



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

Кафедра гидрометрии

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
(бакалаврская работа)

На тему **Гидравлические**
сопротивления зарастающих
русел малых рек

Исполнитель Баскакова Анастасия Ивановна
(фамилия, имя, отчество)

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

Исаев Дмитрий Игоревич
(фамилия, имя, отчество)

«К защите допускаю»
Заведующий кафедрой

(подпись)

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

Исаев Дмитрий Игоревич
(фамилия, имя, отчество)

«__» _____ 20__ г.

Санкт–Петербург
2018

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	3
1 ГИДРАВЛИЧЕСКИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ ЗАРАСТАЮЩИХ РУСЕЛ.....	5
1.1 ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ.....	7
1.2 МЕТОДИКИ РАСЧЕТОВ СОПРОТИВЛЕНИЯ ЗАРАСТАЮЩИХ РЕЧНЫХ РУСЕЛ.....	13
1.3 ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ВЫСШЕЙ ВОДНОЙ РАСТИТЕЛЬНОСТИ НА УЧАСТКЕ Р. ОРЕДЕЖ.....	20
1.3.1 Физико-географическое описание реки Ордеж.....	20
1.3.1.1 Геология.....	20
1.3.1.2 Почвенный покров.....	21
1.3.1.3 Флора.....	22
1.3.1.4 Климат.....	22
1.3.1.5 Описание реки Ордеж.....	23
1.3.1.6 Изучение сопротивления заросшего речного русла реки Ордеж.....	25
1.3.1.7 Водная растительность, произрастающая на участке исследования...	27
2 ПРОВЕДЕНИЕ НАТУРНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА.....	33
3 ПРОВЕДЕНИЕ ЧИСЛЕННОГО ЭКСПЕРИМЕНТА.....	40
ВЫВОД.....	52
СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	54
Приложение 1.....	56
Приложение 2.....	57

ВВЕДЕНИЕ

Наша страна является одной из самых водообеспеченных стран в мире. На территории России протекает более 2,8 миллионов рек, их общая длина составляет 12,4 миллиона километров, а суммарный годовой сток рек составляет 4259 км³. Большая часть этих рек находится в умеренном климатическом поясе, и соответственно с этим, подвержена зарастанию в теплый период года. И, если на большие реки подводная растительность оказывает незначительное влияние, гидравлические характеристики малых рек сильно зависят от роста водолюбивой растительности в их русле. Зарастание прямым образом влияет на коэффициент шероховатости.

В наше время для учета сопротивления используются таблицы коэффициентов шероховатости речных русел, разработанные в СССР Карасевым И.Ф, Срибным М.Ф., и таблицы, разработанные заграничными специалистами В.Т. Чоу, Дж. Бредли и другими. Однако они содержат в себе много обобщений и неточностей, которые могут привести к использованию в расчетах далеких от реальности коэффициентов шероховатости, и, как следствие, к ошибкам в вычислении стока. Несовершенство используемых методик можно объяснить эмпирическим способом их составления, что является распространенным явлением среди многих методик XX века и ранее. Однако, благодаря многолетнему изучению физических процессов, протекающих в речных руслах, доступности использования современных технологий и развитию математического моделирования методики по учету сил трения в руслах можно уточнить.

Целью данной выпускной квалификационной работы является рассмотрение русловых процессов при разных видах взаимодействия подводной растительности:

- наблюдение за речным руслом, полностью поросшим водной растительностью;
- наблюдение за речным руслом, подвергшимся прокосам водной растительности;
- наблюдение за речным руслом, водная растительность которого изогнулась под действием больших скоростей течения, тем самым образовав густой органический массив.

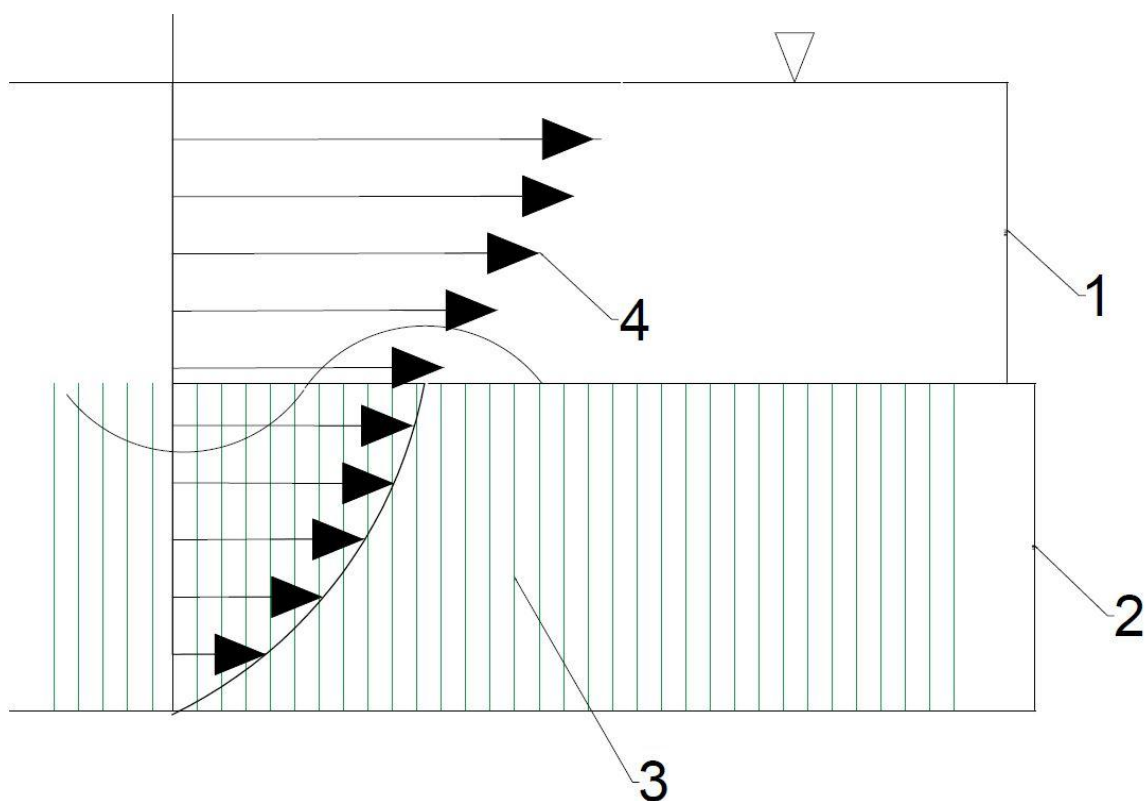
Несмотря на то, что эмпирический метод может быть несовершенен, от него нельзя отказаться, тем более, что сейчас он подразумевает под собой более высокотехнологичные технологии, которые позволяют зайти за рамки ранее возможных для рассмотрения процессов. Так что, степень точности увеличивается за счет использования современных технологий, в частности, подводной фотосъемки, и делает эксперимент в целом более близким к правде.

По причине того, что подобные исследования только начинают проводиться, и, тем более, на рассматриваемом участке такие эксперименты новы, нельзя говорить о каких-то глобальных достижениях, так как статистики пока недостаточно. Однако ранее предполагаемые общие тенденции уже прослеживаются, и при дальнейших исследованиях они могут принести существенные плоды.

1 ГИДРАВЛИЧЕСКИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ ЗАРАСТАЮЩИХ РУСЕЛ

Современный уровень понимания параметров течения воды в зарастающих речных руслах не позволяет составлять точные и полностью обоснованные физически инженерные расчеты и разрабатывать некие положения о гидродинамических закономерностях русловых потоков. Данные трудности разработки положений возникают по той причине, что поросшие растительностью речные русла имеют достаточно сложное строение течения, и воздействие различных факторов растительности затруднительно анализировать и схематизировать [2]. Наиболее затруднительным является пространственное русловое течение, которые частично поросли растительным покровом в береговой части русла.

Исследования, произведенные на сегодняшний день, позволяют рассматривать поток в широком русле, которое местами поросло по глубине, как совокупность двух потоков с взаимосвязанными характеристиками: потока над растительным слоем и потока в растительном слое. Схема совокупностей потоков наглядно представлена на рисунке 1. Также, данные потоки между собой имеют динамическую связь.



- 1 – поток над растительным слоем;
- 2 – поток, проходящий через растительный слой;
- 3 – растительный слой;
- 4 – эпюра скоростей потока

Рисунок 1. Схематизация течения в заросшем русле

На поток в области растительного слоя влияют два фактора: трение, создаваемое растительностью и трение по донной поверхности. Предположим, что поток над растительным слоем сходен в условиях течения с классическим открытым потоком воды в жестком русле. Однако, стоит отметить, что в нижней части этого потока на уровне начала соприкосновения с растительным слоем мы имеем ненулевую скорость. Стоит отметить, что подвижность верхней части растений под воздействием потока изменяет значение шероховатости граничной поверхности и оказывает непосредственное влияние на строение турбулентного режима в верхнем потоке.

В отдельных случаях, когда над слоем растительности имеется определенный слой воды, движение потока возбуждает в растительном слое волны, – как, например, волны, возникающие на полях во время сильного ветра. Воздействие волновых колебаний донной растительности на кинематику и динамику потока было теоретически и экспериментально изучено В.М. Лятхером и И.Н. Гуриным. Определено, что волны на поверхности растительности увеличивают скорость течения, то есть коэффициент трения меньше, если сравнивать с движением над статичной растительностью. Это обусловлено тем, что волны распространяются в том же направлении, в котором течет вода.

За период вегетационного сезона воздействие растений на поток также различно, в период ее роста уровни воды увеличиваются, если сравнивать с не заросшим руслом, затем, в течение какого-то времени уровни не изменяются. В то же время в период паводков летом и осенью растения в русле реки уплотняются под влиянием большой масс воды. Это приводит к тому, что гидравлические сопротивления становятся меньше.

Затруднительным для рассмотрения и теоретического изложения является речной поток в пределах растительного слоя, где на характеристики течения влияет множество моментов, связанных с обтеканием растительных элементов, а также трение, создаваемое при взаимодействии потока и дна. Влияние различных моментов может варьироваться в зависимости от плотности растительности, ее типа, возраста, поверхности и также геометрии.

1.1 ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Заращение русел рек рассматривается как отдельный вид шероховатости, так как водная растительность создает дополнительное трение для руслового потока. Обычно в период межени зарастают русла малых и средних рек, но в отдельных случаях это явление наблюдается и в руслах больших рек [6].

На зарастание рек влияет ряд факторов, которые можно разделить на две группы – естественные и антропогенные. В общем, на степень покрытия водотоков растительность влияет ряд факторов, из которых можно выделить следующие, оказывающие наибольшее значение:

- Термический режим
 - Сток биогенов
 - Интенсивность руслового процесса
 - Степень освещенности
 - Химический состав воды
 - Антропогенное воздействие
- и другие.

Антропогенное воздействие следует выделить отдельно и разделить еще на две группы факторов – антропогенная деятельность на водосборе и антропогенное воздействие непосредственно на само русло реки. Деятельность человека, можно сказать, почти полностью дублируют природные факторы, влияющие на зарастание русла реки. Человеческая деятельность на водосборе оказывает влияние на изменение химического стока различных звеньев гидрографической сети и, следовательно, самой реки. Мелиоративные, дорожные и другие работы изменяют режим питания реки, впоследствии также воздействуя на температурный режим. Прямое воздействие хозяйственной деятельности на русло реки влияет как на режим питания высших водных растений посредством сброса в реку биогенов и других активных продуктов деятельности человека, так и изменяет местные морфологические особенности и русловой процесс на участке реки.

В нашей стране степень зарастания речных русел может изменяться в достаточно большом диапазоне, практически от полного зарастания до незначительной растительности по берегам рек.

Помимо количественной характеристики, описывающей покров подводной растительности, не стоит забывать и о качественной характеристике,

а именно о типе растений. Разные формы самих растений оказывают различное сопротивление на речной поток.

Водные растения по среде обитания можно разделить на следующие экологические группы [4]:

- Растения, плавающие на поверхности, имеющие очень слабые корни и берущие все питательные вещества из воды (высшие растения). Пример – растение ряска, которое можно встретить в стоячих водах.
- Растения, обитающие в толще воды, погруженные, также потребляющие все необходимые питательные вещества из воды. Пример – растение элодея. В толще воды она развивается в больших количествах и создает затруднения для рыбаков и судоходства, создавая запруды.
- Растения полупогруженные, укореняющиеся в грунте и имеющие мощную корневую систему. Пример – растение осока. Они могут опоясывать весь водоем, и их мощная корневая система часто используется водными животными в качестве пищи.

