$ Дарси на модели и строится график зависимости $\lambda_M = f(a_l)$, по которому и находится искомый масштаб модели, отвечающий условию $\lambda_M = \lambda_H$.

2 случай: $Re_{г\text{л}} < Re_{\text{доп}} < Re_{кв}$. В данном случае возможны

те же решения, что и рассмотренные в первом случае. При расчете бетонной модели поступают так же, как было указано выше, а при модели с наклеенным песком следует задаваться не $Re_{кв}$, а любым Re в пределах от $Re_{г\text{л}}$ до $Re_{\text{доп}}$

3 случай: $Re_{кп} < Re_{\text{доп}} < Re_{г\text{л}}$. В этом случае даже очень гладкая поверхность модели имеет преувеличенное, по отношению к натуре, сопротивление. Модель проектируется с геометрическим искажением масштабов, либо без геометрического искажения масштабов, но с искажением масштаба уклона или скорости.

случай: $Re_{\text{доп}} < Re_{\text{кр}}$. При этом моделирование возможно только при искажении масштабов.

Вышеизложенные соображения относятся к расчету модели для одного определенного режима потока, характеризуемого заданными гидравлическими элементами. Ясно, что при изменении режима получится та или иная степень искажения гидравлической картины потока.

Поэтому при расчете модели приходится принимать за основу какой-то «средний», наиболее существенный для данной задачи режим, или, производя расчет для ряда режимов, принять масштаб модели на основе анализа полученных результатов.

Важное значение при устройстве модели имеет подобие граничных условий (входа и выхода потока на модели). Неправильное их расположение, недостаточная длина начального и конечного участка * модели, необеспечение спокойного поступления потока на модель ведут к искажению гидравлической картины потока. К числу мероприятий, устраняющих эти недостатки, относятся: обеспечение достаточной длины начального и конечного участков модели и перпендикулярности расположения динамической оси потока к линии фронта поступления воды на модель; создание успокоителей перед входом на модель в виде решеток, забральных перегородок и приспособлений для равномерного растекания воды, поступающей на модель из головного устройства; обеспечение правильного расхода на выходе с модели и др. Рекомендации разных авторов в отношении достаточной для выравнивания струй длины входного участка дают существенные колебания, изменяясь примерно от 10 до 50 глубин потока на модели.

Хорошим средством проверки гидравлической картины моделируемого потока служит сопоставление эпюр распределения скоростей модельного и натурного потоков, но оно требует достаточно подробных полевых гидрологических и топографических материалов.

В настоящем пособии ограничимся изложением лишь одного метода расчета неразмываемых моделей без искажения масштабов, разработанного А. П. Зегжда. В практике лабораторного экспериментирования применяются также и другие методы расчетов моделей, которые изложены в специальной литературе, а также в статьях, публикуемых в периодических изданиях.

27 3.3.9. Моделирование движения потока в открытом русле с искажением масштабов.

При расчетах русловых моделей часто встречаются затруднения в отношении выбора достаточно крупного масштаба модели, обеспечивающего наличие подобия гидравлических процессов и возможности применения соответствующих правил моделирования. Это обычно обуславливается ограниченностью лабораторных возможностей и соображениями экономического порядка. При малых масштабах модели глубины и скорости часто настолько уменьшаются, что оказываются не обеспеченными условия турбулентного режима.

В этом случае приходится применять искажение масштабов, дающее возможность получить большие глубины и скорости на модели.

Существуют различные методы искажения масштабов, заключающиеся: в изменении одного вертикального масштаба, в изменении вертикального и плановых масштабов, в искажении уклона и др.

Здесь рассматривается наиболее распространенный метод, состоящий в изменении только вертикального масштаба модели путем его увеличения по отношению к масштабу плановых размеров.

Отечественные и зарубежные лаборатории обычно не применяют искажение более чем в 3—5 раз, но в практике работы лабораторий США искажение масштабов допускалось даже до 25 раз.

Специальные исследования влияния искажения вертикального масштаба на гидравлическую картину потока показали необходимость

соблюдения осторожности при применении больших искажений масштаба. При производстве исследований, связанных с изучением руслоформирующих процессов, где кривизна русла играет существенную роль, искажение масштабов применять не следует. Особенно сложен вопрос о применении искажения масштабов при моделировании узлов гидротехнических сооружений.

