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

Кафедра гидрометрии

НАУЧНО-КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА

(диссертация)

На тему **Гидравлические сопротивления зарастающих речных русел**

Исполнитель	Тарасов Артём Игоревич
	(фамилия, имя, отчество)
Руководитель	кандидат географических наук, доцент
	(ученая степень, ученое звание)
Исаев Дмитрий Игоревич	
(фамилия, имя, отчество)	
Научный консультант	
	(ученая степень, ученое звание)
(фамилия, имя, отчество)	
«К защите допускаю» Заведующий кафедрой	
(подпись)	
кандидат географических наук, доцент	
(ученая степень, ученое звание)	
Исаев Дмитрий Игоревич	
(фамилия, имя, отчество)	

«___»__________2018 г.

Санкт–Петербург

2018

СОДЕРЖАНИЕ

СОКРАЩЕНИЯ

ГГИ — Государственный Гидрологический Институт;

РГГМУ — Российский Государственный Гидрометеорологический Университет.

ВВЕДЕНИЕ

Малые, средние, а иногда и большие реки в межень зарастают водной растительностью, которая оказывает значительное дополнительное сопротивление движению руслового потока. Как отмечает К.В. Гришанин, растительность является особым и очень сложным видом шероховатости.

Зарастание рек – сложный процесс, развитие которого обусловлено совместным влиянием естественных и антропогенных факторов. Растительное сообщество в ходе своего развития и жизнедеятельности меняет условия своего существования, подчиняясь естественным закономерностям. Вместе с тем активная деятельность человека на водосборе реки вносит существенные коррективы в процессы развития травяной биомассы. Основные факторы, обусловливающие развитие водной растительности можно объединить в следующие группы:

–гидрологический режим реки;

–термический режим;

–естественный химический состав воды;

–антропогенное воздействие.

Гидравлические сопротивления зарастающих русел рек являются одной из основных проблем речной гидравлики. Правильный и аргументированный учет гидравлических сопротивлений должен иметь место в расчетах важнейших характеристик речного потока, таких как средняя скорость, расход воды и др.

Вместе с тем степень изученности характеристик течения в заросших руслах недостаточна как для инженерных расчетов, так и для разработки концепций о гидродинамических закономерностях таких течений.

Цель исследования заключается в количественной оценке коэффициентов сопротивления для речных русел, подверженных зарастанию, и разработке методики учета стока малых зарастающих рек в период прохождения паводков.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Исследовать закономерности развития и распространения в одолюбивой растительности, а также особенности режима гидравлических сопротивлений зарастающих речных русел.

2. Выявить определяющие факторы и установить критериальные комплексы для обобщенной количественной оценки при зарастании.

3. Получить расчетную формулу для коэффициентов шероховатости в зависимости от системно-зональных гидрологических факторов.

4. Оценить гидравлические сопротивления зарастающих речных русел малых водотоков в различные фазы вегетации.

5. Разработать модель гидрометрического учета стока зарастающих рек.

6. Разработать методику и алгоритмы автоматизированного учета стока зарастающих рек для внедрения их компьютерной технологии в гидрологическую сеть.

Новая, разрабатываемая 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, разрабатываемая 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 ИССЛЕДОВАНИЯ ЗАРАСТАНИЯ РЕЧНЫХ РУСЕЛ

Сопротивление однородной наземной растительности широко изучалось в метеорологии. Теоретическое описание профиля скоростей над сельскохозяйственными полями и над лесными массивами приводится, в частности, в работе А.С. Монина и А.М. Яглома. Полученные результаты теоретических исследований приземного слоя атмосферы получили достаточно надежное подтверждение натурными данными. Значительно сложнее обстоит проблема расчета гидравлических сопротивлений в зарастающих руслах. Это обусловлено весьма сложной структурой потоков в заросших руслах, трудно поддающейся схематизации и анализу.

Разработка концепций гидродинамических закономерностей течений в заросших руслах связана с рядом трудностей, таких как весьма сложная структура потоков в заросших руслах, а также с влиянием разнообразных факторов растительного слоя, которые трудно поддаются анализу и схематизации. Особенно сложным является пространственное течение в руслах, частично зарастающих по берегам.

Выполненные к настоящему времени исследования позволяют представить поток в широком русле, частично заросшем по глубине, в виде комбинации двух потоков, характеристики которых взаимосвязаны: потока над растительностью и потока в растительном слое, что показано на рисунке 1.1. Между этими двумя потоками имеется зона динамического взаимодействия.

На поток в пределах растительного слоя оказывают влияние как сопротивление растительности, так и трение по дну. Допустим, что поток над растительностью находится в сходных условиях течения с обычным открытым потоком в жестком русле. Следует отметить, однако, что на нижней границе такого потока, совпадающей с вершинами растений скорость отлична от нуля; Существенным отличием является также подвижность вершин растений под действием потока, которая изменяет шероховатость граничной поверхности влияет на структуру турбулентности в потоке над растительностью.

В тех случаях, когда над слоем растительности имеется достаточный слой воды, ее движение возбуждает в растительном слое волны, – такие же, какие можно наблюдать на полях пшеницы или ржи во время ветра. Влияние волновых колебаний придонной растительности на кинематику и динамику поток было теоретически и экспериментально изучено В.М. Лятхером и И.Н. Гуриным. Было найдено, что волны на поверхности растительности увеличивают скорость течения, то есть уменьшают коэффициент трения по сравнению с движением над неподвижной растительностью. По-видимому, в этом сказывается тот факт, что волны распространяются в том же направлении, в котором течет вода.

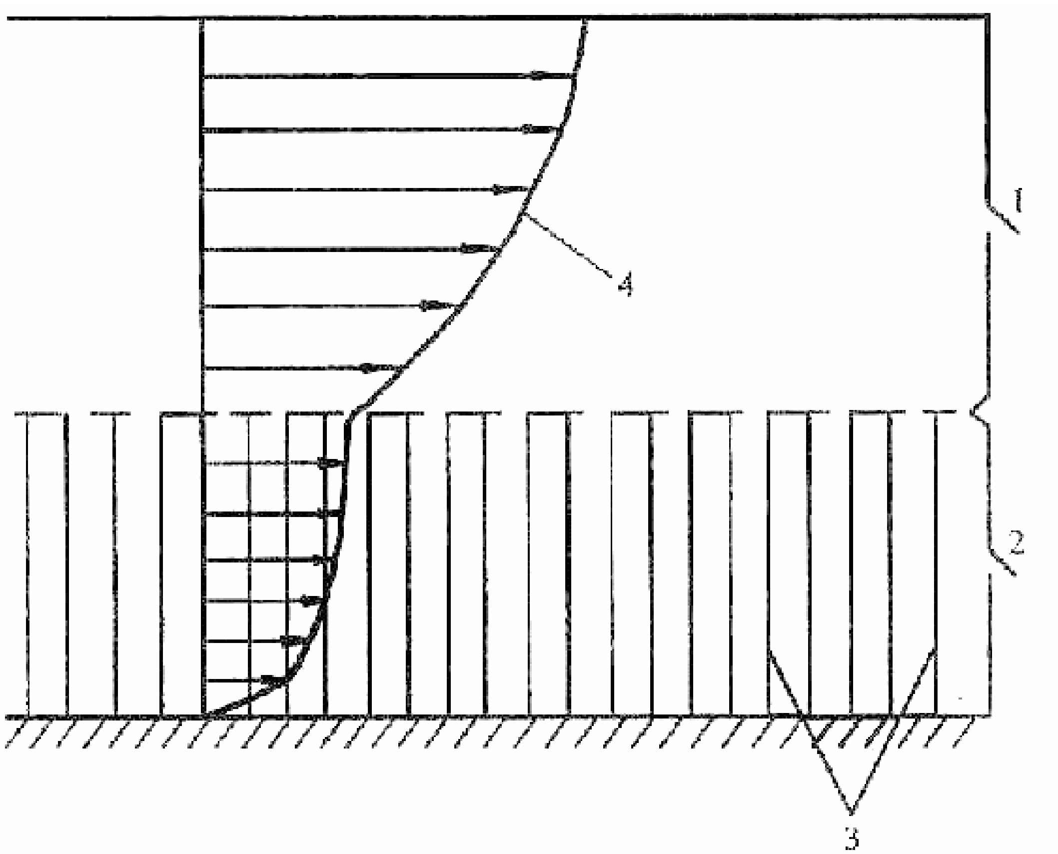

Рисунок 1.1 – Схема течения в заросшем русле

1 – течение потока над растительностью; 2 – течение потока в пределах растительного слоя; 3 – растительные элементы; 4 – эпюра скорости

В течение вегетационного сезона влияние растительности также изменяется, в период ее роста уровни воды увеличиваются, по сравнению с не заросшим руслом, затем, в течение какого-то времени остаются неизменными. В то же время при пропуске летне-осенних паводков растительность в русле реки под действием больших масс воды уплотняется, что приводит к уменьшению гидравлических сопротивлений.