При достаточно большой плотности водной растительности в русле реки на нее особенно влияет ряд сопротивлений движению потока, обычно пренебрегая трением о дно. В таком случае баланс сил потока можно представить в виде формулы 1:

$$\rho ghI = \rho \frac{V_p^2}{2} s_m C_\varepsilon k_\varepsilon \frac{1}{M_p^2}, \quad (1)$$

где ρ – плотность воды;

g – ускорение свободного падения;

h – глубина потока;

I – гидравлический уклон;

V_p – средняя скорость в пределах растительного слоя;

$s_m = f(h_p, d_p)$ – площадь миделя растительного элемента высотой h_p и характерным диаметром d_p ;

C_3 – коэффициент гидравлического трения одного элемента;

k_6 – коэффициент взаимного влияния растительных элементов, который учитывает степень гидродинамического затенения одних элементов другими.

В.С. Боровков [2], допуская, что $\rho ghI = \lambda \rho \frac{V^2}{8}$, выражает коэффициент гидравлического трения λ в виде формулы 2:

$$\lambda = 4 \frac{V_p^2}{V^2} s_m C_3 k_6 \frac{1}{M_p^2}. \quad (2)$$

При этом λ на практике определяется из выражения 3:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 0.4 \left(\frac{h}{h_p} \right)^{\frac{1}{2} \sqrt{\lambda}} j, \quad (3)$$

где $j = \frac{M_p}{\sqrt{s_m C_3 k_6}}$ - коэффициент, который зависит от биометрических показателей растительности.

Учитывая уравнение 2, и применяя гипотезу замыкания Л. Прандтля, В.С. Боровков выражает распределение местных скоростей в растительном слое в виде уравнения 4:

$$\frac{u}{u_p} = 1 - \frac{\operatorname{sh} \frac{1}{\aleph j} \left(1 - \frac{z}{h_p} \right)}{\operatorname{sh} \frac{1}{\aleph j}}, \quad (4)$$

где $\aleph$ – постоянная Кармана.

На реке Оредеж было уточнено значение $\aleph$ для зарастающего русла по данным экспериментов РГГМУ. Для этого был использован прием, заданный еще Л. Прандтлем: расчетные профили увязывались подбором $\aleph j$ с местными скоростями, измеренными микровертушкой в толще водной растительности. В

результате произведенной работы удалось установить, что $\aleph < 0,4$ и в среднем составляет 0,2.

Растительность в русле реки как причина гидравлических сопротивлений может быть представлена:

- В виде совокупности введенных в поток продольных тормозящих поверхностей, которые в много раз увеличивают смоченный периметр русла (рисунок 2,а);
- В виде группы препятствий, создающих очаги местных сопротивлений (рисунок 2,б).

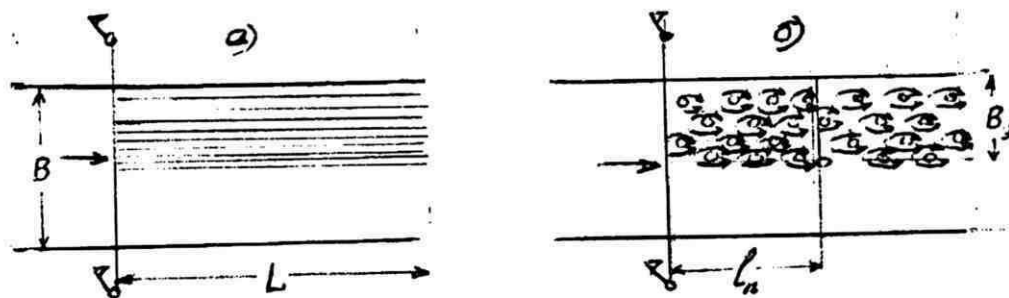


Рисунок 2. Виды схематичного изображения растительности

Первая совокупность наиболее хорошо изучена В.Н. Гончаровым. Ему удалось вывести формулы, которые позволяют рассмотреть коэффициенты шероховатости зарастающих русел n_p . В этом случае в зависимости от густоты и относительной высоты стеблей водных растений отношение n_p к коэффициенту шероховатости свободного русла могло составлять от 3 до 7,5, а в редких случаях достигать 30.

Устройство взаимодействия потока и водной растительности, их частных элементов и отдельных групп весьма сложное, по этой причине более жизнеспособна вторая схема – группа препятствий, которые создают сопротивление движению потока.

Явление зарастания принадлежит к процессам, происходящим в ландшафтной сфере, которые, в свою очередь, протекают под влиянием ряда климатических, геоморфологических, гидрологических и гидродинамических факторов. Прогресс водной растительности серьезно влияет на состояние и эволюцию речных экосистем. На сегодняшний день теоретических и практических знаний недостаточно для решения актуальных задач: требуются подробные гидравлические, русловые и гидроботанические полевые исследования. Но их проведение требует больших затрат времени и средств. По этой причине существенное значение имеют периодические гидрометрические наблюдения, которые выполняются на сети Росгидромета. Они важны по причине того, что их проведение базируется на единой методической основе и в течение всего годового гидрологического цикла, в том числе в период летне-осенней межени, во время которого и происходит зарастание русел рек.

Трудность изучения гидравлических сопротивлений очень важна для дальнейшей разработки методик расчета, потому что эти сопротивления влияют на всевозможные характеристики речного потока (скорость воды, расход воды, и так далее), и физику их вариаций.

В наше время для учета сопротивления используются таблицы коэффициентов шероховатости речных русел, разработанные в СССР Карасевым И.Ф, Срибным М.Ф., В.Т. Чоу, Дж. Бредли и другими [П1] [П2], однако эти таблицы далеки от реального сопротивления на заросших речных руслах на основании выявленных закономерностей.

Новая, разрабатываемая в нынешнее время методика подразумевает под собой ввод обеспеченных значений коэффициента шероховатости в определение расчетных уровней воды по формулам равномерного движения с последующим их использованием в расчётах обеспеченных расходов воды дождевых паводков по формулам, рекомендованных Сводом правил СП 33-101-2003. Так же, наша методика основана на расчетно-вычислительном факторе речного русла, при котором значения коэффициента шероховатости будут

зависеть от конкретных параметров потока и характеристик русла. Таким образом, новая методика с физической точки зрения будет более обоснована, и значения коэффициентов шероховатости будут оценены более объективно.

1.2 МЕТОДИКИ РАСЧЕТОВ СОПРОТИВЛЕНИЯ ЗАРАСТАЮЩИХ РЕЧНЫХ РУСЕЛ

Наблюдения за водным режимом и учет стока зарастающих рек производится на основе непрерывных измерений уровня воды и периодических измерений расходов воды. Владея рядами измеренных уровней (H_n) и расходов воды ($Q_{из}$), вычисляют ежедневный расход воды Q , посредством интерполяции $Q_{из}$ в интервале между их измерениями или строят временные кривые $Q = f(H)$, согласно различным фазам развития растений. Но самой большой популярностью пользуется следующая методика: измеренный в заросшем русле расход воды $Q_{из}$ относят к расходу воды Q_0 , определяемому по кривой расходов $Q_0 = f(H)$ для свободного русла при том же уровне, и получают так называемый коэффициент зарастания: $K_{зар} = Q_{из}/Q_0$ [1]. В интервале между измерениями ежедневные расходы воды определяются на основе интерполяции $K_{зар i}$ и установленных по кривой $Q_0(H)$ значений Q_0 для среднесуточных уровней H :

$$Q_i = K_{зар i} Q_{0i} \quad (5)$$

Из этого следует, что в речной гидрометрии $K_{зар}$ играет роль основной характеристики пропускной способности русла, причем считается, что он всегда уменьшается при увеличении растительности, то есть $K_{зар}$ не бывает больше единицы. Это условие подразумевает под собой расположение кривой $Q_0 = f(H)$ правее точек, соответствующих данным об измеренных при зарастании расходах воды. На практике же выходит так, что положение кривой $Q_0(H)$ в этой зоне нельзя предсказать. Кривую в зоне низких уровней строят,

экстраполируя верхнюю её часть, полученную до начала зарастания. Метод, следует полагать, весьма некорректен. Более того, как показали опыты А. Лудова, в результате полегания растений наблюдается уменьшение гидравлических сопротивлений. К сожалению, $K_{зар}$ во многом является формальной характеристикой, недостаточно полно отражающей реальные условия движения потока в заросшем русле. Его использование, как правило, не приводит к заметным искажениям результатов, за счет использования данных более частых измерений расходов воды. Сложность проблемы и приближенность ее решения требует перехода к более современным моделям учета стока. Одна из них разработана в ГГИ. Эта модель непосредственно учитывает сопротивления свободной от растительности части русла через коэффициент шероховатости n_0 , а так же потери энергии при обтекании структур, образованных растительностью, так называемых куртин, а не просто отдельных стеблей растений.

И.Ф. Карасев предложил свою расчетную зависимость для коэффициента шероховатости заросшего русла n_3

$$n_3 = \left[n_0^2 \left(1 - d_p \sqrt{\alpha_r + \frac{182h^{1/3}\alpha_r d_p h_p}{2g(\text{Re}10^{-3})^{1,2}}} \right) \right]^{0,5}, \quad (6)$$

где d_p, h_p, α_r – характеристики зарастания соответственно;

d_p – диаметр;

h_p – высота стеблей в м;

α_r – относительная густота водных растений (число водных растений на 1 м^2).

Величина коэффициента шероховатости n_3 зависит от фазы развития водной растительности. Шероховатость русла, с одной стороны, увеличивается с ростом массы растений, а с другой – уменьшается по мере их старения, полегания и срыва более ранних побегов. Эти процессы происходят

хронологически закономерно, так что изменение n_3 может быть представлено в виде конкретной функции от времени. Как оказывается, она сохраняет достаточно однородную аналитическую структуру в разные годы и для различных рек, если время от начала вегетации выражено в долях от общей продолжительности вегетации.

Одновременно с увеличением шероховатости, появление растений в речном русле приводит к уменьшению его живого сечения. В.А. Леонов отметил, что рост биомассы особенно интенсивен в начальной стадии развития. В течение первой четверти–трети вегетационного периода длина стеблей растений достигает 0,90–0,95 их предельного значения. Определяющим фактором при этом служит сумма среднесуточных температур воды после перехода их через значение 8–10°C.

Большое внимание проблемам гидравлических расчетов заросших русел уделяется в других странах. Одну из расчетных систем для оценки гидравлических сопротивлений в зарастающих руслах предложил А. Найт. Вводя ряд допущений, например, выбирая длину участка таким образом, что расположенных в ее пределах растений достаточно для полного перекрытия живого сечения русла, после некоторых преобразований получил следующее выражение:

$$\lambda_3 = \lambda_0(1 - d_p \sqrt{\alpha_r}) + \kappa_{\text{л}} \alpha_r d_p h_p, \quad (7)$$

где λ_0 – коэффициент сопротивления дна;

d_p – поперечный размер растений;

$\kappa_{\text{л}}$ – коэффициент лобового трения;

α_r – относительная густота водных растений;

h_p – высота водных растений в толще потока.

Нидерладские ученые проявляют к проблеме зарастания русел особый интерес. Обширная часть территории Голландии – это низменности, которые легко затопляемы при небольшом повышении уровня воды в реках. Поэтому,

как минимум, дважды за период теплого сезона на зарастающих реках проводится выкашивание водной растительности. Сроки выкашивания определяются гидрометеорологическими прогнозами и гидравлическими расчетами прохождения волн паводков. В качестве примера на рисунке 3 приведено изменение во времени отношения площади, занятой растительностью к общей площади сечения (W_r) [1]

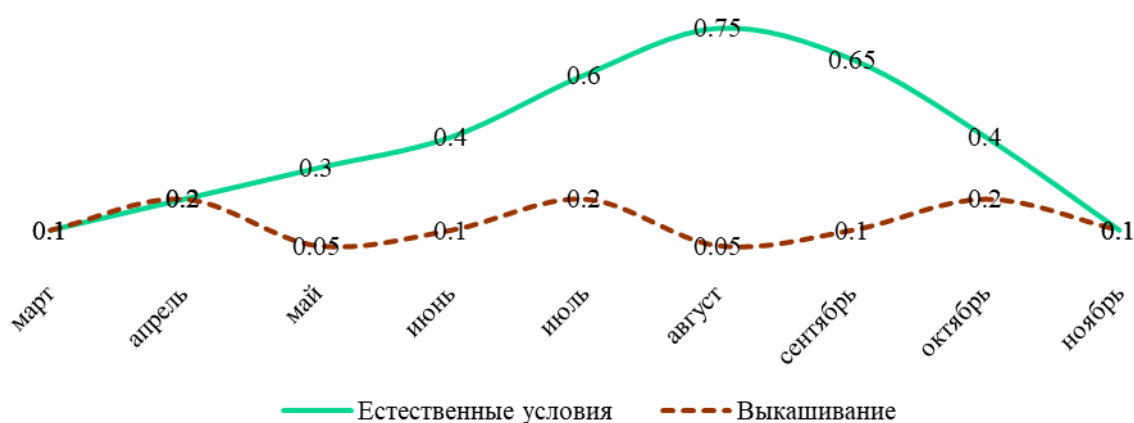


Рисунок 3. Изменение характеристики зарастаемости W_r за теплый период года в естественных условиях и при выкашивании

В период 50–70 годов прошлого века голландскими учеными были проведены исследования, направленные на нахождение взаимосвязи между сопротивлением движению потока и водной растительностью в различные периоды вегетации. Полученный учеными конечный график зависимости коэффициента шероховатости n от W_r приведен на рисунке 4.