В имеющихся работах по вопросу моделирования русловых потоков с искажением масштабов предлагаются различные методики расчета моделей.

Обычно применяемые правила моделирования с искажением масштабов основываются на пропорциональности потерь напора квадрату средней скорости потока.

Так как потери напора для потоков со свободной поверхностью определяются перепадами пьезометрических высот или перепадом горизонтов, то для случая искажения только вертикального масштаба в формулу в качестве линейной характеристики войдет h и формула масштабного множителя для скорости примет следующий вид:

$$a_u = \sqrt{a_h} = a_h^{1/2}.$$

где a_h — масштабный множитель для вертикальных линейных характеристик (глубин).

Принимая во внимание, что продольное масштабное отношение a_l ; и поперечное — a_b не искажаются, т. е. $a_l = a_b$ то для масштабного множителя поперечного сечения потока получим формулу

$$a_\omega = a_h a_b$$

Тогда масштабный множитель для расходов

$$a_Q = a_u a_\omega = a_l a_l^{3/2}$$

Масштабный множитель для уклонов можно получить из выражения

$$a_i = \frac{I}{i} = \frac{Hl}{hL} = a_h a_l^{-1}$$

Расчет модели с искаженным масштабом сводится к выбору масштабов a_l a_h и шероховатости русла. При этом основными ограничительными условиями, как и без искажения масштаба, являются лабораторные возможности (размеры русловой площадки и предельный расход Q_M), обеспечение турбулентного режима ($Re > Re_{кр}$) и характера движения (Fr) на модели.

В ходе расчета, исходя из лабораторных условий, устанавливается плановый масштаб модели $a_{l\text{доп}}$. Затем, пользуясь соотношениями

$$\frac{Re_H}{Re_M} = \frac{UR_H v_M}{uR_M v_H} = a_u a_h = a_h^{3/2}; \quad a_h = \left(\frac{Re_H}{Re_M}\right)^{2/3}$$

$$\text{И } a_Q = a_h^{3/2} a_l \text{ или } a_h = \left(\frac{a_Q}{a_l}\right)^{2/3},$$

Задаются разными значениями a_h в пределах

$$\left(\frac{Re_h}{1000}\right)^{2/3} > a_h > \left(\frac{a_Q}{a_l}\right)^{2/3}$$

Для каждого значения a_h мы вычисляем

$$Re_M = \frac{R_H}{a_h^{3/2}}$$

и относительную шероховатость модели, установив предварительную величину абсолютной шероховатости k_M , соответствующую характеру выбранной поверхности модели,

$$\left(\frac{R}{k}\right)_M = \frac{R_H}{a_h k_M}$$

После чего, пользуясь вычисленными по формулам значением Re_M и относительной гладкостью, по графику Зегжда (см. рис. 36) определяют значения λ_M отвечающие соответствующим значениям a_h , и строят по полученным данным кривую $\lambda_M = f(a_h)$

Основные расчетные формулы могут дать правильные результаты при условии

$$\sqrt{\frac{a_h}{a_l}} \sqrt{\frac{\lambda_M}{\lambda_H}} = 1 \text{ или } \frac{\lambda_M}{\lambda_H} = \frac{a_l}{a_h}.$$

По этому соотношению для каждого заданного значения a_h вычисляются соответствующие значения λ_m и строят вторую кривую $\lambda_m = f(a_k)$ так же на графике. Точка пересечения кривых определит искомое значение вертикального масштаба модели.

Здесь рассмотрен лишь один из существующих методов расчета модели с искажением вертикального масштаба, предусматривающий применение основных формул, позволяющих получить подобие потока, рассматриваемого как одно целое. В практической работе лабораториями применяются и другие методы, дающие при известных условиях приемлемые результаты.

28 3.3.10. Моделирование речных русел с размываемым ложем.

Вопросам движения наносов и деформации русла реки уделяется большое внимание не только при гидрологических исследованиях, но и при проектировании, устройстве и эксплуатации гидротехнических сооружений. Между тем теория механизма взвешивания и влечения наносов еще недостаточно разработана, чтобы можно было производить физически обоснованные и достаточно точные практические расчеты. Поэтому гидрологи и гидротехники вынуждены обращаться к эксперименту на модели, чтобы получить хотя бы качественное освещение интересующих их вопросов.