Весьма сложным для изучения и теоретического описания представляется поток в пределах растительного слоя, где на характеристики течения влияет множество факторов, связанных с обтеканием растительных элементов, а также трение потока по дну. В зависимости от плотности растительности, ее вида, возраста, поверхности, а также геометрии, влияние тех или иных факторов может проявляться в различной степени.

Особую сложность для исследования представляет течение в зоне динамического взаимодействия потоков над растительным слоем и в его пределах[1, 2].

1.1Анализ результатов опубликованных исследований

Первая сводка о меженном режиме зарастающих рек составлена Г. И. Швецом, по данным которого максимальное повышение уровня вследствие развития растительности в русле бывает весьма различным и достигает в отдельных случаях даже 1.5 – 2.0 м. Величину подпора Швец рассматривает только в связи со средней глубиной потока. Эта величина, несомненно, зависит еще и от формы русла, распределения в нем растительности, вида последней и от некоторых других факторов.

По данным В. А. Лудова, при малом наполнении экспериментального канала поток обтекал лишь прикорневые стволы растений со сравнительно небольшой суммарной площадью миделевых сечении. По мере увеличения глубины в потоке оказывалось все большее число растительных элементов в связи с их ветвлением, поэтому сопротивление возрастает. Максимум сопротивлений совпадает с режимом полного затопления растительности. Дальнейшее увеличение глубины приводит к тому, что все большая часть расхода проходит над растительным слоем при значительных скоростях течения, (что до некоторой степени адекватно уменьшению относительной шероховатости), поэтому в этой области коэффициент гидравлического трения уменьшается с ростом чисел Рейнольдса. Интересно отметить, что с увеличением уклона, (а следовательно, и скорости течения при прочих равных условиях), максимум сопротивления смещается в область меньших чисел Рейнольдса и становится менее выраженным, что связано с полеганием растительных элементов.

Сопоставляя сопротивление полегающих и стоящих растительных элементов при одной и той же площади поверхности получим, что полегание растительных элементов может значительно снизить их сопротивление.

Заметим, что в зависимости от уровня воды, при одной и той же растительности русло реки может представлять собой водоток с полностью или частично заросшим руслом.

Растительность – это особый и очень сложный вид шероховатости. Попытки исследования проблемы влияния растительности на гидравлические сопротивления русел и пойм рек предпринимались неоднократно различными авторами.

Сопротивление однородной наземной растительности широко изучалось в метеорологии. Были проведены большие серии натурных наблюдений и предложена нелинейная система уравнений для двухслойной задачи, описывающая процессы турбулентного обмена в этих слоях. Для решения этой системы была предложена математическая модель и схема расчета поля скорости ветра внутри растительности и над ней, и по ней произведен расчет скоростных полей. Результаты расчетов весьма хорошо согласовывались с натурными данными.

Ю. Н. Соколовым, совместное А. С. Головатюк были проведены обширные эксперименты по изучению скоростных полей в натурных условиях на зарастающих поймах. Измерения проводились в условиях естественной растительности и на специально оборудованных площадках, характер растительности на которых задавался в ходе эксперимента.

Ими предложена зависимость

$$n = \frac{b}{\sqrt[4]{Fr \cdot I \cdot \sqrt[3]{I}}}, \quad (1.1)$$

где n – коэффициент шероховатости в растительном слое; b – параметр, зависящий от высоты растительности; Fr – число Фруда; I – гидравлический уклон.

Расчетная зависимость для определения коэффициента шероховатости предложенная И.Ф. Карасевым

$$n_3 = [n_0^2 ((1 - d_p \sqrt{(\alpha_г + (182 h^{(1/3)} \alpha_г d_p h_p)/(2g ((Re * 10)^{(-3)}))}$$

где $d_р$, $h_р$, $\alpha_г$ – характеристики зарастаний соответственно: $d_р$ – диаметр, м; $h_р$ – высота стеблей, м; $\alpha_г$– относительная густота водных растений (число водных растений на 1 м^2).

Величина 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 щ может быть представлено в виде некоторой функции 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.

Большое внимание проблемам гидравлических расчетов, заросших русел уделяется и за рубежом.

В. Т. Чоу проводил эксперименты в каналах и на поймах, заросших травой. В результате этих исследований им были рекомендованы таблицы для определения коэффициента шероховатости *n*, и предложена методика определения вида растительности при проектировании каналов для защиты их от размывов, а также расчет максимальной пропускной способности зарастающих каналов.

Одну из расчетных схем для оценки гидравлических сопротивлений в зарастающих руслах предложил А. Найт. Введя ряд допущений, в частности, выбрав длину участка таким образом, что расположенных в ее пределах растений достаточно для полного перекрытия живого сечения русла, после некоторых преобразований получил следующее выражение:

$$\lambda_{з} = \lambda_0 \left(1 - d_{р}\sqrt{\alpha_{г}}\right) + k_{л}\alpha_{г} d_{р} h_{р}, \tag{1.3}$$

где λ_0 – коэффициент сопротивления дна; $d_{р}$ – поперечный размер растений; $k_{л}$ – коэффициент лобового трения; $\alpha_{г}$ – относительная густота водных растений; $h_{р}$ – высота водных растений в толще потока [1, 2].

1.2 Исследования В.С. Боровкова

Особенно хочется отметить исследования В.С. Боровкова по изучению характеристик течения в заросших руслах.

Согласно исследованиям В.С. Боровкова основными интегральными характеристиками течения в заросшем русле являются средняя скорость течения ($V_{ср}$) и коэффициент гидравлического трения (λ).Для заросшего русла, в пределах которого существует и взаимодействует два потока (поток над растительным слоем и поток в пределах растительного слоя), можно рассмотреть интегральные характеристики для всего потока в целом, а также в отдельности для каждого из указанных потоков в отдельности.

Трение по дну в ряде случаев намного меньше сопротивления растительных элементов. В этом случае баланс сил для всего потока будет иметь вид:

$$\rho g h I = \rho \frac{V_{\text{р}}^2}{2} S_{\text{м}} C_D k_{\text{в}} \frac{1}{M_{\text{р}}^2}. \qquad (1.4)$$

где $V_{\text{р}}$–средняя скорость течения в пределах растительного слоя ;$S_{\text{м}}=f(h_{\text{р}}, d_{\text{р}})$– площадь миделя растительного элемента, его средняя высота и характерный поперечный размер растительных элементов ;C_D – коэффициентгидродинамического сопротивления одиночного элемента ; $k_{\text{в}}$ – коэффициент взаимного влияния растительных элементов, учитывающий степень гидродинамического «затенения» нижестоящего по течениюэлемента вышестоящим;$M_{\text{р}}$– средний размер площади дна, на которой закреплен один растительный элемент.