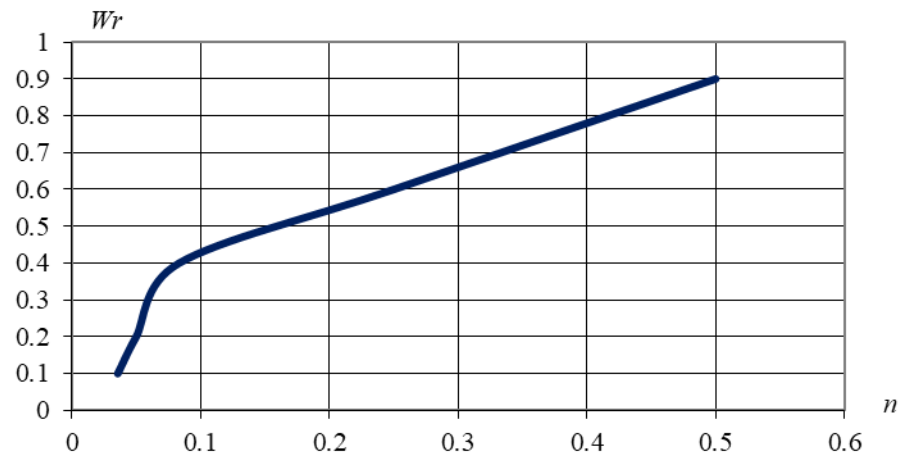
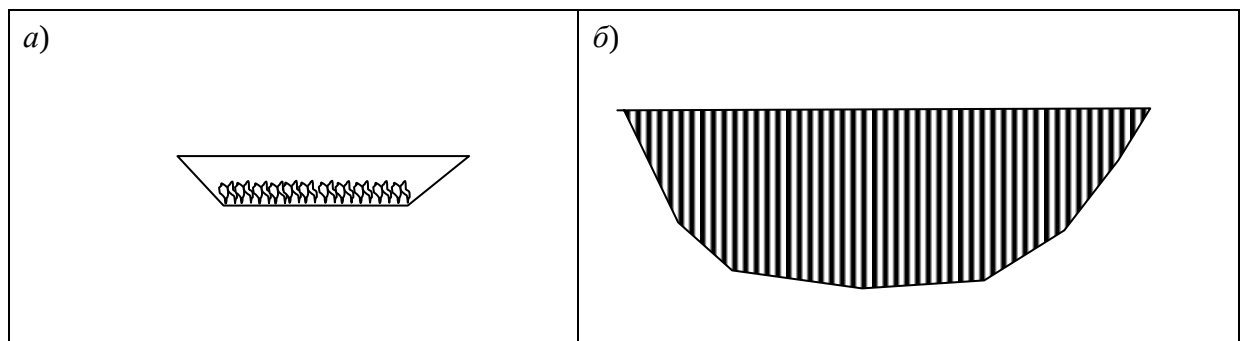
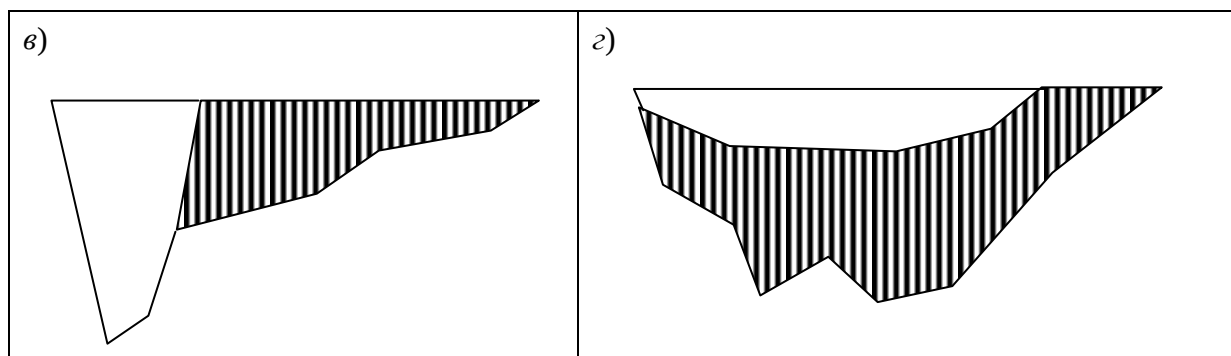


Рисунок 4. График зависимости $Wr = f(n)$

В ряде работ зарубежных авторов также были сделаны попытки перейти от характеристик сопротивления отдельного растительного элемента к сопротивлениям массы водной растительности [1].

Под влиянием указанных выше факторов на участке реки формируются сложные растительные группы. Рассмотрим основные особенности распространения водной растительности в русле реки. В поперечном сечении русла Э. Квернер выделил четыре типа развития водной растительности (рисунок 5). Разумеется, приведенная типизация распространения водной растительности весьма схематична и не полностью отражает особенности ее сопротивления движению потока.





а) – русло, заросшее по дну (в основном облицованные каналы);

б) – полностью заросшее русло;

в) – русло, заросшее по берегам;

г) – частично заросшее русло

Рисунок 5. Типы развития растительности в речном русле

При наличии в русле даже слабого течения воды в плотной массе водной растительности образуются специфические транзитные коридоры, по которым происходит движение воды. Таким образом, единая кинематическая структура потока нарушается и представляет собой совокупность нескольких отдельных струй, зачастую с заглубленными под уровень максимальными скоростями. При изменении скорости течения воды гидравлические сопротивления в заросшем русле также изменяются. Однако эти изменения зависят от вида водной растительности. Например, при увеличении скорости течения растения, имеющие упругий стебель (камыш, тростник, хвои и т.п.) изгибаются под напором потока и, начиная вибрировать, несколько уменьшая величину сопротивления. Стелющиеся растения (рдесты, остролисты и т.п.) прижимаются течением ко дну, создавая плотный ковер и уменьшая тем самым гидравлические сопротивления. Растения с плавающими листьями (кувшинки, лилии, кубышки) при увеличении уровня воды резко увеличивают сопротивления за счет значительного тормозящего действия погружившихся листьев. К сожалению, в настоящее время отсутствуют расчетные методики, позволяющие учитывать эти изменения.

Изменение биомассы водной растительности носит сезонный и многолетний характер. Сезонные изменения биомассы тесно связаны с гидрологическим режимом реки и поддаются достаточно надежному прогнозированию (например, по связи объемов биомассы с суммой среднедекадных температур воды). Вопрос о многолетних колебаниях гидравлических сопротивлений, связанных с водной растительностью, изучен в меньшей степени. Выполненные в РГГМУ исследования показали, что даже в пределах одного климатического района Северо-Западного региона изменения коэффициентов шероховатости на зарастающих малых реках от года к году не поддаются географическому обобщению. Процессы развития водной растительности даже на соседних участках одной реки асинхронны в многолетнем периоде, а на ряде рек имеют выраженный тренд. Так, в верховьях р. Ордеж после проведения в 70-х г. мелиоративных работ на водосборе изменился режим питания реки: большая часть стока стала формироваться за счет поверхностной составляющей. Это привело к резкому (на 5–7°C) увеличению среднемесячных температур воды в мае–июле, и как следствие, к бурному развитию высшей водной растительности. Противоположный процесс отмечается в р. Охте. Под влиянием избыточной антропогенной нагрузки была превышена способность реки к самоочищению, что привело к угнетению водной растительности.

К сожалению, при расчетах пропускной способности малых и средних рек сложные многофакторные процессы развития водной растительности практически не учитываются. Решение проблемы видится в создании интегрированной расчетной модели водосбора на основе ГИС-технологий, использующей последние достижения гидрологии, метеорологии, биологии и экологии.

1.3 ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ВЫСШЕЙ ВОДНОЙ РАСТИТЕЛЬНОСТИ НА УЧАСТКЕ Р. ОРЕДЕЖ

1.3.1 Физико-географическое описание реки Оредеж

1.3.1.1 Геология

Река Оредеж является правым притоком реки Луги, которая протекает в бассейне Балтийского моря. Бассейн расположен между $67^{\circ}40'$ - $55^{\circ}36'$ с. ш. и $27^{\circ}20'$ - $37^{\circ}57'$ в. д., его площадь составляет 396 тыс. км². Тело реки Оредеж находится в северо-западной части бассейна, которую, в свою очередь, можно разделить на северо-западную (низменную) часть и юго-восточную часть (возвышенную). Северо-западная часть расположена в основном в пределах Прибалтийской низменности, уходящей на западе на территорию Эстонии и Латвии, а на севере и северо-востоке – на территорию Карелии [9].

Возвышенная часть территории Северо-запада располагается в районе Валдайской возвышенности, которая огибает собой Прибалтийскую низменность и пролегает от восточного побережья Онежского озера до г. Великие Луки, переходя далее на территорию Белоруссии и Литвы.

Территория Северо-запада расположена практически полностью в пределах Русской платформы и сложена множеством осадочных отложений дочетвертичного периода, залегающих под четвертичными отложениями на архейском или протерозойском кристаллическом основании. На южной части Балтийского щита находится самая северная окраина территории - север Карельского перешейка - и состоит из древнейших кристаллических пород архейско-протерозойского комплекса, который представлен разными видами гнейсов и сланцев [9].

1.3.1.2 Почвенный покров

Главными процессами образования почвы являются образование подзол и заболачивание, что объясняется холодным и влажным климатом в районе, а также большой залесенностью. Большой процент лесных зон составляют хвойные леса.

Глубина промерзания почвы зависит от рельефа местности, а также от интенсивности нарастания отрицательных температур воздуха и наличия снежного и растительного покрова, состава почвы и ее степени увлажнения.

Как правило, оттаивание почвы начинается сверху и идет в первое время медленно, до схода снежного покрова, а далее быстро из-за влияния солнечной радиации, однако на болотистой местности почва может не оттаять даже за летний период [9].

1.3.1.3 Флора

Рассматриваемая местность находится преимущественно в пределах таежной зоны.

Тайга является биомом, который характеризуется преобладанием хвойной растительности, а именно еловыми и сосновыми лесами, а также сфагновыми торфяно-осоковыми и кустарниковыми болотами, которые могут быть или вовсе не облесены, или порастать редкими небольшими деревьями. На территории Северной Европы преобладают еловые леса.

Таежным полосам свойственно слабое развитие или полное отсутствие подлеска в связи с недостаточным прониканием солнечных лучей, связанным с густотой леса. Также в тайге слабо развиты травы и кустарник, их виды немногочисленны, и в большинстве своем это известные нам «лесные ягоды» - смородина, черника, брусника, клюква, и так далее.

Состав местных лесов представлен главным образом мелколиственными породами: березой, сосной, ольхой [9].

1.3.1.4 Климат

Средняя температура воздуха за год на северо-западной территории варьируется от 2°C в Северо-Восточной части до 4,5 °C в южной части. Наиболее холодные месяцы в году - январь и февраль, самый теплый месяц – июль.

Наша территория относится к зоне избыточного увлажнения. Это связано с относительно небольшим переходом тепла и хорошо развитой здесь деятельностью циклона, которая активна во все времена года.

На распределение осадков существенное влияние оказывает рельеф и подстилающая поверхность. В среднем в год на нашу местность выпадает 550-750 мм осадков.

Ветровой режим подвержен влиянию общей циркуляции атмосферы и тесно связан с особенностями распределения барических центров, которые располагаются близ рассматриваемого района. В нашем случае в течение всего года преобладают ветры южного, юго-западного и западного направлений.

Испарение является существенным расходным членом уравнения водного баланса, которое в условиях северо-запада может достигать 50-70% от объема атмосферных осадков, поступающих на поверхность водосбора [9].

1.3.1.5 Описание реки Оредеж

Истоком реки Оредеж являются карстовые Кикеренские болота, из которых она протекает на северо-восток. В верховьях река зарегулирована плотинами и карстами, в низовьях судоходна. Оредеж впадает в реку Лугу

через проточные озера Антолово и Хвойлово на 194 км от устья Луги. Длина Оредеж составляет 201 км, средняя ширина русла – 25-30 м, общая площадь водосбора 3350 км².

Отметка истока - 112,6 м БС, устья - 31,6 м., таким образом, общее падение реки составляет 81 м.

Близлежащая территория слабовсхолмлённая, на пологом юго-восточном склоне Ижорской возвышенности, покрытая смешанным, преимущественно хвойным лесом и сельскими хозяйствами. У деревни Даймище впервые встречаются выходы к красным девонским песчаникам, которые местами встречаются и ниже по течению. В районе деревни Грязно и других местах встречаются камни и каменистые гряды в русле реки.