Большие трудности в этой области возникают и перед лабораториями. Уменьшение размеров наносов, соответственно масштабам моделирования, приводит к коренным изменениям физических свойств моделируемых наносов и исключает возможность достижения на модели подобия натурным процессам. Малые глубины и скорости потока на модели не позволяют воспроизвести подобный натуре турбулентный режим и, следовательно, приводя! к искажению механизма взвешивания, движения и отложения наносов, тесно связанного с турбулентностью потока. Мы лишены возможности создавать на модели местные возмущения, подобные

натурным, которые часто играют весьма существенную роль в изучаемых процессах.

Не намного лучше обстоит дело и с донными наносами. Те же трудности имеются в отношении выполнения геометрического подобия влекомых наносов, а малые величины уклонов, глубин и скоростей потока ведут к тому, что на модели часто не получается подобия движения наносов. Приходится прибегать к искажению масштабов и уклона и применять вместо песка специальные «рабочие смеси» из легкоподвижных материалов: вымоченных древесных опилок, измельченных пластмасс, пемзы, янтаря, канифоли и других материалов.

Ясно, что эти обстоятельства вносят искажения в характер явления и заставляют ограничиваться исследованиями качественной стороны явления.

Методика моделирования размываемых русел разработана еще недостаточно, и многое здесь находится в стадии поисков.

При моделировании размываемых русел к выбору масштаба модели добавляется еще ряд вопросов, к которым относятся, например, выбор подвижной «рабочей смеси», используемой для формовки русла модели, подбор количества наносов, подаваемых на модель, выбор масштаба времени и др.

Последний вопрос имеет также существенное значение потому, что при пользовании правилами моделирования Фруда продолжительность одного опыта, соответствующая времени прохождения паводка, формирующего русло, может оказаться равной нескольким дням. Такая продолжительность опыта практически

не приемлема, поэтому приходится прибегать также и к искажению масштаба времени.

Производимые в гидролабораториях исследования, связанные с деформацией русла, можно разделить на два вида:

а) исследования действия потока на подвижное русло с целью относительной оценки размывающей силы потока;

б) исследования, имеющие целью изучение руслоформирующего действия потока.

К первому виду относятся исследования над моделями гидротехнических и гидрометрических сооружений, связанные с гашением энергии переливающегося или проходящего через них потока и имеющие целью установление мероприятий, предохраняющих эти сооружения от подмыва.

В этом случае изменение формы и глубины размыва русла за сооружением служит для сравнения работы различных вариантов конструкций испытываемого сооружения. Минимальная глубина размыва очевидно характеризует наилучшую конструкцию. «Рабочая смесь» размываемой части русла может быть произвольной крупности, важно обеспечить ее подверженность размыву при имеющихся на модели скоростях потока.

Несмотря на то, что метод носит качественный характер, он широко распространен при гидротехнических лабораторных исследованиях.

Подобные исследования обычно сопровождаются измерением скоростей, так как характер их распределения в поперечном сечении потока обуславливают степень размыва русла за сооружением.

Исследования второго вида ставятся с целью изучения изменений формы русла, получающихся в результате взвешивания, передвижения и отложения наносов. Эти исследования сопровождаются обычно предварительными опытами, задачей которых является выбор «рабочей смеси» и сравнение результатов формирующей деятельности натурного потока за имеющийся в распоряжении исследователя период с соответствующими результатами смоделированного потока. Все эти исследования носят качественный характер.

Опубликованные некоторыми исследователями методы расчета размываемых моделей основаны на нестрогом соблюдении законов подобия и правил моделирования и часто включают недостаточно физически

обоснованные допущения. Поэтому эти методы не могут быть рекомендованы для их широкого практического применения. В каждой лаборатории, проводящей такие исследования, имеется своя частная методика, основанная на некоторых теоретических предпосылках и длительном опыте применения в данной лаборатории. Этим преимущественно и объясняется получаемое во многих случаях положительное решение сложных задач моделирования размываемых русловых потоков.

4. Обработка полученных данных и анализ

4.1 результаты моделирования.