В качестве растительного элемента здесь рассматриваетсярастение, имеющее непосредственный контакт с грунтом.Следует отметить, что геометрические и гидродинамические характеристики растительных элементов изменяются в зависимостиот степени затопления их водным потоком. Так, например, при незначительном затоплении чистого лесного массива в качестве характерного поперечного размера растительного элемента $d_{\text{р}}$следует принимать диаметр ствола, коэффициент сопротивления C_D, при этом принимать для цилиндра, а коэффициент взаимного влияния устанавливать в зависимости от взаимной расстановки стволов. При больших затоплениях площадь миделя $S_{\text{м}}$ в большей степени определяется кроной, так же как C_D и $k_{\text{в}}$, в то время каксопротивление стволов оказывается сравнительно небольшим.

Для определения коэффициента гидравлического сопротивления используется формулу:

$$\rho g h I = \frac{\lambda}{8}\rho V^2, \qquad (1.5)$$

тогда

$$\lambda = 4\frac{V_р^2}{V^2} S_м C_D k_в \frac{1}{M_р^2}. \qquad (1.6)$$

Для полностью заросшего русла:

$$V_р = \frac{Q}{\omega}, \qquad (1.7)$$

где ω – полная площадь поперечного сечения русла, включая часть площади, занятой растительными элементами и учитывая, что $V = V_р$, имеем:

$$\lambda_з = 4\frac{V_р^2}{V^2} S_м C_D k_в \frac{1}{M_р^2}. \qquad (1.8)$$

Обозначая комплексную характеристику растительного слоя через

$$\frac{M_р^2}{S_м C_D k_в} = \qquad (1.9)$$

запишем

$$\lambda_з = \frac{4}{j^2}. \qquad (1.10)$$

Величина j, включающая известные геометрические и гидродинамические характеристики растительности, вычисляется по этим характеристикам, либо может устанавливаться экспериментально по измерениям сопротивления заросшего русла. При известной величине j средняя скорость течения в полностью заросшем русле определяется из уравнения:

$$\rho g h I = \frac{\lambda_з}{8}\rho V_р^2 = \frac{1}{2j^2}\rho V_р^2. \qquad (1.11)$$

$$V_р = \sqrt{2} u_* j. \qquad (1.12)$$

Таким образом, интегральные характеристики полностью заросшего русла определяются по формулам 1.10 и 1.12. Отметим еще раз, что эти выражения получены для условий, когда сопротивление дна намного меньше сопротивления растительных элементов [3].

1.3 Исследования Е. А. Леонова

Государственным Гидрологическим Институтом (ГГИ) в течение 1956 – 1958 гг. на нескольких постах на участках зарастающих рек Исса, Ловать, Сороть и Усвяча велись исследования по изучению характеристик зарастающего речного русла.

Появление водной растительности в русле реки приводит к нарушению устойчивой однозначной зависимости уровня от расхода воды. Точки $(Q,\ H)$ ложатся левее кривой расходов свободного русла, т. е. при прохождении некоторого расхода воды в заросшем русле наблюдается уровень, более высокий, чем при пропуске такого же расхода в свободном русле.

Этот эффект повышения уровня называют «подпором» от растительности, а некоторые авторы, не совсем удачно, – «вспучиванием» и т. п.

При изучении режима уровня воды зарастающих рек необходимо различать изменения уровня:

1) вызванные изменением водности потока;

2) обусловленные изменением сопротивления русла.

Наиболее часто встречаются случаи, когда изменения уровня воды происходят одновременно как за счет изменения состояния растительности (рост, отмирание), так и вследствие изменения водности потока.

Таким образом, почти всегда приходится иметь в виду только преимущественное влияние одной причины – сопротивления или водности.

Даже в том случае, когда количество растительности в русле остается неизменным, а наблюдается изменение водности, то доля участия растительности в формировании сопротивления русла также изменяется.

Даже визуальные наблюдения показывают, что в руслах с неравномерным распределением растительности наблюдается неравномерное распределение скоростей. Притом, в отличие от свободного русла, где эпюра распределения скоростей по ширине близка к параболической с одним максимумом приблизительно около середины потока, эпюра скоростей в заросшем русле имеет неправильную форму с несколькими максимумами и минимумами.

Наличие нескольких максимумов («пиков») определяется обособленными токами воды в заросшем русле. Эти токи мы назвали струйным течением, потому что они напоминают струйные течения в атмосфере – узкие полосы очень сильных ветров.

Первоначально струйные течения возникают гам, где отсутствует растительность или густота ее на каком-то узком участке незначительна по сравнению с окружающими участками. После образования струйной зоны развитие растительности из-за повышенных скоростей на данной узкой полосе сдерживается.

Струйные течения характеризуются значительно повышенными скоростями, большой протяженностью при малой ширине и направлением, отклоняющимся от основного направления русла.

Для того чтобы выяснить, во сколько раз возрастает скорость при возникновении струйного течения в заросшем русле, был проведен следующий опыт.

На участке реки с ровным дном и равномерно заросшим однородной растительностью в направлении по течению вверх и вниз от места измерений скорости выкашивалось последовательно «окно» длиной 0.5, 1, 2, 4, 6, 8, 10 и 12 м при постоянной ширине 1 м. Как показали измерения, скорости течения при длине «окна» 10 м возрастали по сравнению с бытовыми, т. е. до выкашивания, более чем 2.5 раза.

В результате наблюдений за величиной и направлением скоростей на участке реки, заросшем весьма неравномерно по густоте и по видовому составу растительности, были получены данные о распределении скоростей как в плане, так и по вертикали.

На рисунке 1.2 показан план участка р. Иссы в районе поста Визги, на котором велись исследования. На плане видно направление струйного течения, которое находится в определенной связи с распределением растительности.

Наибольшее искривление струйного течения наблюдалось у правого берега в пределах участка створа основного поста.

На рисунке 1.3 видно, как поплавки, попавшие в струйное течение, плывут, описывая извилистую траекторию, напоминающую меандры струйного течения.

Измерения скорости на вертикалях, расположенных в зоне струйного течения, показали, что отклонения от генерального направления русла достигают 30° и даже 45°, а смещение поверхностных струй по отношению к придонным на одной и той же вертикали достигает 40°.

На участке же вдоль левого берега, заросшего равномерно, где струйного течения не наблюдалось, отклонения не превышали 10°.

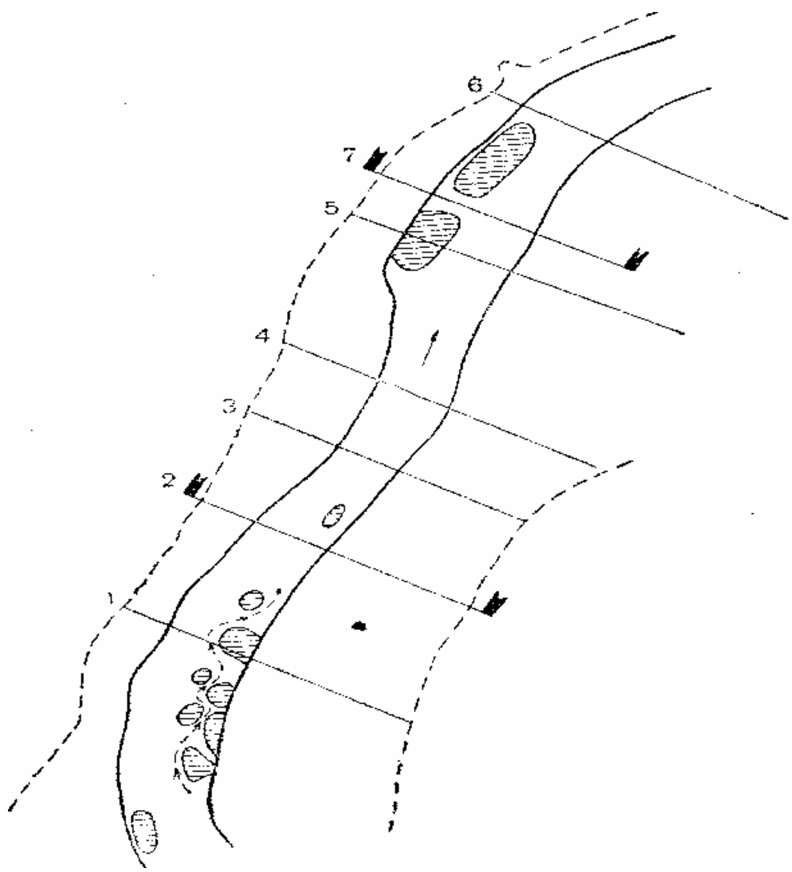

Рисунок 1.2 – План участка р. Иссы в районе поста Визги (заштрихованы куртины растительности). 1, 3, 4, 5 и 6 – уклонные посты, 2 и 7 – гидростворы.