Долина реки выражена неясно. В основном река проходит в низменных берегах. В районе исследования долину реки можно отнести к V-образной форме. Превалирующая ширина речной долины составляет 150-200 м.

Вода реки радиоактивна, по составу считается гидрокарбонатной (группа кальция), рН составляет 7,5-8,2, минерализация находится в пределах 180-280 мг/л.

Русло реки по всей длине зарастает различной водной растительностью. Дно сложено песчаными породами с отдельными валунами, может незначительно деформироваться под влиянием движения песчаных гряд. На Оредеж могут встречаться острова небольших размеров. Пойменная часть русла может быть заболочена местами. Коренные берега пологие в большинстве своем, однако, местами они могут быть крутыми и обрывистыми. Средняя глубина реки составляет 1,0-1,5 м. Превалирующие скорости течения на плесах 0,2-0,3 м/с, на перекатах до 1 м/с.

Река питается за счет инфильтрации атмосферных осадков, поверхностного притока и притока грунтовых вод. Крупнейшими притоками реки являются река Суйда, река Кременка и река Тесовая.

За сутки уровень воды колеблется незначительно, но во время обильных осадков уровень резко растет, что вызывает затопление поймы. Уровни весеннего половодья могут быть выше меженных на 1-2 м как в верхнем, так и в среднем течении.

Осенью ледостав на реке начинается с появления сала, на мелководье появляется донный лед. Температурный режим воды непредсказуем из-за карстового питания и истока из озер.

Зимняя межень, как правило, начинается в начале декабря и отличается тем, что весь сток осуществляется за счет грунтовых вод. Но возможные паводки, которые вызваны таянием снега, при оттепелях изменяют вид питания в зимнюю межень. Как правило, зимние минимальные расходы воды - самые меньшие за весь год.

Средняя мощность льда на реке в конце зимы составляет 20-25 см, максимальная мощность может достигать 50 см. В особо холодные зимы река может промерзнуть, а в теплые зимы устойчивого ледостава на реке может не быть. Вскрытию предшествует подвижка льда.

Мощность снега в поле в среднем за зиму составляет порядка 45 см, максимальная может составлять 71 см. В лесной местности в среднем мощность снежного покрова - 36 см, максимальная - 63 см. Годовые осадки могут достигать 708 мм [9].

1.3.1.6 Изучение сопротивления заросшего речного русла реки Оредеж

С целью глубокого изучения скоростного поля в толще водной растительности и особенностей режимов сопротивления при различных объемах заполнения речного русла, на базе учебных практик в деревне Даймище был открыт экспериментальный полигон, на котором проводятся специальные наблюдения для последующего выявления закономерностей сопротивлений зарастающих русел. На экспериментальном полигоне каждый

месяц производится мониторинг состояния реки с составлением ортофотоплана по снимкам с камеры высокого разрешения, измеряются расходы воды и уклоны свободной поверхности, ведутся непрерывные измерения уровня воды, температуры воды и воздуха, производятся регулярные подводные съемки, исследуются турбулентные пульсации в толще растительности.

Река Оредеж была выбрана в качестве исследования зарастания речного русла по многим факторам. Рассматриваемая река сильно подвержена зарастанию по разнообразным причинам. Одна из главных причин заключается в том, что на реке находится несколько плотин, и вызываемый ими подпор приводит к затоплению поймы. Так как пойма обладает повышенной биологической продуктивностью в результате накопления биогенных элементов, таких как речные илы, то на ней есть все условия для роста водолубивой растительности. Такие водные растения, как двукосточник тростниковый, незабудка болотная, вероника ключевая и лютик длиннолистный образуют водные формы, а обогащенный грунт благоприятно влияет на развитие рдестов и кубышек, что приводит к большой эвтрофикации. Также на биологическую продуктивность поймы существенное влияние оказывает сброс сточных вод и попадание в речную воду минеральных удобрений, приходящих со стоков с полей или в связи с их неправильным хранением.

Активное развитие высших водных растений проходит одновременно с развитием водорослей (например, нитчаток), которые разрастаются на подводных стеблях высших растений.

У реки Оредеж в последнее время произошли изменения температурного режима воды. Это было связано с уменьшением грунтового питания, которое произошло по причине осушения болот, располагающихся на водосборе реки.

По оценкам экспертов, процесс эвтрофикации будет развиваться с течением времени, и, как следствие, русло реки Оредеж будет зарастать еще больше, если в это не вмешается человек. У процесса зарастания, однако, одновременно есть и плюсы, и минусы. Плюсы – подводная растительность

увеличивает концентрацию кислорода в речной воде, способствует развитию жизнедеятельности водной фауны, очищает воду от избытка солей (задерживая их на своих стеблях). К минусам же относятся затруднение движения для плавательных средств, ограничение использования людьми речной воды для бытовых целей.

1.3.1.7 Водная растительность, произрастающая на участке исследования

Наблюдения за зарастанием реки Оредеж проводятся уже несколько лет, и у этих наблюдений уже есть плоды. Например - это изучение типов водной растительности, прорастающей в бассейне реки.

В верхних водах реки Оредеж произрастает 29 видов высших водных растений, которые относятся к 23 родам, распространенным между 18 различными семействами. Они представляют 3 класса и 2 отдела высших сосудистых растений. Хвощ речной (Рисунок 6) является единственным представителем класса Хвощевидных отдела Папоротникообразных.



Рисунок 6. Растение Хвощ речной семейства Хвощевые

Хвощ речной (лат. *Equisetum fluviatile*) – вид многолетних травянистых растений рода Хвощ семейства Хвощевые (*Equisetaceae*) [12]. Многолетнее растение, высота которого может достигать 1,5 м. Ветвление сильно варьирует от форм с одиночными совершенно неветвистыми побегами,

до форм с густым и равномерным мутовчатым (произрастающим группой на одной высоте) ветвлением. Обладает толстыми стеблями диаметром от 6 до 8 мм и темно-коричневыми корнями. Листовые зубцы на стебле растут в виде мутовки по 8-12 зубцов в форме треугольника. Ветки могут различаться по количеству, длине, густоте и направлению роста.

Отдел Голосеменных не встречается среди растений исследуемого водотока. Отдел Покрытосеменных представлен видами двух классов: класс Однодольных насчитывает 19 видов, а класс Двудольных - 9 видов. Крупнейшим родом является Рдест, изображенный на Рисунке 7, который содержит 5 видов растений, растущих в изучаемой местности.



Рисунок 7. Растение семейства Рдестовых

Рдест (лат. *Potamogeton*) - многолетнее водное растение; род семейства Рдестовые [11]. Отдельные побеги или части растений могут свободно плавать в речной воде как на водной поверхности, так и в толще воды. Листья очередные, черешчатые или сидячие, различной формы и размеров, могут быть как нитевидными и линейными, так и овальными. Могут быть как только подводными, так и подводными и плавающими на поверхности воды. Соцветие

представляет собой колос серовато-зелёного или коричневатого-зелёного цвета. Цветки обоеполые, мелкие, многочисленные, обычно цветут в июле-августе. Могут размножаться и вегетативно, и семенами.

Род Осока (Рисунок 8) представлен 3 видами прибрежно-водных растений.



Рисунок 8. Растение, относящееся к семейству Осоковых

Осока (лат. *Carex*) - род многолетних трав семейства Осоковые (Cyperaceae), который включает в себя от 1500 до 2000 видов, произрастающих в основном странах Северного полушария с умеренным климатом [10]. На территории России и постсоветского пространства количество встречаемых видов достигает 400. Осока является главным торфообразователем, в биосфере играет роль накопителя пресной воды, служит средой обитания и кормом для многих животных, в особенности водоплавающих птиц. Некоторые виды осоки используются как кормовые травы и очень ценятся. Внешне осока напоминает злаковые культуры, но она отличается от семейства злаковых своим трехгранным стеблем.

Наиболее крупным семейством, содержащим 5 видов, является семейство Рдестовые. Семейство Осоковые содержит 4 вида, по 2 вида – семейства Частуховые (Рисунок 9), Водокрасовые, Злаковые и Лютиковые.



Рисунок 9. Растение, относящееся к семейству Частуховые

Частуховые (лат. Alismataceae) — семейство однодольных растений [10]. Большое количество частуховых - многолетние розетко-образующие травы с коротким, густым, зачастую клубнеобразным корневищем, на верхушке которого каждый год образуются розетка листьев и ножка, несущая соцветие. Все частуховые любят влажность, и многие из них могут расти и на суше, и в воде, хотя соцветия часто подняты над её поверхностью.

Водокрасовые (лат. Hydrocharitaceae)— многолетние, реже однолетние растения, частично или полностью растущие в воде, обладают ползучим длинным тонким корневищем [3]. Их можно встретить в водоёмах большими массами (телорез) или просто огромными массами (элодея), тем самым, заполняя водные бассейны, они нарушают хозяйственное использование водоемов. Элодея растет на исследуемом участке реки Оредеж и представлена на рисунке 10.



Рисунок 10. Растение Элодея семейства Водокрасовые

Одновременно с этим водокрасовые могут быть использованы для хозяйственных целей (например. в качестве удобрения или на корм для домашних животных).

Злаковые (лат. Poaceae) - семейство однодольных растений, к которому относятся многие используемые в хозяйстве растения (пшеница, рис, кукуруза и так далее) [5]. У злаковых много жизненных форм – это деревья, кустарники, многолетние и однолетние травы. Наиболее разнообразна группа многолетних злаков.

Лютиковые (лат. Ranunculaceae) - семейство двудольных свободнолепестных растений [8]. Представители семейства - однолетние, двулетние и многолетние травы; иногда - полукустарники и вьющиеся кустарники. Растение семейства Лютиковые, произрастающее на рассматриваемом участке реки Оредеж, представлено на рисунке 11.



Рисунок 11. Растение семейства Лютиковые

Остальные семейства содержат по 1 виду. Большинство семейств содержит по роду, а по 2 рода содержится в семействах Водокрасовые, Злаковые, Осоковые и Лютиковые. Практически все представители водной флоры являются многолетними растениями, исключение составляет лишь 1 вид - болотник болотный, который является однолетним растением.

2 ПРОВЕДЕНИЕ НАТУРНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

В летний период 2017 года на учебной базе практик РГГМУ в деревне Даймище были проведены эксперименты по оценке степени полегания водной растительности от скорости речного потока. Были произведены наблюдения за уровнями (Рисунок 12) и расходами (Рисунок 13) воды в период проведения исследования.