Во время прохождения практик по получению первичных профессиональных умений и навыков по методам и средствам гидрометеорологических измерений зимней и летней практике, студентами и в частности мной были измерены расходы воды на р. Оредеж в районе базы практик РГГМУ. Измерений очень много, взяли последние измерения с 2015 по 2018 год. По результатам этих измерений была составлена таблица измеренных расходов воды. После обработки данных и построения кривых, кривые оказались плохими. Это связано с тем, что р. Оредеж зарастает, на данной реке так же есть ледовые явления. При всем этом есть переменный подпор. Так как это все сильно влияет на наши кривые, поэтому, как было уже много раз доказано, правильные кривые $Q=f(H)$ на р. Оредеж не построить.

Ниже представлена таблица для построения графиков.

дата	H, м БС	Q, м ³ /с	w, м ²	V _{ср} , м/с	B, м	h _{ср}
10.07.2015	91,43	3,58	23,22	0,154177	14,2	1,25
19.07.2015	91,42	3,97	23,72	0,167369	19,1	1,28
21.07.2015	91,47	4,47	24,71	0,180898	14,4	1,33
08.02.2016	91,46	3,55	25,06	0,14166	15,5	1,35
11.02.2016	91,45	5,78	27,37	0,21118	16,5	1,47
09.07.2016	91,61	4,95	25,61	0,193284	18,6	1,38
13.07.2016	91,54	4,48	23,05	0,19436	18,9	1,24
18.07.2016	91,56	4,75	24,81	0,191455	19,6	1,33

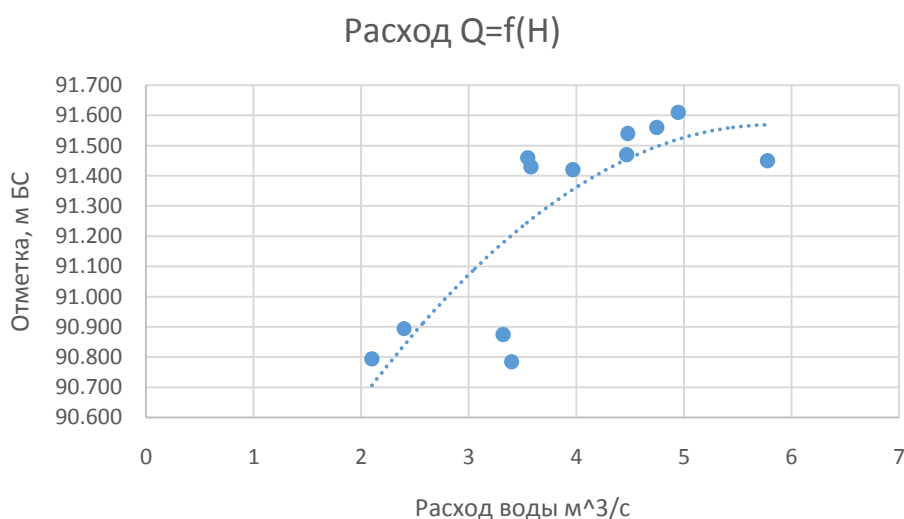


Рисунок 4.1 График зависимости расхода воды от уровня.

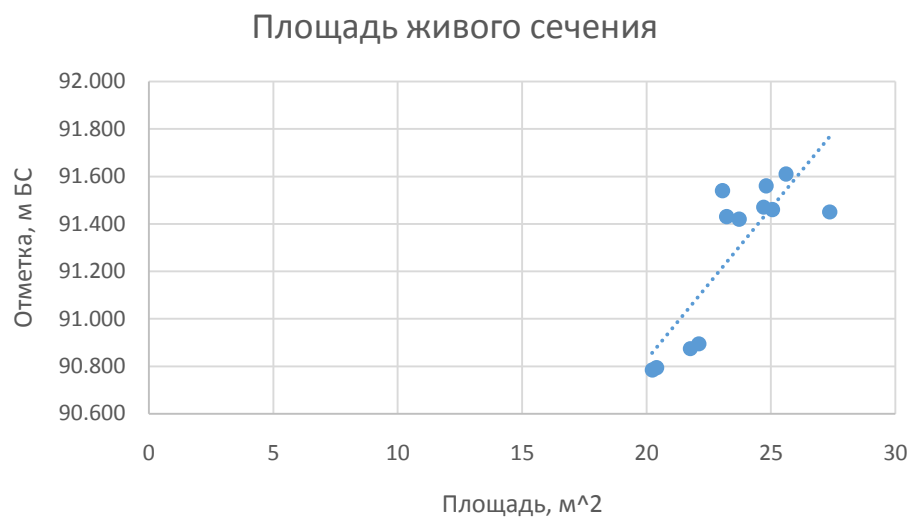


Рисунок 4.2 График зависимости площади живого сечения от отметки.