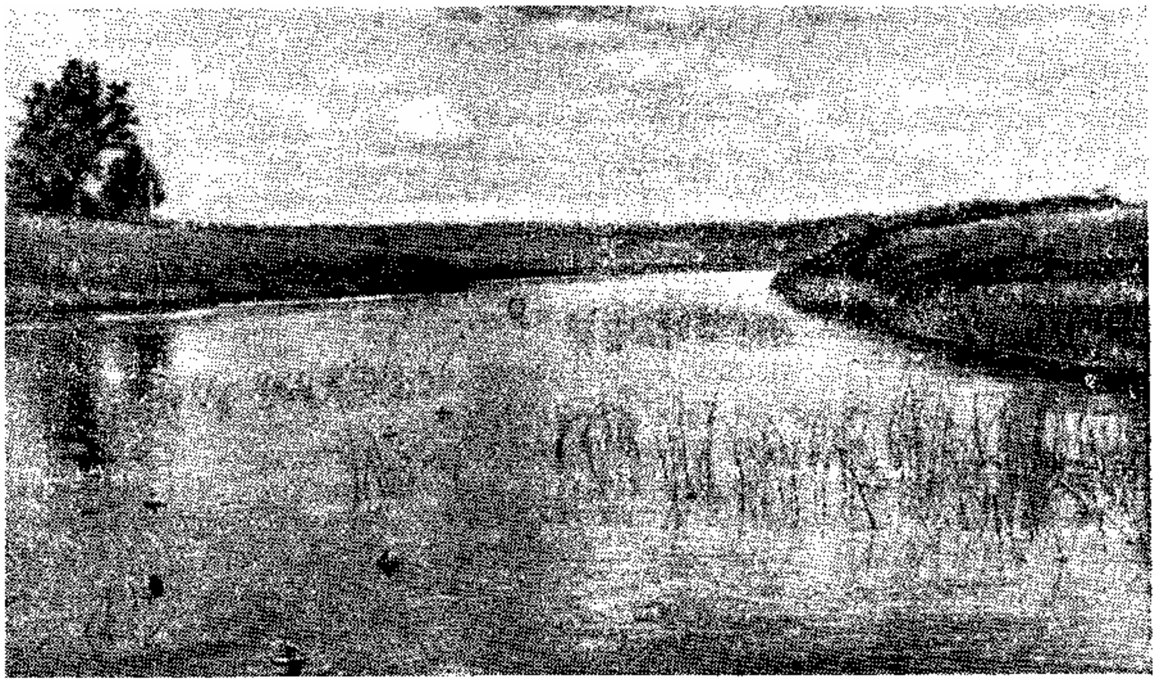

Рисунок 1.3 – Общий вид участка р. Иссы в районе поста Визги

На основании изучения распределения скоростей по ширине заросших участков рек Исса, Ловать и Сороть нам представилось возможным выделить два основных типа распределения скоростей течения по ширине русла (рисунок 1.4).

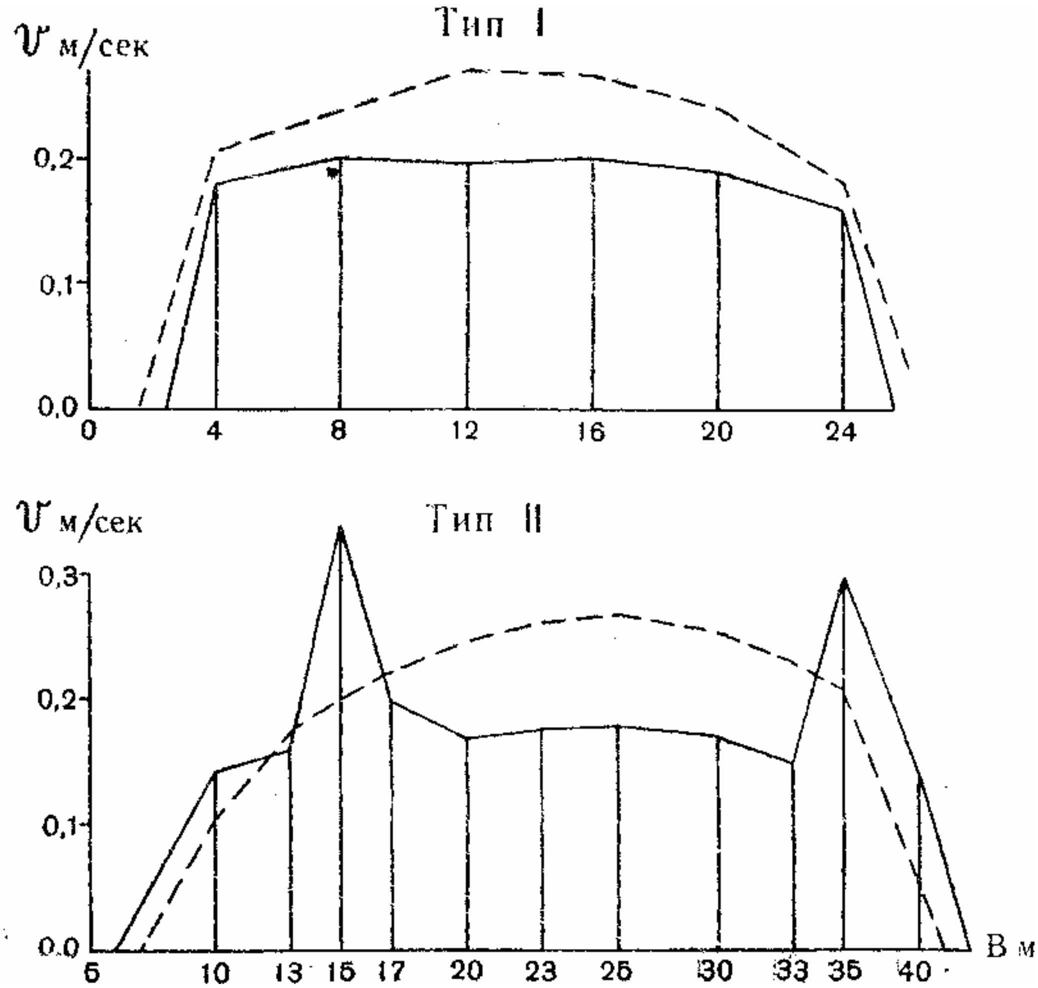

Рисунок 1.4 – Типы распределения скоростей течения по ширине русла. Пунктиром показано распределение при отсутствии растительности, сплошной линией – в заросшем русле

– Тип I – эпюра скоростей имеет вид трапеции; в значительной по ширине средней части русла скорости однообразны; характерен для участков с однородной растительностью равномерной густоты;

– Тип II – характеризуется сложным (пилообразным) распределением скоростей; характерен для участков с неравномерным распределением кустов растительности с различной плотностью.

На участках, вообще слабо зарастающих, и участках, зарастающих только у берегов, встречается параболический тип распределения скоростей, свойственный свободному руслу.

Знание характера распределения скоростей по ширине потока необходимо для правильного выбора гидрометрического створа. Основной практический вывод, который можно сделать из рассмотрения этого вопроса, заключается в следующем: при систематических повторных измерениях расхода воды в заросшем русле нельзя пользоваться постоянными, раз навсегда закрепленными вертикалями, а нужно их назначать, каждый раз сообразуясь с распределением скорости по ширине русла и наличием струйных течений.