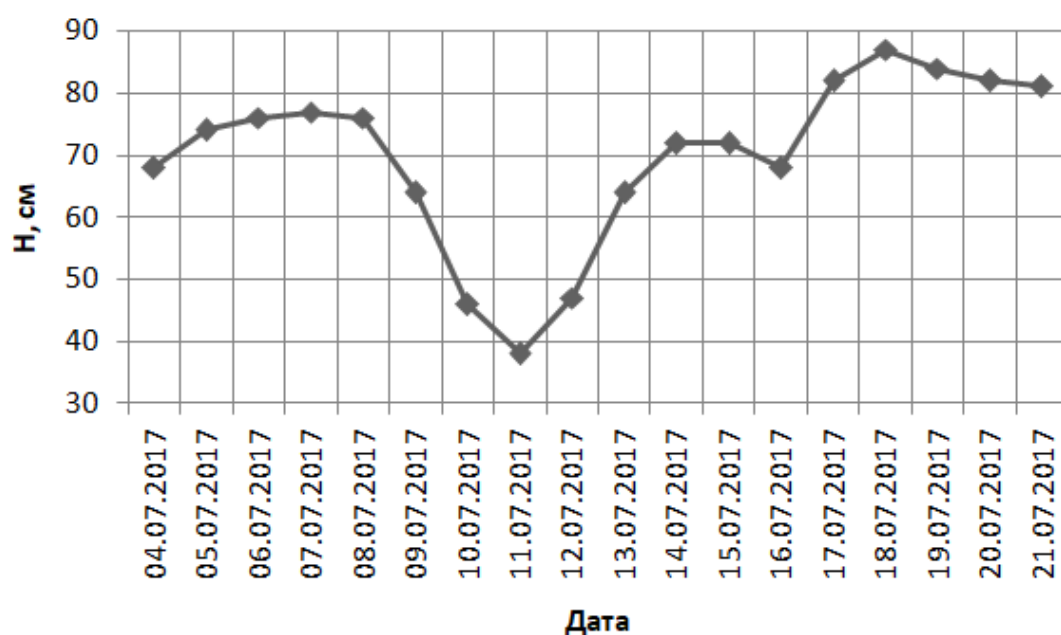


Рисунок 12. График хода уровней за период наблюдения

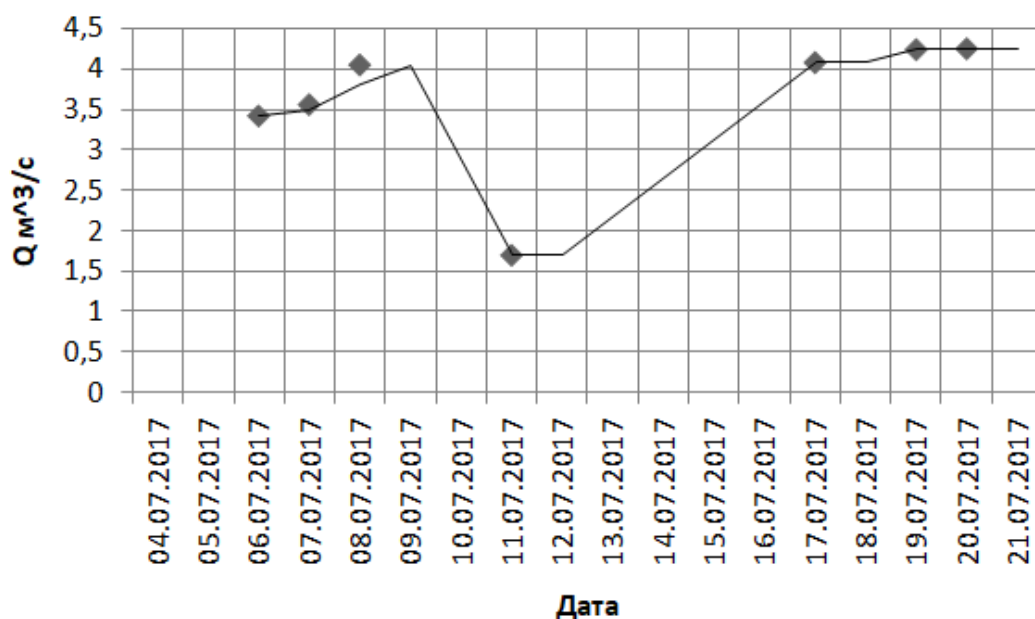


Рисунок 13. График хода расходов воды за период проведения наблюдений

По характеру залегания водную растительность можно разделить на две большие группы:

- Растения с жестким стеблем. Такие растения создают сопротивление потоку в связи с стеблем, неспособным пластично изгибаться под действием силы потока. Примером такой растительности на изучаемом участке служат растения семейства Осоковых.

- Растения с мягким стеблем. Данный вид водной растительности способен к свободному колебанию в толще воды. Примером растений с мягким стеблем на рассматриваемом участке реки Оредеж является рдест, стебли которого могут свободно плавать на поверхности и в толще воды.

Поскольку на рассматриваемом нами участке реки Оредеж растения второй группы численно доминировали, наши эксперименты проводились именно на этой группе.

Фотофиксация положения рдеста, выбранного в качестве образца, осуществлялась с помощью экшн-камеры GoPro Hero 3 в автоматическом

режиме с интервалом 10 секунд между кадрами. Скорость течения измерялась с помощью гидрометрической вертушки ГР-21М.



Рисунок 7. Снимок подводной растительности, полученный в ходе проведения эксперимента

Поскольку река Оредеж на участке базы зарегулирована, ее уровень и скоростной режимы изменяются слабо. По этой причине был применен метод изменения скоростей.

Суть эксперимента заключалась в следующем:

Испытываемое растение помещалось между двумя щитами и его положение фиксировалось с помощью фотокамеры.

В первом эксперименте оба щита находились в вертикальном и параллельном друг другу положении, то есть практически сохранялась естественная эпюра скоростей.

Во втором эксперименте верховые части щитов раздвигались, образуя при этом в вертикальной проекции сходящийся конус. Данное положение щитов способствовало увеличению скоростей течения внутри конуса.

В третьем эксперименте верховые части щитов сдвигались, и в вертикальной проекции это представлялось как расходящийся конус. Таким образом, скорости потока на рассматриваемом участке замедляются.

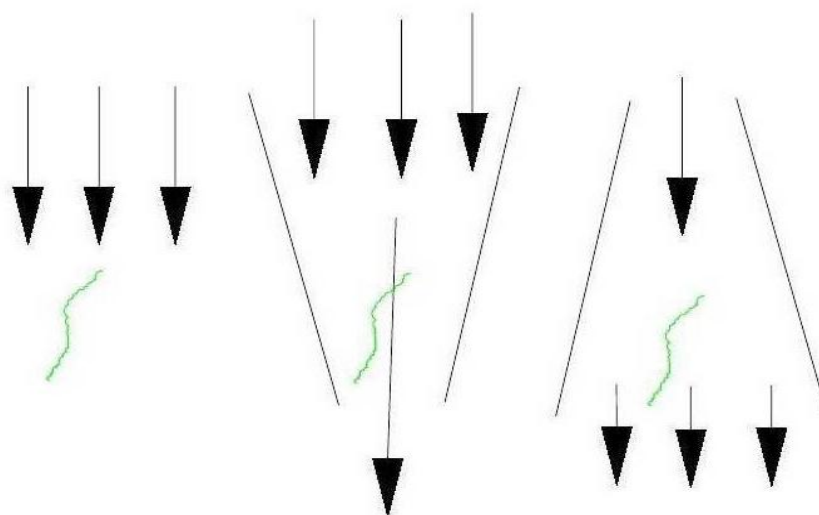


Рисунок 8. Схема проведения эксперимента

По результатам проведения экспериментов по деформации потока были построены схемы изгиба растительности в зависимости от вида деформации. Схемы были построены в программе AutoCAD посредством обрисовки растительной массы.

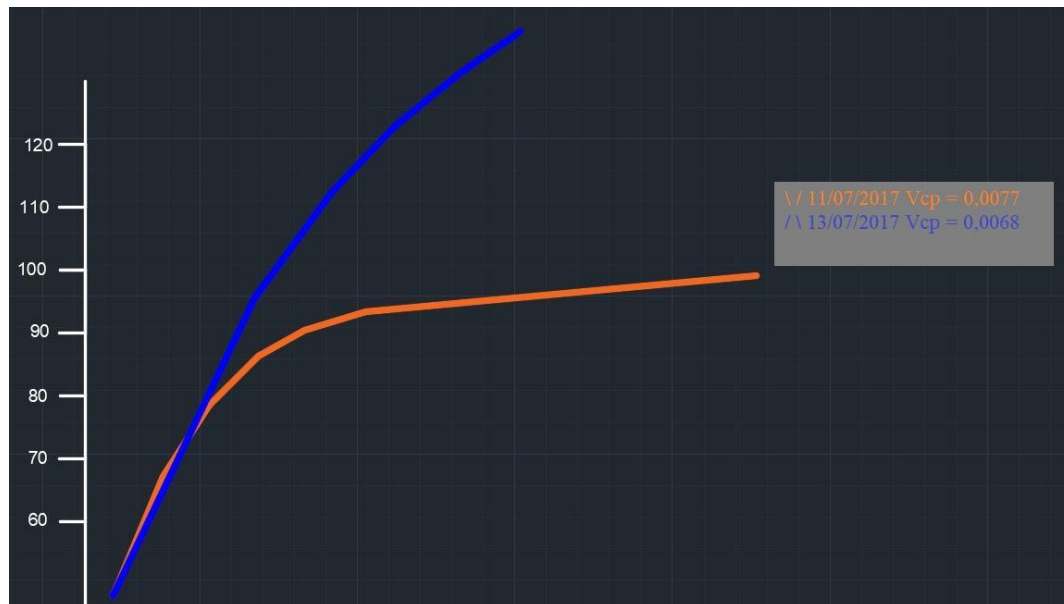


Рисунок 9. Изгиб водной растительности при различных видах деформации потока

Из полученной схемы изгиба растительности можно сделать вывод, что при сужении потока происходит увеличение скоростей, которое влияет на изгиб растений, делая его более выраженным. В свою очередь, искусственно расширенный поток характеризуется меньшей скоростью и практически полным отсутствием изгиба растения.

Эксперимент, заключавший в себе наблюдения за полеганием растительности в натуральных условиях, также включал в себя подводную съемку водной растительности с интервалом в 10 секунд и измерение скоростей течения.

По данным фотоснимков были также построены схемы изгиба водной растительности, а также эпюры скоростей