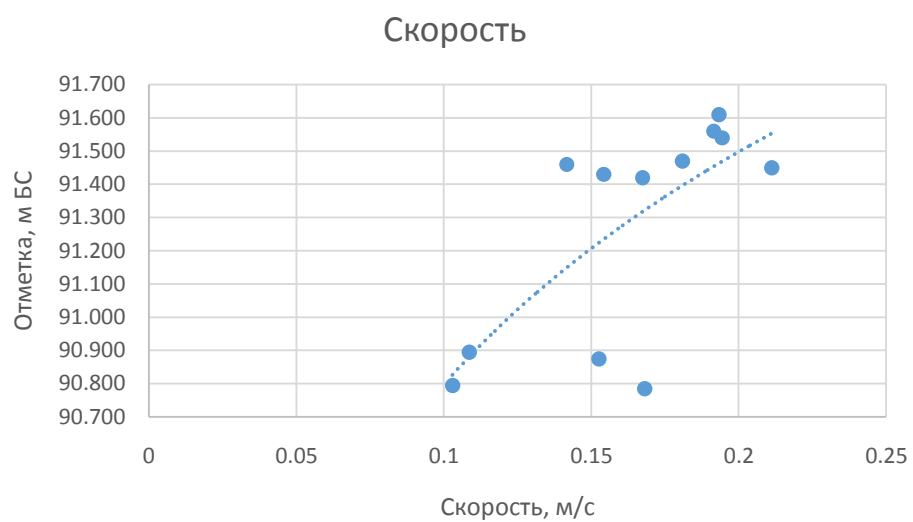


Рисунок 4.3 График зависимости скорости от отметки

После создания модели была произведена серия экспериментов, основной задачей которых было измерение расходов и скоростей при разных уровнях для построения графика $Q = f(H)$ для модели р. Оредеж. По данной таблице.

дата	H, м БС	Q, л/с	w, м ²	V _{ср} , м/с	B, м	h _{ср}
10.07.2015	90,300	0,183333	0,002865	0,064	14,2	0,020173
19.07.2015	90,780	0,95	0,004524	0,21	19,1	0,023685
21.07.2015	90,340	0,24	0,002963	0,081	14,4	0,020576
08.02.2016	90,400	0,33	0,003143	0,105	15,5	0,020276
11.02.2016	90,500	0,49	0,0035	0,14	16,5	0,021212
09.07.2016	90,680	0,66	0,004151	0,159	18,6	0,022317
13.07.2016	90,720	0,86	0,004343	0,198	18,9	0,022981
18.07.2016	90,850	1,100	0,004803	0,229	19,6	0,024508
23.07.2016	91,000	1,45	0,005431	0,267	20,4	0,026621