Как известно, в свободном русле эпюра распределения скоростей довольно точно описывается уравнением логарифмики.

В заросшем русле эпюра имеет более сложный вид, причем в течение вегетационного периода на одной и той же вертикали эпюры существенно изменяются (рисунок 1.5).

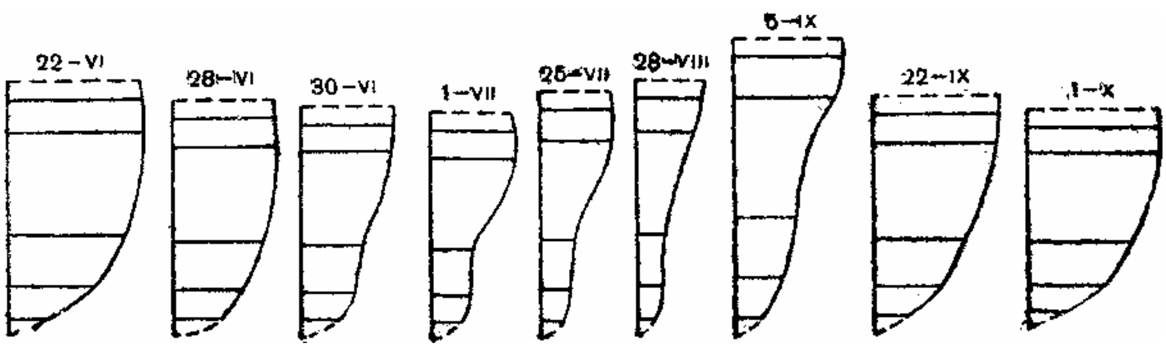

Рисунок 1.5 – Эпюры распределения скоростей на одной и той же вертикали посередине заросшего русла в отдельные моменты времени

Рассмотрение большого числа эпюр распределения скоростей по вертикали для многих участков зарастающих рек бассейнов Великой и Ловати позволило выделить 4 типа эпюр, характерных для различных периодов вегетации (рисунок 1.6).

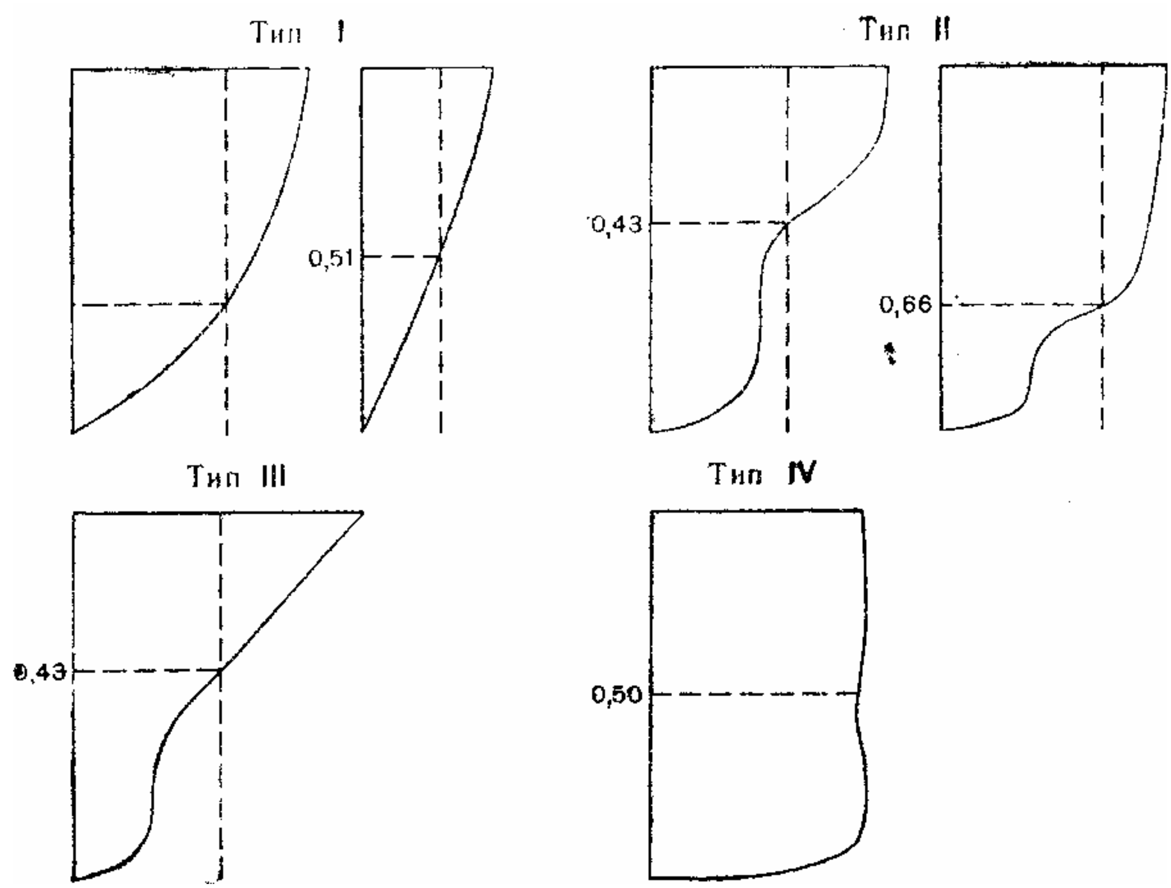

Рисунок 1.6 – Типы эпюр распределения скоростей течения по вертикали в заросшем русле. Числа, стоящие против эпюр, указывают относительную глубину, где скорость течения равна средней скорости на вертикали

I – эпюры правильного логарифмического (или параболического) профиля; II – эпюры с отклонением от правильного профиля в придонном слое; III – эпюры с отклонением от правильного профиля в поверхностном слое; IV – эпюры с практически постоянным значением скорости от дна до поверхности.

Таким образом, формулы Базена, Прандтля, а также современных исследователей, как, например, А. В. Караушева, описывающие распределение скоростей по вертикали, не всегда могут быть использованы для эпюр, наблюдаемых в зарастающем русле.

Известные в литературе многочисленные сведения о коэффициенте шероховатости заросших русел, по-видимому, вычислены при допущении, что растительность в гидрометрическом створе удалена. Так как значения коэффициентов шероховатости для различных рек различны и зависят, кроме того, от фазы вегетации, то многие авторы предлагали визуальные шкалы коэффициентов шероховатости.

М. Ф. Срибный дает, например, для рек, частично заросших, и пойм, покрытых умеренным количеством растительности, коэффициент шероховатости и n = 0.005 и n = 3.75; для рек заросших n = 0.0067 и n = 5.50; для таежных глухих рек с медленным течением n = 0.200.

Б. В. Поляков даже для пойм, заросших лесом, считал, что n = 0.060 является уже наивысшим значением.

Кинг для заросшего и неровного естественного русла рекомендовал брать γ от 1.74 до 4.86.

При использовании в гидравлическом расчете коэффициентов шероховатости всегда возникает неуверенность в достоверности выбранного значения коэффициента. Действительно, при одном и том же зарастании русла, но при разных высотах уровня воды значения коэффициента шероховатости будут различными и поэтому рекомендации Срибного, Полякова и др. можно считать только ориентировочными.

По измерениям автора на посту Визги на р. Иссе коэффициент шероховатости изменялся в течение сезона от 0.040 до 0.210, т. е. в 5 раз.

При определении коэффициента шероховатости заросшего русла неизбежно возникают такие вопросы:

– является ли гидравлический радиус и абсолютная шероховатость основными, параметрами, от которых зависит скоростной множитель C в формуле Шези?

– что принимать за величину гидравлического радиуса и абсолютной шероховатости в заросшем русле?