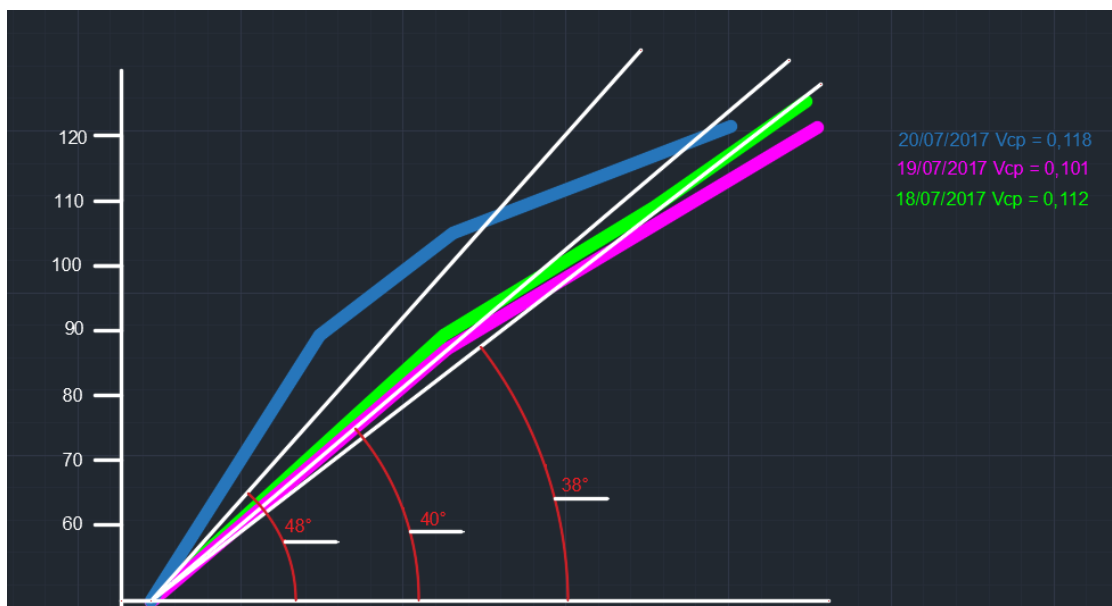


Рисунок 10. Схема полегания растительности в натуральных условиях

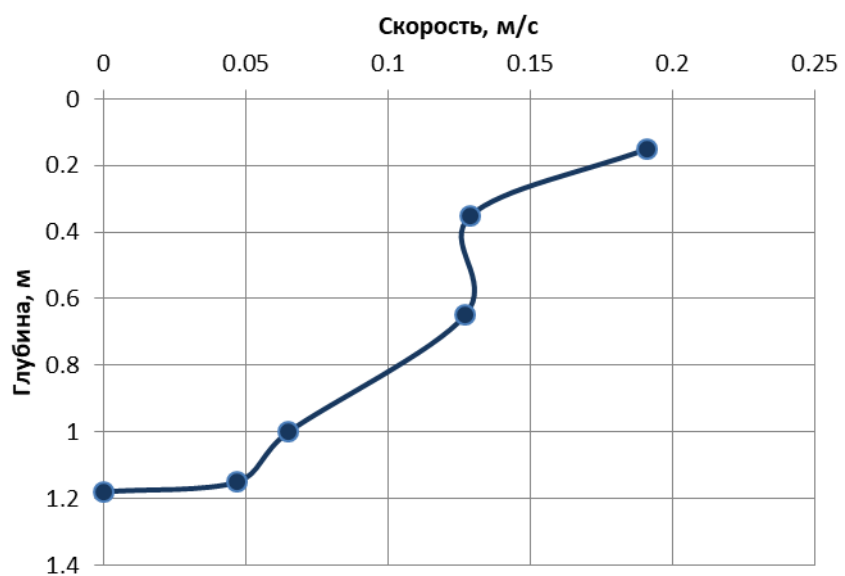


Рисунок 11. Эпюра скоростей 18.07.2017 г

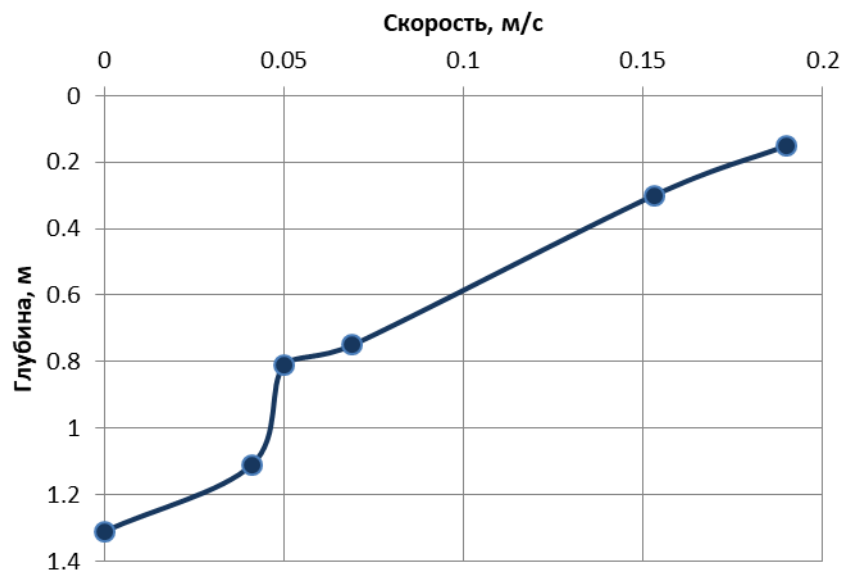


Рисунок 12. Эпюра скоростей 19.07.2017

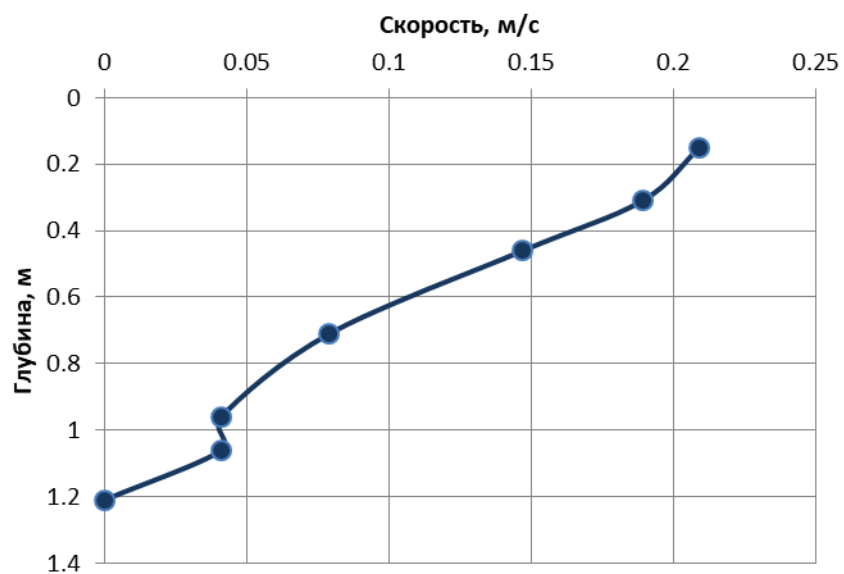


Рисунок 13. Эпюра скоростей 20.07.2018

На схеме полегания водной растительности для кривой каждого рассмотренного дня был взят средний угол наклона растений, и затем был построен график зависимости угла от скорости потока.

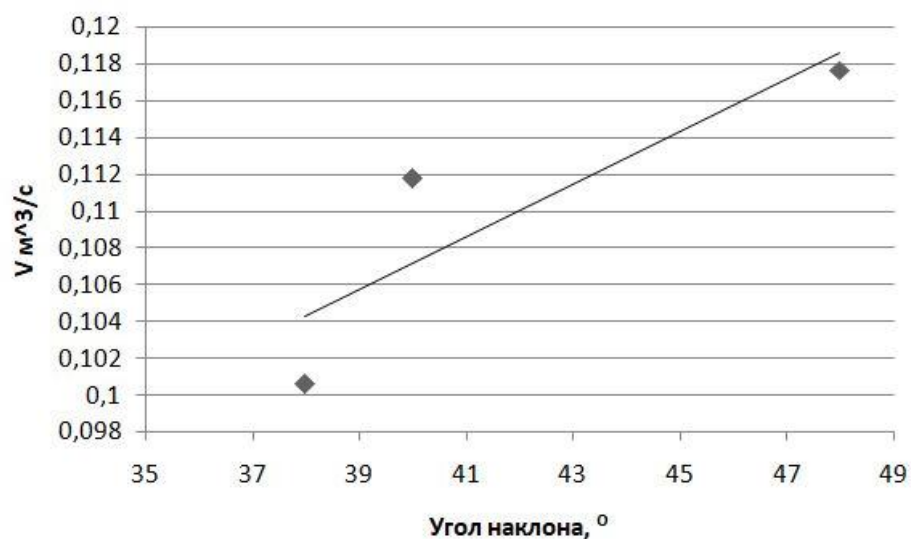


Рисунок 14. График зависимости угла наклона полегания растительности от скорости течения потока

К сожалению, из-за недостаточной продолжительности проведения таких экспериментов полученный график зависимости можно считать ненадежным. Однако, уже на начальном этапе можно отметить предполагаемую тенденцию: с увеличением скорости течения увеличивается угол наклона водной растительности.

написать то, что на стенде

3 ПРОВЕДЕНИЕ ЧИСЛЕННОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

Наш натурный эксперимент заключается в том, чтобы посмотреть на поведение русла реки Оредеж при разных коэффициентах шероховатости. Рассматриваемый участок реки включает в себя 15 створов, находящихся близ

базы практик. В программе HEC-RAS была построена математическая модель для расчетных створов.

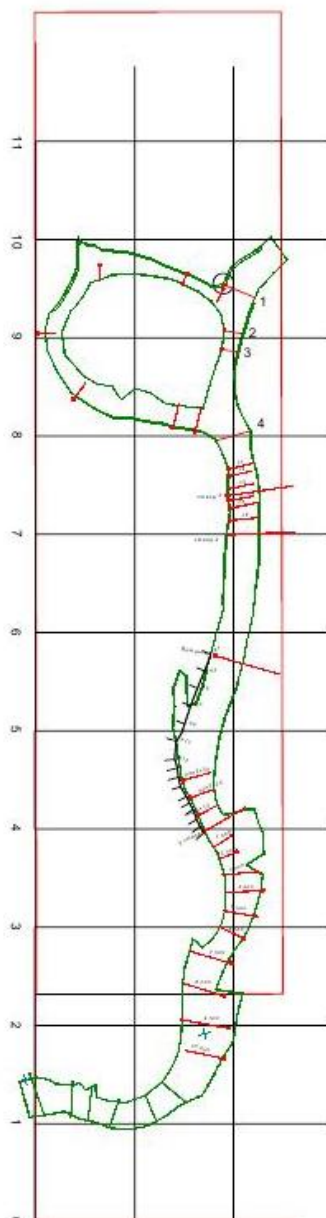


Рисунок 7. Расположение расчетных створов на исследуемом участке реки Оредеж

В первом случае мы допускаем, что рассматриваемый нами участок порос водной растительностью. В этом случае для всего участка принимается осредненный коэффициент шероховатости, равный 0,046.

Таблица 1.

Результаты расчета гидрометрических характеристик при $n = 0,046$

№ створа	Расход, м ³ /с	Уровень воды, м	Уклон в. п.	Средняя скорость, м/с	Площадь поперечного сечения, м ²
15	1	89,92	0,00011	0,16	6,32
	2	90,04	0,00025	0,26	7,6
	5	90,46	0,00037	0,4	12,44
	10	91,12	0,00030	0,47	21,37
	15	91,68	0,00026	0,52	29,12
14	1	89,92	0,00011	0,15	6,57
	2	90,04	0,00025	0,25	7,97
	5	90,46	0,00034	0,37	13,37
	10	91,12	0,00027	0,44	22,51
	15	91,68	0,00025	0,5	30,27
13	1	89,92	0,00079	0,31	3,2
	2	90,03	0,00147	0,47	4,23
	5	90,44	0,00107	0,57	8,79
	10	91,11	0,00057	0,59	17,06
	15	91,67	0,00044	0,62	24,28
12	1	89,92	0,00010	0,14	7,28
	2	90,03	0,00021	0,23	8,85
	5	90,45	0,00026	0,33	15,16
	10	91,11	0,00021	0,38	26,37
	15	91,67	0,00017	0,41	36,39
11	1	89,92	0,00007	0,12	8,14
	2	90,03	0,00016	0,21	9,71
	5	90,44	0,00022	0,31	15,88
	10	91,11	0,00020	0,37	26,69
	15	91,67	0,00017	0,41	36,71
10	1	89,91	0,00079	0,29	3,48
	2	90,02	0,00135	0,43	4,66
	5	90,43	0,00084	0,48	10,33
	10	91,1	0,00040	0,47	21,13
	15	91,66	0,00028	0,49	30,62
9	1	89,9	0,00101	0,33	3,07

Продолжение таблицы 1

№ створа	Расход, м3/с	Уровень воды, м	Уклон в. п.	Средняя скорость, м/с	Площадь поперечного сечения, м2
9	2	90	0,00199	0,49	4,04
	5	90,42	0,00131	0,51	9,73
	10	91,1	0,00035	0,42	23,62
	15	91,66	0,00022	0,42	35,38
8	1	89,85	0,01106	0,58	1,72
	2	89,85	0,04266	1,15	1,75
	5	90,41	0,00083	0,45	11,23
	10	91,1	0,00029	0,42	24,07
	15	91,66	0,00021	0,43	34,73
7	1	89,49	0,04678	0,89	1,13
	2	89,71	0,00247	0,45	4,45
	5	90,4	0,00022	0,28	17,69
	10	91,1	0,00013	0,31	32,68
	15	91,66	0,00011	0,33	45,04
6	1	89,39	0,00011	0,15	6,47
	2	89,71	0,00012	0,19	10,33
	5	90,4	0,00010	0,22	22,35
	10	91,1	0,00008	0,27	36,87
	15	91,66	0,00008	0,31	48,66
5	1	89,38	0,00293	0,45	2,23
	2	89,7	0,00072	0,36	5,53
	5	90,4	0,00027	0,33	15,11
	10	91,09	0,00020	0,38	26,66
	15	91,65	0,00016	0,41	36,76
4	1	89,32	0,00202	0,44	2,27
	2	89,68	0,00076	0,37	5,35
	5	90,39	0,00030	0,34	14,62
	10	91,08	0,00021	0,39	25,68
	15	91,65	0,00019	0,43	34,66
3	1	89,33	0,00007	0,14	7,39
	2	89,69	0,00007	0,17	11,65
	5	90,39	0,00008	0,24	21,15
	10	91,08	0,00010	0,32	30,87
	15	91,65	0,00011	0,39	38,73
2	1	89,32	0,00012	0,17	5,9
	2	89,68	0,00012	0,21	9,49
	5	90,39	0,00012	0,27	18,25
	10	91,08	0,00014	0,36	27,96

Продолжение таблицы 1

№ створа	Расход, м3/с	Уровень воды, м	Уклон в. п.	Средняя скорость, м/с	Площадь поперечного сечения, м2
2	15	91,64	0,00015	0,42	35,81
1	1	89,31	0,00141	0,36	2,81
	2	89,68	0,00042	0,29	6,96
	5	90,39	0,00018	0,28	17,76
	10	91,08	0,00013	0,33	30,26
	15	91,64	0,00012	0,37	40,37
0	1	89,32	0,00006	0,12	8,19
	2	89,68	0,00006	0,15	13,26
	5	90,39	0,00006	0,19	26,16
	10	91,08	0,00006	0,24	41,29
	15	91,64	0,00006	0,28	53,65

Во втором случае мы скашиваем всю подводную растительность на рассматриваемом участке. Коэффициент шероховатости в таком случае равен 0,025.

Таблица 2.