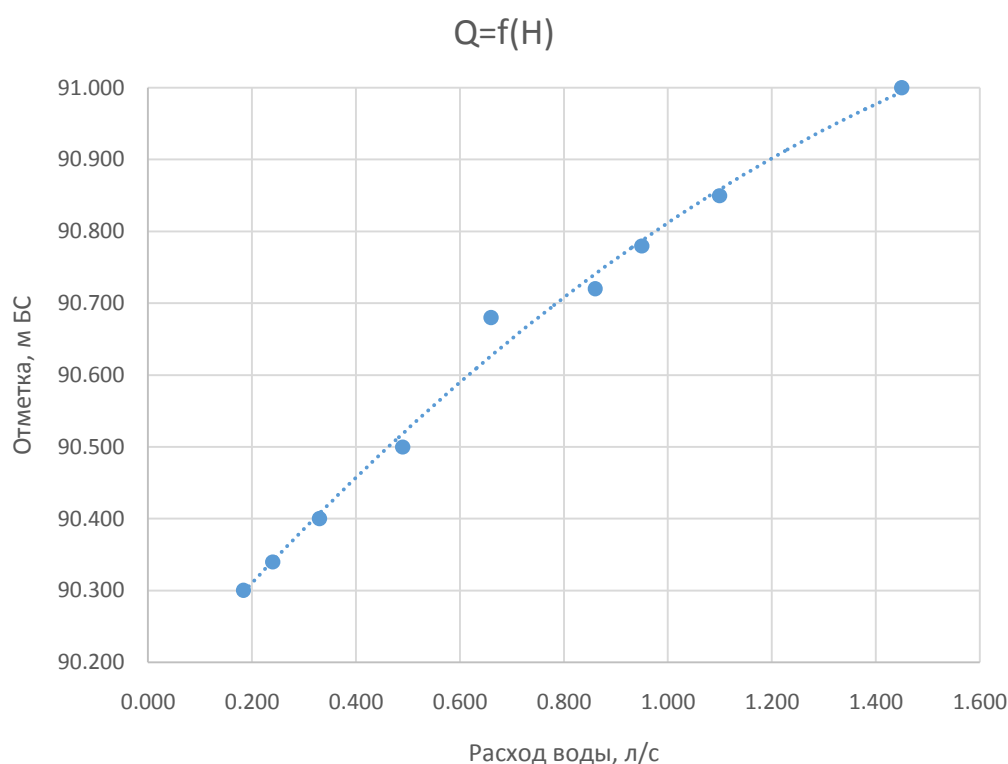


Рис. 4.4 график зависимости расхода воды от уровня.

Так же были построены следующие графики для модели :

Для площади живого сечения

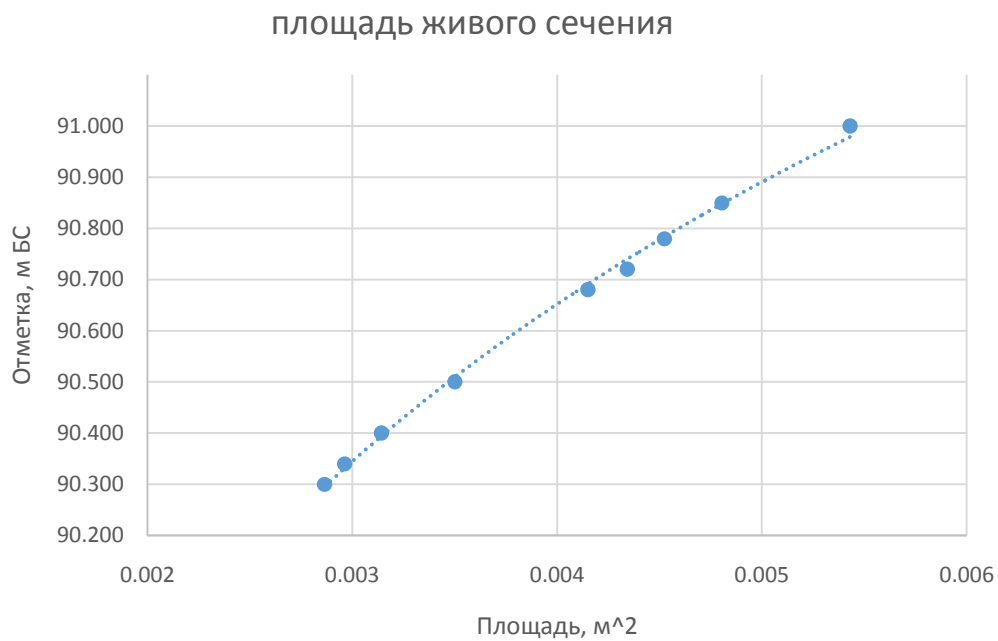


Рисунок 4.5 График зависимости площади живого сечения от отметки.

Для скорости на модели.