Формальное распространение общего понятия «гидравлический радиус» как $R = \frac{\omega}{\chi}$ на сечение со стеблями растительности, считая, что ω – сумма площадей просветов между стеблями, а χ – суммарная длина контура стеблей, совершенно недопустимо. Как известно, шероховатость практически твердых поверхностей конкретизируется через величину абсолютной шероховатости. Обычные представления об абсолютной и относительной шероховатости не могут быть использованы при оценке шероховатости заросшего русла, так как высота возвышения растительности над дном даже при постоянной длине стеблей и их форме будет зависеть от скорости потока. Кроме того, шероховатость растительности зависит и от других факторов, не связанных с сопротивлением трения. Наиболее подходящей характеристикой заросшего русла должен быть коэффициент шероховатости, который учитывал бы не только геометрические размеры и формы, но и некоторые упругие свойства стеблей растений, оказывающие влияние на величину сопротивления.

В заросшем русле приходится рассматривать два вида элементов шероховатости – шероховатость дна и шероховатость стеблей. Вследствие наличия стеблей и листьев водной растительности потери энергии не могут целиком определяться сопротивлением трения.

Сопротивление растительности складывается из сопротивления обтекания со срывом вихрей и сопротивления раскачивания (вибрации); последнее определяется той долей энергии потока, которая тратится на раскачивание и поддержание колебательного движения стеблей.

Потери на раскачивание зависят от упругих свойств стеблей и скорости течения воды в русле. При малых скоростях раскачивание не наблюдается; при увеличении скорости колебания появляются и усиливаются. Этот вид сопротивления наступает скачкообразно и может находиться не в квадратичной зависимости от скорости, а в несколько иной.

Наличие нескольких видов проявления сопротивления, в особенности сопротивления от раскачивания стеблей, наводит на мысль, что коэффициент

C в формуле Шези применительно к заросшим руслам не может выражаться только через гидравлический радиус и абсолютную шероховатость, а, по-видимому, зависит в некоторой степени от скорости потока или уклона.

При вычислении коэффициента шероховатости зарастающих рек особое значение приобретает точное определение уклонов водной поверхности. Отсутствие массовых наблюдений над уклонами объясняется, с одной стороны, трудностью их определения, а с другой, – широко распространенным мнением, что данные об уклонах, полученные на каком-то ограниченном участке вдоль одного из берегов, нерепрезентативны и, следовательно, не могут быть использованы для анализа гидравлических зависимостей.

Были организованы наблюдения за уклоном на посту Визги на р. Иссе. Наблюдения за уклоном производились ежедневно в 8 и 20 час. по 6 уклонным постам, расположенным по левому берегу на участке длиной 292 м (на рисунке 1 местоположение уклонных постов указано). Кроме того, на участке длиной 300 м (вверх 120 м и вниз 180 м от основного поста) эпизодически производилась нивелировка водной поверхности. Точки нивелирования брались через равные расстояния – 10 м.

На рисунке 1.7 изображен ход уклонов, ход уровня, ход коэффициентов $K_{зар}$ и расходов, определенных в створе основного поста.

Изучение режима уклонов на зарастающем участке показало, что

1. Изменение уклонов в течение вегетационного периода на участке уклонных постов, расположенных выше основного поста и ниже его, в общем подобно изменению коэффициентов $K_{зар}$. Наименьшим значениям $K_{зар}$ соответствуют и наименьшие значения уклона.

2. Изменение уклонов ниже основного поста, на участке длиной 65 м (от 127 до 192 м), обратно изменению коэффициента $K_{зар}$ и отличается большей изменчивостью – от 2.0 до 0.2 $^{0}/_{00}$.

3. На участке постов № 1 и 2 уклон, по данным нивелировок, практически оставался неизменным.

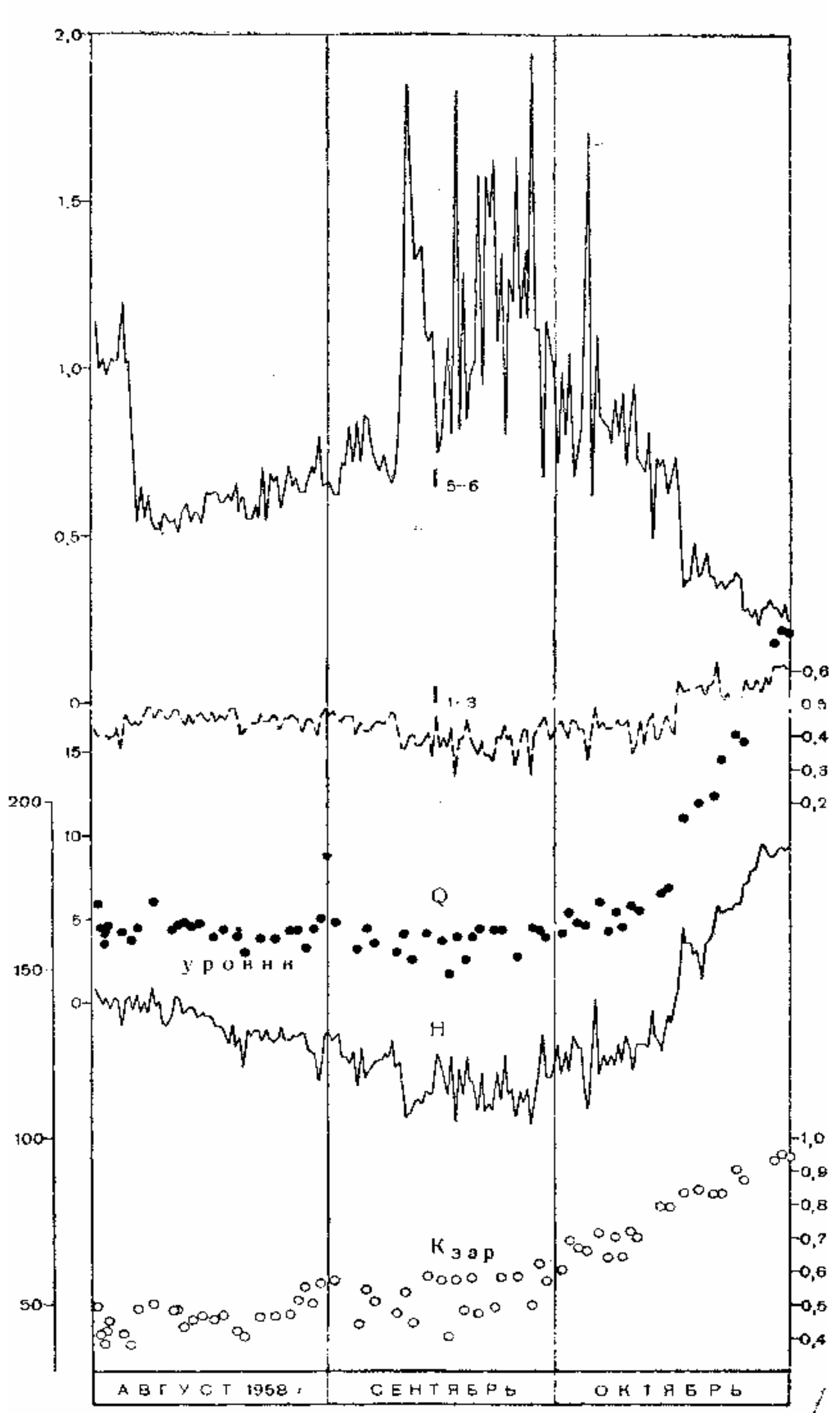

Рисунок 1.7 – Совмещенный по времени график хода уровня, расхода, уклона и коэффициента $K_{зар}$

4. Для осенних паводков, которые проходят, когда растительность уже отмирает, уклоны на спаде меньше, чем на подъеме. Для летних паводков, наоборот, уклон на спаде больше, чем на подъеме.