Результаты расчета гидрометрических характеристик при $n = 0,025$

№ створа	Расход, м3/с	Уровень воды, м	Уклон в. п.	Средняя скорость, м/с	Площадь поперечного сечения, м2
15	1	89,88	0,00004	0,17	5,81
	2	89,98	0,00010	0,29	6,86
	5	90,17	0,00027	0,55	9,04
	10	90,54	0,00035	0,74	13,43
	15	90,9	0,00032	0,82	18,31
14	1	89,87	0,00004	0,17	6,02
	2	89,98	0,00010	0,28	7,18
	5	90,17	0,00027	0,52	9,58
	10	90,54	0,00031	0,69	14,47
	15	90,9	0,00028	0,77	19,49
13	1	89,87	0,00034	0,36	2,79
	2	89,96	0,00069	0,56	3,58

Продолжение таблицы 2

№ створа	Расход, м3/с	Уровень воды, м	Уклон в. п.	Средняя скорость, м/с	Площадь поперечного сечения, м2
13	5	90,13	0,00143	0,95	5,28
	10	90,5	0,00101	1,06	9,45
	15	90,87	0,00069	1,07	14
12	1	89,87	0,00004	0,15	6,65
	2	89,97	0,00009	0,25	7,96
	5	90,15	0,00023	0,47	10,62
	10	90,52	0,00025	0,61	16,36
	15	90,89	0,00021	0,67	22,46
11	1	89,87	0,00003	0,13	7,51
	2	89,97	0,00006	0,23	8,84
	5	90,15	0,00017	0,44	11,48
	10	90,52	0,00021	0,59	17,04
	15	90,89	0,00019	0,66	22,86
10	1	89,87	0,00037	0,33	3
	2	89,95	0,00064	0,51	3,94
	5	90,12	0,00129	0,84	5,93
	10	90,49	0,00078	0,89	11,2
	15	90,87	0,00052	0,88	17,12
9	1	89,86	0,00044	0,37	2,69
	2	89,94	0,00087	0,58	3,46
	5	90,09	0,00191	0,99	5,06
	10	90,48	0,00122	0,93	10,79
	15	90,87	0,00049	0,8	18,72
8	1	89,79	0,01408	0,97	1,03
	2	89,85	0,01265	1,15	1,74
	5	89,96	0,01078	1,46	3,42
	10	90,47	0,00071	0,81	12,4
	15	90,86	0,00037	0,76	19,66
7	1	89,49	0,01405	0,89	1,12
	2	89,54	0,01231	1,11	1,81
	5	89,92	0,00072	0,62	8,05
	10	90,48	0,00020	0,52	19,25
	15	90,87	0,00015	0,54	27,68
6	1	89,3	0,00005	0,18	5,5
	2	89,44	0,00010	0,29	6,97
	5	89,92	0,00011	0,37	13,5
	10	90,48	0,00010	0,42	23,94
	15	90,87	0,00009	0,47	32,13

Продолжение таблицы 2

№ створа	Расход, м3/с	Уровень воды, м	Уклон в. п.	Средняя скорость, м/с	Площадь поперечного сечения, м2
5	1	89,27	0,00364	0,77	1,3
	2	89,4	0,00264	0,82	2,43
	5	89,91	0,00047	0,63	7,94
	10	90,47	0,00025	0,62	16,23
	15	90,86	0,00020	0,66	22,68
4	1	89,13	0,00695	1,01	0,99
	2	89,35	0,00186	0,81	2,47
	5	89,89	0,00052	0,65	7,65
	10	90,46	0,00028	0,64	15,67
	15	90,85	0,00023	0,68	21,9
3	1	89,16	0,00005	0,18	5,6
	2	89,37	0,00007	0,25	7,86
	5	89,9	0,00007	0,35	14,43
	10	90,46	0,00008	0,45	22,18
	15	90,85	0,00009	0,54	27,64
2	1	89,16	0,00008	0,23	4,4
	2	89,36	0,00012	0,32	6,28
	5	89,9	0,00012	0,42	11,9
	10	90,46	0,00013	0,52	19,23
	15	90,85	0,00013	0,61	24,68
1	1	89,08	0,01198	1,16	0,86
	2	89,34	0,00131	0,65	3,09
	5	89,89	0,00027	0,51	9,87
	10	90,46	0,00017	0,53	19,02
	15	90,85	0,00014	0,58	26,06
0	1	89,1	0,00006	0,18	5,5
	2	89,35	0,00006	0,23	8,67
	5	89,89	0,00006	0,3	16,71
	10	90,46	0,00006	0,36	27,71
	15	90,85	0,00006	0,41	36,25

В третьем случае мы рассматриваем поток, образовавшийся над растительностью, изогнутой под действием скорости потока и рассматриваемой как массив, через который не проходит вода.

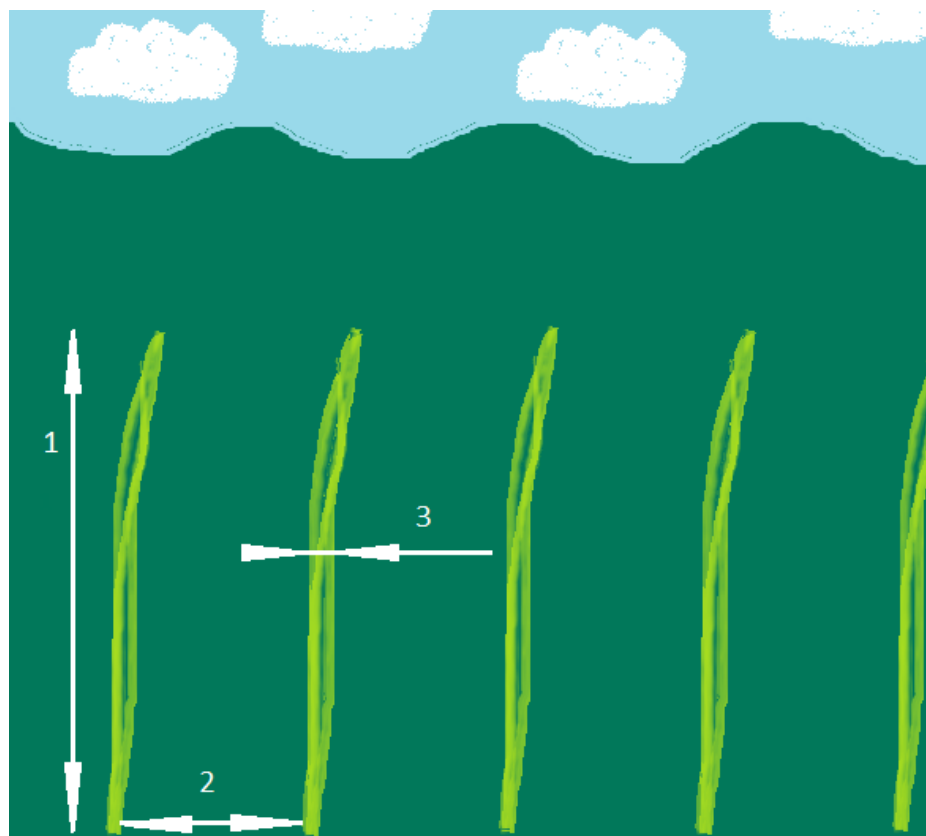


Рисунок 7. Схема подводной растительности

Для того, чтобы оценить влияние растительности на поток, при выполнении расчетов мы поднимаем дно реки. Чтобы рассчитать численное значение поднятия дна, мы используем такие характеристики водной растительности, как средняя длина (1), количество растительных единиц на длину потока (2) и диаметр растения (3). Так как на нашем участке встречается несколько видов растительности, мы используем осредненные характеристики.

Учитывая средние значения выше перечисленных характеристик, устанавливаем, что в расчетах целесообразно поднять уровень на 25 см, считая, что этот объем займет полегшая водная растительность.

Таким образом, коэффициент шероховатости выводится из уравнения Н. Н. Павловского:

$$C = \frac{1}{n} \times h^{1/6} \quad (8)$$

Для получения значения коэффициента Шези C используется следующее уравнение:

$$C = \sqrt{\frac{2g}{\lambda}} \quad (9)$$

где g – ускорение свободного падения = $9,81 \text{ м/с}^2$;

λ – коэффициент потерь на трение

$$\lg(1000\lambda) = 0,9$$

$$1000\lambda = 6,3$$

$$\lambda = 0,0063$$

Подставляем значение λ в формулу (9):

$$C = \sqrt{\frac{2 \times 9,81}{0,0063}} = 55,8$$

Подставив значение C в формулу (8), получаем $n = 0,019$.

Таблица 3.

Результаты расчета гидрометрических характеристик при $n = 0,046$

№ створа	Расход, м ³ /с	Отметка дна, м	Уровень воды, м	Уклон в. п.	Средняя скорость, м/с	Площадь поперечного сечения, м ²
15	1	89,25	90,16	0,00002	0,16	6,12
	2	89,25	90,29	0,00004	0,27	7,5
	5	89,25	90,54	0,00011	0,48	10,38
	10	89,25	90,81	0,00019	0,73	13,67
	15	89,25	91,01	0,00026	0,92	16,32
14	1	89,11	90,16	0,00002	0,16	6,36
	2	89,11	90,28	0,00005	0,25	7,89

Продолжение таблицы 3

№ створа	Расход, м3/с	Отметка дна, м	Уровень воды, м	Уклон в. п.	Средняя скорость, м/с	Площадь поперечного сечения, м2
14	5	89,11	90,54	0,00010	0,45	11,1
	10	89,11	90,81	0,00017	0,68	14,74
	15	89,11	91,01	0,00023	0,86	17,49
13	1	89,78	90,07	0,00704	1,23	0,81
	2	89,78	90,16	0,00617	1,49	1,34
	5	89,78	90,36	0,00537	1,84	2,71
	10	89,78	90,57	0,00475	2,14	4,67
	15	89,78	90,73	0,00450	2,39	6,28
12	1	88,96	90,11	0,00002	0,15	6,52
	2	88,96	90,2	0,00006	0,26	7,73
	5	88,96	90,37	0,00015	0,49	10,2
	10	88,96	90,59	0,00026	0,74	13,5
	15	88,96	90,89	0,00023	0,82	18,29
11	1	89,29	90,11	0,00002	0,14	7,38
	2	89,29	90,2	0,00004	0,23	8,61
	5	89,29	90,37	0,00011	0,45	11,08
	10	89,29	90,59	0,00020	0,7	14,31
	15	89,29	90,89	0,00019	0,79	18,9
10	1	89,71	90,11	0,00023	0,34	2,9
	2	89,71	90,19	0,00043	0,53	3,75
	5	89,71	90,34	0,00092	0,9	5,53
	10	89,71	90,53	0,00119	1,23	8,1
	15	89,71	90,84	0,00068	1,17	12,77
9	1	89,61	90,1	0,00027	0,38	2,62
	2	89,61	90,18	0,00055	0,6	3,31
	5	89,61	90,31	0,00134	1,06	4,73
	10	89,61	90,48	0,00213	1,47	6,78
	15	89,61	90,84	0,00090	1,15	13,01
8	1	89,83	90,04	0,00814	0,97	1,03
	2	89,83	90,1	0,00730	1,15	1,74
	5	89,83	90,21	0,00622	1,46	3,42
	10	89,83	90,46	0,00189	1,3	7,71
	15	89,83	90,84	0,00056	1,03	14,52
7	1	89,46	89,74	0,00812	0,89	1,12
	2	89,46	89,79	0,00709	1,1	1,81
	5	89,46	89,97	0,00249	1,1	4,53
	10	89,46	90,49	0,00029	0,7	14,38
	15	89,46	90,85	0,00017	0,69	21,88

Продолжение таблицы 3

№ створа	Расход, м3/с	Отметка дна, м	Уровень воды, м	Уклон в. п.	Средняя скорость, м/с	Площадь поперечного сечения, м2
6	1	88,66	89,53	0,00003	0,19	5,29
	2	88,66	89,65	0,00007	0,3	6,56
	5	88,66	90	0,00011	0,46	10,79
	10	88,66	90,5	0,00010	0,52	19,24
	15	88,66	90,86	0,00009	0,56	26,58
5	1	89,23	89,48	0,00397	0,96	1,04
	2	89,23	89,59	0,00360	1,08	1,85
	5	89,23	89,96	0,00073	0,89	5,62
	10	89,23	90,48	0,00032	0,81	12,4
	15	89,23	90,83	0,00023	0,83	18,15
4	1	89,1	89,37	0,00450	1,05	0,95
	2	89,1	89,47	0,00418	1,28	1,57
	5	89,1	89,94	0,00079	0,93	5,39
	10	89,1	90,46	0,00037	0,84	11,95
	15	89,1	90,82	0,00026	0,86	17,51
3	1	88,47	89,41	0,00003	0,18	5,58
	2	88,47	89,52	0,00006	0,29	6,79
	5	88,47	89,96	0,00007	0,42	11,96
	10	88,47	90,48	0,00007	0,53	18,87
	15	88,47	90,83	0,00008	0,63	23,87
2	1	88,75	89,41	0,00005	0,23	4,38
	2	88,75	89,52	0,00011	0,37	5,37
	5	88,75	89,95	0,00012	0,52	9,71
	10	88,75	90,47	0,00012	0,63	15,97
	15	88,75	90,83	0,00013	0,72	20,89
1	1	89,09	89,33	0,00705	1,17	0,86
	2	89,09	89,45	0,00377	1,12	1,78
	5	89,09	89,94	0,00042	0,71	7,08
	10	89,09	90,46	0,00020	0,68	14,8
	15	89,09	90,82	0,00016	0,71	21,17
0	1	88,5	89,28	0,00006	0,22	4,61
	2	88,5	89,49	0,00006	0,28	7,22
	5	88,5	89,95	0,00006	0,37	13,57
	10	88,5	90,47	0,00006	0,44	22,83
	15	88,5	90,83	0,00006	0,49	30,35

По результатам расчетов для трех случаев построены кривые $Q = f(H)$ для расчетного створа.