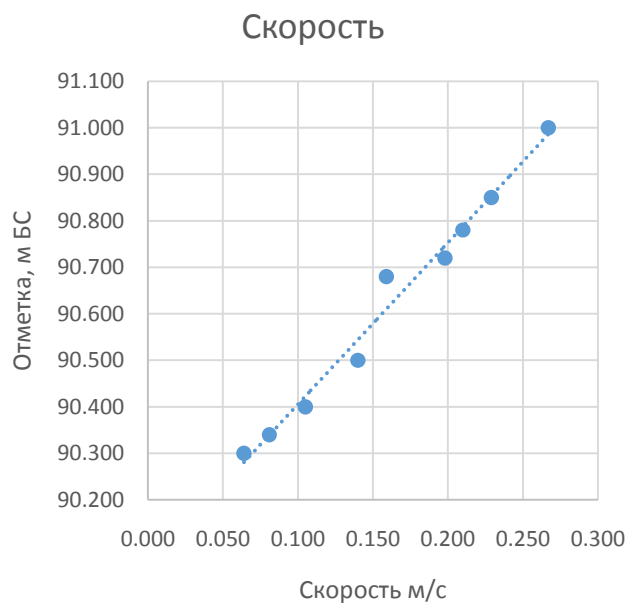


Рисунок 4.6 График зависимости скорости от отметки.

Отметку уровня воды мы снимали с помощью шпигенмасштаба.



Рисунки 4.7 - 4.8 Шпигенмасштаб.

Всего у нас есть 5 створов для измерений : створ #3; створ #4; створ Ватанин; створ #6 и створ “Пляж”.

В связи с тем, что наша модель не является завершенной, приходится создавать искусственный подпор, для того чтобы уровни воды и скорости были похожи на натурные данные полученные с р. Оредеж. Исходя из этого, створ “Пляж” не берем в расчет и у нас остается 4 створа. На модели же производились измерения скоростей с помощью микровертушки и определение расходов с помощью водослива Томсона.



Рисунок 4.6 Водослив Томсона.

4.2 Вывод из сравнения полученных данных

Наша модель р. Ордеж дает результаты схожие с результатами натурными, но наша модель пока не учитывает шероховатость, зарастание русла, переменный подпор. Как только мы научимся учитывать все эти факторы вполне вероятно, что мы сможем получать результаты очень похожие на натуру.

Заключение.

Исходя из всего вышесказанного и первых проведенных экспериментов : на начальном этапе, в самых маленьких уровнях воды то есть когда вода идет по основному руслу без выхода на пойму мы получаем соизмеримые результаты с натурой и это дает нам право сделать вывод о том, что моделью мы можем пользоваться, но для очень маленьких уровней воды. Дальнейшее развитие модели будет заключаться в бетонировании, учете таких важных факторов, как шероховатость, зарастание и переменного подпора. Эксперименты которые будут проводиться в дальнейшем – эксперименты при высокой воде с учетом вышеуказанных факторов .

Список использованной литературы.

1. Физическое моделирование гидравлических явлений, Михалев М.А., 2010.
2. Гидрологическое лабораторное моделирование, Полтавцев, Спицын, Винников, 1982
3. Гидрологическое лабораторное моделирование Ленинградский гидрометеорологический институт 1982 – 145 стр.
4. Владимиров А.М. Гидрологические расчёты. – Л.: Гидрометеоиздат, 1990. – 365 с.
5. Владимиров А.М., Дружинин В.С. Сборник задач и упражнений по гидрологическим расчетам. – СПб.: Гидрометеоиздат, 1992. – 208 с.
6. Евстигнеев В. М. Речной сток и гидрологические расчеты. – М.: Изд-во МГУ, 1990. – 304 с.
7. Международное руководство по методам расчета основных гидрологических характеристик. – Л.: Гидрометеоиздат, 1984. – 248 с.
8. Методические рекомендации по определению расчетных гидрологических характеристик при наличии данных гидрометрических наблюдений. – Нижний Новгород: Вектор-ТиС. 2007. – 134 с
9. Ресурсы поверхностных вод СССР. Гидрологическая изученность. Карелия и Северо-Запад. – Л.: Гидрометеоиздат, 1965.
10. Ресурсы поверхностных вод СССР. Т. 2. Карелия и Северо-Запад. Ч. 2. Приложения. – Л.: Гидрометеоиздат, 1972
11. Ресурсы поверхностных вод СССР. Т. 2. Карелия и Северо-Запад. Основные гидрологические характеристики (до 1962 г., за 1963-70 гг., за 1971-75 гг.) – Л.: Гидрометеоиздат, 1966, 1974, 1978.