Изучение режима уклонов многих зарастающих рек северо-запада Европейской части СССР и Эстонии позволило выделить 4 типа изменения уклона в зависимости от степени зарастания и местоположения участка наблюдений по отношению к области наибольшего зарастания:

а) уклон при зарастании меньше уклона при свободном русле при данном уровне и с ростом уровня возрастает;

б) уклон при зарастании больше уклона при свободном русле и с ростом уровня возрастает;

в) уклон при зарастании меньше уклона при свободном русле и с ростом уровня уменьшается;

г) уклон при зарастании больше уклона при свободном русле и с ростом уровня уменьшается.

В результате проведенных исследований для точных опорных измерений расхода воды и вообще повышения точности учета стока воды зарастающих рек рекомендуется следующее:

1. На зарастающих реках с неравномерным распределением кустов водной: растительности различной густоты при разбивке скоростных вертикалей необходимо учитывать расположение кустов водной растительности.

2. Всегда, когда позволяет глубина, рекомендуется удалять (выкашивать) растительность по гидрометрическому створу.

3. Необходимо на всех гидрологических постах, учитывающих речной сток, организовать наблюдения уклона водной поверхности и провести изучение режима уклона по длине на различных участках заросшего русла.

4. На каждом посту необходимо изучить распределение скоростей по вертикалям гидрометрического створа и выбрать наиболее подходящий способ вычисления средней скорости течения на вертикали.

5. Малые значения $K_{зар}$ (меньше 0.3) следует вычислять до третьего знака после запятой [6, 7].

1.4 Постановка задач

Изучив и проанализировав существующие методики оценки коэффициента шероховатости, пришли к заключению, что в расчетных выражениях учитываются не все параметры растительности и не все характеристики потока.

1. Существует множество таблиц и графических зависимостей для определения коэффициента шероховатости и, как известно, в их определение присутствует связь между коэффициентом сопротивления и скоростью потока [иначе говоря число Рейнольдса (Re)]. Значения числа Reбудут отличаться друг от друга в зависимости от

- площади смачивания растительности;
- площади экспозиции стояния растений.

2. Значения коэффициента шероховатости в разные фазы развития растительности будут различными.

3. Надводная и подводная растительность ока зывают разное воздействие на поток. Значения сопротивления будут отличаться.

На основании вышесказанного нами были сформулированы первостепенные задачи, ответы на которые, в конечном счете, послужат основой для решения основных задач исследования:

1. Уточнить кинематику потока при различной степени развития биомассы.

2. Получать значения коэффициента шероховатости и гидравлического сопротивления для каждой группы растений.

3. Разработать методику прогноза развития биомассы в зависимости от влияющих факторов.

4. Выполнить оценку гидравлических сопротивлений зарастающих русел в зависимости от полученных биометрических зависимостей.

2 ОСОБЕННОСТИ ЗАРАСТАНИЯ УЧАСТКА Р. ОРЕДЕЖ

В качестве объекта исследований послужила река Оредеж.

Исследование зарастания водного потока речного русла на примере р. Оредеж было выбрано не без оснований. На данном этапе своего существования исследуемый водоток очень интенсивно зарастает водной растительностью. Причины интенсивного зарастания русла реки высшими водными растениями могут быть различными.

Рисунок 2.1 – Исследуемый участок р. Оредеж

Река Оредеж из-за того, что она подпружена плотинами, затопила свою пойму. Так как пойма является достаточно эвтрофным участком речной долины из-за большого количества органических веществ вследствие отложения речных илов, на ней созданы хорошие условия для развития растений. При затоплении поймы пойменные растения (двукисточник тростниковый, незабудка болотная, вероника ключевая, лютик длиннолистый) образ уют водные формы, а обогащенный грунт способствует бурному развитию рдестов и кубышек (истинно водных растений), что приводит к еще большей эвтрофикации. На процесс эвтрофикации также влияет сброс сточных вод, а, кроме того, попадание минеральных удобрений в реку в связи с их интенсивным использованием (стоки с полей), а зачастую и с небрежным их хранением. Бурное развитие высших водных растений сопровождается развитием водорослей (в частности нитчаток), поселяющихся на подводных стеблях высших водных расте нии. Осушение окрестных болот и, как следствие этого, уменьшение грунтового питания Оредежа, а значит, и поступления холодных ключевых вод, сказалось на изменении температурного режима речной воды в сторону повышения, что также благоприятствует развитию водной растительности. Процесс эвтрофикации в нашей зоне является односторонне направленным процессом, поэтому развитие водной растительности Оредежа будет продолжаться (если не будет вмешательства со стороны человека). Бурное развитие водной растительности с одной стороны затрудняет движение на лодках и ограничивает использование человеком речной воды в бытовых целях, а с другой оказывает положительное влияние на жизнедеятельность водных животных, создавая первичную органическую продукцию, насыщая речную вод у кислородом и очищая ее от избытка солей, которые откладываются на их стеблях.

Исследование зарастания русла реки Оредеж ведется уже не первый год и за это время удалось проанализировать немало особенностей. Среди них и изучение типов водной растительност и, прорастающей в бассейне реки.

Высшие водные растения верховий реки Оредеж составляют 29 видов, относящихся к 23 родам, распределенным между 18 семействами. Они являются представителями 3 классов и 2 отделов высших сосудистых растений. Представителем кл асса Хвощевидных наиболее древнего отдела Папоротникообразных является 1 вид – хвощ речной.

Рисунок 2.2 – Подводная съёмка водной растительности р. Оредеж . Виды водной растительности на дне реки.

Рисунок 2.3 – Подводная съёмка водной растительности р. Оредеж . Виды водной растительности в толще воды.

Отдел Голосеменных полностью отсутствует среди водных растений исследуемого водотока. Отдел Покрытосеменных представлен в водной флоре видами двух классов: класс Однодольных насчитывает 19 видов, а класс Двудольных – 9 видов. Наиболее крупным родом является Рдест (Рисунок 2.4), который содержит 5 видов, произрастающих в районе исследования. Род Осока представлена 3 видами прибрежно-водных растений, несомненно, количество видов этого рода, произрастающих по берегам Оредежа (Рисунок 2.5).

Рисунок 2.4 – Растение семейства Рдестовых

Рисунок 2.5 – Растение, относящееся к семейству Осоковых

Остальные роды высших водных растений представлены по одному виду. Наиболее крупным семейством, содержащим 5 видов, является семейство Рдестовые. Семейство Осоковые содержит 4 вида, по 2 вида – семейства Частуховые, Водокрасовые, Злаковые и Лютиковые (Рисунок 2.6 – 2.8). Остальные семейства содержат по 1 виду. Подавляющее большинство семейс тв содержит по роду, а по 2 рода содержится в семействах Водокрасовые, Злаковые, Осоковые и Лютиковые. Почти все представители водной флоры являются многолетними растениями, исключение составляет лишь 1 вид – болотник болотный, который является однолетним растением.

Рисунок 2.6 – Растение, относящееся к семейству Частуховые

Рисунок 2.7 – Растение Элодея семейства Водокрасовые

Рисунок 2.8 – Растение семейства Лютиковые

Очень редким видом для Северо-Запада европейской части России в целом, произрастающим только в окрестностях Донцо на сильно минерализованной влажной почве, является дубровник чесночный. Он, безусловно, заслуживает самой строгой охраны на территории Ленинградской области. Охраняемым видом на территории Ленинградской области является кубышка желтая. К числу довольно редких видов для Ленинградской области относятся рдест нитевидный, шелковник неукореняющийся, вероника ключевая. Эти виды в Оредеже не являются редкими, что, по-видимому, связано с особым химическим составом его воды. Как лекарственные растении в народной медицине используются хвощ речной (мочегонное) (рисунок 2.9), рогоз широколистный (дезинфицирующее и противомикробное), рдесты (противомикробное и вяжущее), стрелолист обыкновенный (ранозаживляющее), частуха подорожниковая (мочегонное), сусак зонтичный (жаропонижающее и мягчительное), водокрас лягушачий (мягчительное), болотник болотный (при глазных болезнях). Вахта трехлистная является не только хорошо известным лекарственным средством, но и красильным (дает зеленую краску), медоносным, пряно-ароматическим (используется в ликероналивочном производстве и в пивоварении) и кормовым (для промысловых животных) растением.