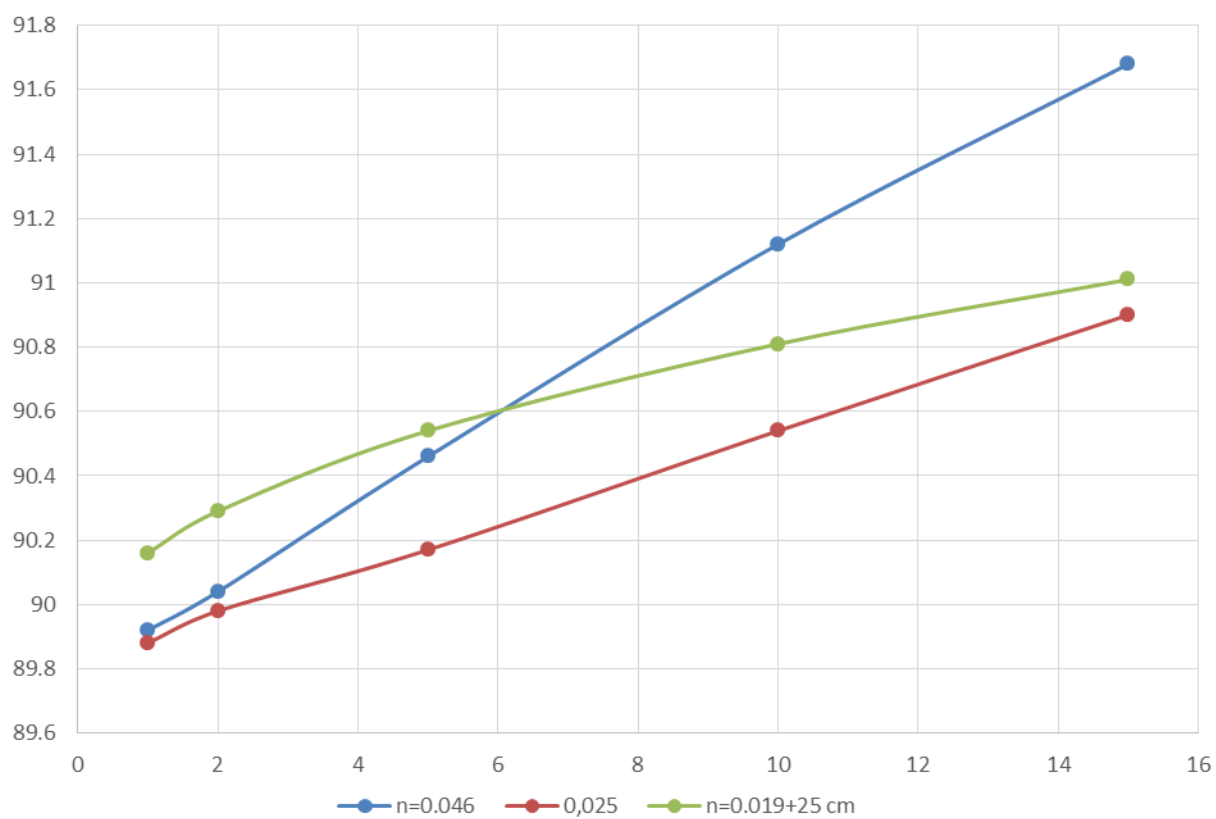


Рисунок 8. Графики $Q = f(H)$ для различных коэффициентов шероховатости

Из графика можно сделать вывод, что полегание водной растительности уменьшает сопротивление и увеличивает пропускную способность.

ВЫВОД

В ходе выполнения данной выпускной квалификационной работы были рассмотрены теоретические аспекты, касающиеся гидравлического зарастания русел рек, а также проведены натурный и численный эксперименты. В рамках теоретического изучения были рассмотрены различные методики, помогающие учитывать сопротивление зарастающих русел рек, в частности, были рассмотрены труды Барышникова Н. Б, Гришанина К. В, Карасева И.Ф, Срибного М.Ф., Боровкова В. С., труды Государственного Гидрологического института и многие другие.

В результате проведения натурного эксперимента была получена общая схема полегания водной растительности на участке реки Оредеж для естественного русла, а также схемы залегания водной растительности при деформации русла – его искусственном сужении и искусственном расширении. По данным схемы залегания растительности естественного русла был построен график зависимости угла наклона растительности от скорости потока.

В результате проведения численного эксперимента были рассмотрены три вида зарастающего речного русла: полностью поросшее русло, русло с прокошенной водной растительностью и русло с полегшей растительностью. С помощью программы HEC-RAS были рассмотрены гидрометрические характеристики, такие как уклон, уровень воды, средняя скорость потока, площадь поперечного сечения и так далее. По данным расчетов были построены графики $Q = f(H)$.

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Барышников, Н. Б.. Гидравлические сопротивления речных русел: учебное пособие / Барышников Н.Б. СПб, изд. РГГМУ, 2003 - 147 с.
2. Боровков, Б. С. Русловые процессы и динамика речных потоков на урбанизированных территориях: учебное пособие / Б. С. Боровков – Ленинград Гидрометеиздат, 1989.
3. Водокрасовые. Википедия. Интернет-ресурс - <https://ru.wikipedia.org/wiki/Водокрасовые> (Дата обращения: 26.05.2018)
4. Высшие водные растения и их значения. Интернет-ресурс - <http://sunat.admhmansy.ru/upload/iblock/f79/f79e6a6e08d6c4e4b0b07c77559906a6.pdf>. (Дата обращения: 17.05.2018)
5. Злаковые. Википедия. Интернет-ресурс – <https://ru.wikipedia.org/wiki/Злаки> (Дата обращения: 26.05.2018)
6. Исаев, Д. И. Гидравлические сопротивления зарастающих речных русел малых рек: научная статья / Исаев Д.И., Тарасов А.И., Фалеева О.А. – Санкт-Петербург. 2017
7. Леонов, Е. А.. Некоторые характеристики зарастающего речного русла в связи с методикой учета стока воды: учебное пособие / Е. А. Леонов. – Труды ГГИ. – 1960. – Вып.77.
8. Лютиковые. Википедия. Интернет-ресурс – <https://ru.wikipedia.org/wiki/Лютиковые> (Дата обращения: 27.05.2018)
9. Основные гидрологические характеристики Т.2 – Часть 1-2, Бассейн Балтийского моря – 1980.
10. Осока. Википедия. Интернет-ресурс - <https://ru.wikipedia.org/wiki/Осока> (Дата обращения: 26.05.2018)

11. Рдест. Википедия. Интернет-ресурс -
<https://ru.wikipedia.org/wiki/Рдест> (Дата обращения: 26.05.2018)
12. Хвощ приречный. Википедия. Интернет-ресурс -
https://ru.wikipedia.org/wiki/Хвощ_приречный (Дата обращения:
25.05.2018)
13. Частуховые. Википедия. Интернет-ресурс -
<https://ru.wikipedia.org/wiki/Частуховые> (Дата обращения: 26.05.2018)

Приложение 1. Рекомендуемые значения коэффициента шероховатости n в формуле Маннинга для естественных русел и пойм, таблица по Срибному (ТУ-24-02)

Категория	Описание водотока	n
1	Естественные русла в весьма благоприятных условиях (чистое, прямое в плане, совершенно незасоренное земляное русло со свободным течением)	0,025
2	Русло постоянных водотоков равнинного типа преимущественно больших и средних рек в благоприятных условиях состояния ложа и течения воды	0,033
3	Сравнительно чистые русла постоянных равнинных водотоков в обычных условиях, извилистые, с некоторыми неправильностями в направлении струй, или же прямые, но с неправильностями в рельефе дна (отмели, промоины, местами камни)	0,040
4	Русла (больших и средних рек) значительно засоренные, извилистые и частично заросшие, каменистые с беспокойным течением Периодические (ливневые и весенние) водотоки, несущие во время паводка значительное количество наносов с крупногалечным или покрытым растительностью, травой и прочим ложем. Поймы больших и средних рек, сравнительно разработанные, покрытые растительностью (травой, кустарниками)	0,050
5	Русла периодических водотоков, сильно заросшие и извилистые. Значительно заросшие, неровные, плохо разработанные поймы рек (промоины, кустарники, деревья) с наличием заводей. Порожистые участки рек. Галечно-валунные русла горного типа с неправильной поверхностью водного зеркала	0,067
6	Реки и поймы, весьма значительно заросшие (со слабым течением), с большими глубокими промоинами. Валунные, горного типа русла с бурным пенистым течением с изрытой поверхностью водного зеркала (с летящими вверх брызгами воды)	0,080
7	Поймы такие же, как и предыдущей категории, но с сильно неправильным косоструйным течением, заводями и пр. Горно-водорезного типа русла с крупновалунным извилистым строением ложа, перепады ярко выражены, пенистость настолько сильна, что вода, потеряв прозрачность, имеет белый цвет, шум потока доминирует над всеми остальными звуками, делает разговор затруднительным	0,100
8	Реки болотного типа (заросли, кочки, во многих местах почти стоячая вода и пр.). Поймы лесистые, с очень большими мертвыми пространствами, с местными углублениями, озерами и пр.	0,133
9	Потоки типа селевых, состоящие из грязи, камней и пр. Глухие поймы, сплошь лесные, таежного типа. Склоны бассейнов в естественном состоянии	0,200

Приложение 2. В. Т. Чоу «Гидравлика открытых каналов» (М., Госстройиздат, 1969)

Категория	Описание водотока	п		
		мин.	норм.	макс.
а	Малые водотоки, ширина паводкового уровня меньше 100 футов (30,48 м) Равнинные чистые прямолинейные с полным заполнением, без перекатов или глубоких омутов	0,025	0,03	0,033
	-----//-----, при наличии водорослей и камней	0,03	0,035	0,04
	чистые извилистые, с омутами и отмели	0,033	0,04	0,045
	-----//-----, при наличии водорослей и камней	0,035	0,045	0,05
	то же, при низком уровне и более неправильным уклоне и сечении .	0,04	0,048	0,055
	чистые извилистые, с омутами, водорослями и большим количеством камней	0,045	0,05	0,06
	заросшие, с глубокими омутами при медленном движении	0,05	0,07	0,08
	очень заросшие, с глубокими омутами или каналы для пропуска паводочных вод с застрявшими тяжелыми стволами и порослью	0,075	0,1	0,15
б	Водотоки с хорошим обслуживанием, без растительности, берега обычно крутые, кусты и деревья по берегам заливаются при высоком уровне воды дно сложено из гравия, булыжника и редких валунов	0,03	0,04	0,05
	Водотоки с хорошим обслуживанием, без растительности, берега обычно крутые, кусты и деревья по берегам заливаются при высоком уровне воды дно сложено из булыжника с крупными валунами	0,04	0,05	0,07
Категория	Описание водотока	п		
		мин.	норм.	макс.
а	Пойменные водотоки Пастбища без кустарника низкая трава	0,025	0,03	0,035
	высокая трава	0,03	0,035	0,05
б	Возделываемые площади без посевов	0,02	0,03	0,04
	созревшие рядовые посевы	0,025	0,035	0,045
	созревшие сплошные посевы	0,03	0,04	0,05
в	Кустарники отдельные кусты, обильная растительность	0,035	0,05	0,07

Продолжение приложения 2. В. Т. Чоу «Гидравлика открытых каналов» (М., Госстройиздат, 1969)

	редкие кусты и деревья зимой	0,035	0,05	0,06
	то же, летом	0,04	0,06	0,08
	кустарник средней и большой густоты зимой	0,045	0,07	0,11
	то же летом	0,07	0,1	0,16
г	Деревья густой ивняк летом	0,11	0,15	0,2

Приложение 2. Продолжение таблицы

Категория	Описание водотока	п		
		мин.	норм.	макс.
г	очищенная территория с древесными пнями без поросли	0,03	0,04	0,05
	то же, с развивающейся порослью	0,05	0,06	0,08
	тяжелые застрявшие стволы отдельных поваленных деревьев, небольшой подлесок, уровень воды в паводок ниже ветвей	0,08	0,1	0,12
	то же, но уровень воды в паводок достигает ветвей	0,1	0,12	0,16
Категория	Описание водотока	мин.	норм.	макс.
а	Большие водотоки, ширина в паводок больше 100 футов (30,48 м); значение п меньше, чем для малых потоков в идентичных условиях, поскольку эффективное сопротивление берегов при этом меняется Однородное сечение без валунов и кустарника	0,025		0,06
б	Неоднородное и шероховатое сечение	0,035		0,10



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

Кафедра гидрометрии

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
(бакалаврская работа)

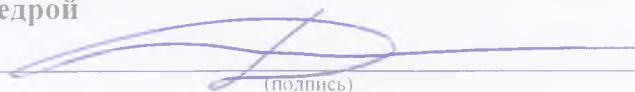
На тему **Гидравлические**
сопротивления зарастающих
русел малых рек

Исполнитель Баскакова Анастасия Ивановна
(фамилия, имя, отчество)

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

Исаев Дмитрий Игоревич
(фамилия, имя, отчество)

«К защите допускаю»
Заведующий кафедрой


(подпись)

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

Исаев Дмитрий Игоревич
(фамилия, имя, отчество)

«__» _____ 20__ г.

Санкт-Петербург
2018