Рисунок 2.9– Растение Хвощ речной семейства Хвощевые

Менее известная вероника ключевая, также обладающая лекарственными свойствами, может использоваться как витаминное, пищевое (листья съедобны) и кормовое (пастбищное) растение. Как пищевые (крахмалоносные) растения могут использоваться рогоз широколистный, стрелолист обыкновенный и сусак зонтичный. Питательным белковым растением с хорошими вкусовыми качествами является ряска трехдольная. Эти виды водных растений заслуживают более внимательного отношения к себе со стороны селекционеров: на их основе можно вывести новые пищевые культуры, приспособленные к условиям таежной зоны, покрывающей Ленинградскую область всю без исключения декоративными растениями, способные украсить небольшой водоем на приусадебном участке, являются сусак зонтичный, водокрас лягушачий, лютик длиннолистый, болотник болотный и незабудка болотная. Кормовыми растениями являются двукисточник тростниковый и тростник обыкновенный. Среди водных растений есть и ядовитые: это частуха подорожниковая кубышка желтая и лютик длиннолистый.

3 ФОРМИРОВАНИЕ СКОРОСТНОГО ПОЛЯ И УЧЕТ СТОКА В ЗАРОСШЕМ РУСЛЕ

Как уже было сказано выше первоначально струйные течения возникают там, где отсутствует растительность или густота ее на каком-то узком участке незначительна по сравнению с окружающими участками. После образования струйной зоны развитие растительности из-за повышенных скоростей на данной узкой полосе сдерживается.

Струйные течения характеризуются значительно повышенными скоростями, большой протяженностью при малой ширине и направлением, отклоняющимся от основного направления русла.

3.1 Влияние зарастания на русловой процесс

Для описания степени влияния растительности на русловой процесс рассмотрим результаты лабораторных исследований зарубежных авторов.

В исследованиях Таль и Паола [19], главное воздействие растений в опытах заключалось в устранение незначительных ветвлений потока в разветвлённом состоянии и направить поток в одно основном направлении, по которому бы проходила большая часть потока. Переход из разветвлённого к однопоточному состоянию сопоставим (аналогичен) переходу из состояния не заросшей поймы к такой морфологии русла, которая состоит из отдельного русла и постоянно заросшей поймы. Растения первоначально «завладели» осередками, которые образовывались при низком расходе. Растительность задерживала поток из занятых областей, которые были «захвачены» и обеспечивала устойчивые условия для создания новых всходов. Растения, которые пережили затопление продолжали расти и увеличивать плотность заросших областей, включая последующие посевы, тем самым предоставляя осередкам возможность превращаться в острова. Форма в плане переходила от меандирования к островной многорукавности. По мере того, как осередки и покрытых растительностью острова расширялись, они вызывали небольшие разветвление, которое подлежало дальнейшему удалению, и постепенно сосредотачивали поток в меньшем, но более глубоком русле. Так как шел продолжался процесс увеличения (расширения) острова, острова стали сливаться с другими островами и формировать все более крупные острова и, в конечном счете, обширную пойму. Расширение растительности продолжалось до тех пор, пока не было достигнуто устойчивое состояние ширины русла, наряду с динамически установившемся состоянием в области занятой растительность. Новое устойчивое состояние состояло либо из одного однопоточного русла (русел), которые были более узкими и глубже, чем исходные разветвлённые русла, что четко было определенные берегами. Все области за пределами основного русла были полностью покрыты растительностью. Устойчивое состояние поддерживалось балансом между потерей естественной растительности в результате эрозии вдоль обрушенных берегов во время высокого (паводочного) потока, а усиление (увеличение)заросших площадей происходило путем формирования растений на свежеосажденных побочнях, образовавшихся после прохождения высокого потока. Однопоточные русла были динамичными и постоянно перемещались через заросшие поймы. Несколько пойменные русел, как правило, присутствуют, и часто эти русла имеют интенсивные потоки. Устойчивая, однопоточная форма в плане, вероятно, лучше всего охарактеризовывается как блуждающая: относительно прямого участка, разделенного извилистыми формами и временами встречающихся островов, которые рассекают русло. В некоторых случаях пойменное русло начинало преобразовываться и уже два русла, разделенных большим заросшим растительностью островом, начинали сосуществовать.

По мере того как поток в разветвлённой сети сходились один или два преобладающих русла, общая увлаженная ширина была значительно уменьшена. В разветвлённом состоянии, эрозия берегов, вызванная местными напряжениями, бурная (интенсивная), и, таким образом, часто не со впадала с осаждением наносов на противоположном берегу.

Этот дисбаланс непосредственно приводил к расширению русла, формированию гряд, а в некоторых случаях, рассечению русла. В новом динамическом стационарном состоянии с растительностью, растения замедляли скорость береговой эрозии, что позволило наносам оседать на противоположном берегу, чтобы удержать и (где русло изгибается) сформировать побочень. Соразмерение (соответствие) развития побочня вдоль внутренней гряды, обладающей эрозионным функциями, на наружном изгибе позволяет существующим руслам развивать высокую извилистость, препятствуя созданию новой ширины русла в рамках существующего русла. При этом важная роль растительности заключается в том, чтобы замедлить скорость береговой эрозии путем связывания наносов корнями. Так как заросшая площадь создается примерно так же быстро, как и разрушается, высокая извилистость русел динамически поддерживается аналогичным образом [19].

Экспериментальные однопоточные русла обычно развивают несколько русел, это происходит, когда поток занимает и увеличивает лотковые русла (лотковые спрямления) в межвалом понижении между грядой и внутренним берегом. Одной из главных проблем в достижении самоподдерживающегося, экспериментального меандрирования русла является то, чтобы препятствовать потоку занимать эти русловые лотки, в течение времени, достаточно долгого, чтобы позволить основному руслу пройти значительное боковое перемещение.(Сопутствующим воздействием, которое препятствует спрямлению русла и поддерживает однопоточное русло, является поддержание сильной связи между грядой и берегом, создавая то, что обычно называют «берегом укрепленная гряда».) Связанные наносы и маловесные наносы, используемые в других экспериментальных исследованиях, были накоплены в русловых лотках и помогли заполнить эту топографическую низменность и уменьшить способность потока изрезать русло. В экспериментах, описанных здесь, растительность снижала скорость создания новых русел и препятствовала потоку в восстановлении начальных русел, даже ког да остатки канала, с топографической точки зрения, продолжали существовать под поверхностью растительного покрова.

Роль растительности в регулировании процесса спрямления можно увидеть, исследуя несколько спрямлений русла, которые разрабатывались в ходе экспериментов при однопоточной фазе русла. Эти спрямления служат типичным примером поведение стационарных (устойчивых) естественных однопоточных русел в отличие от разветвлённого состояния. Основной характеристикой спрямлений, в случае полностью заросшей тер ритории, является то, что они не происходят до тех пор, пока не начнет развивается значительный склоновый перепад, и, таким образом, целиком включают отвод потока и наносов в какой-то момент вдоль русла внутри только что включенного участка, оставляя за со бой полностью покинутый участок, который становится заросшим и включённым в состав поймы. В разветвлённом состоянии, даже незначительные градиентные (равномерно изменяющиеся) перепады могут сместить поток от одного русла к другому, поэтому отводы потока воды и наносов происходят довольно часто, но, как правило, приводит к образованию нескольких занятых русел, нежели полная заброшенность участка.

Спрямления русла происходили через старые протоки, а также через восстановление опустошённых (заброшенных) развет влённых русел на пойме. Спрямление сыграло значительную роль в поддержании самостоятельно сформированных однопоточных русел путем перенаправления потока воды и наносов в различные области поймы, при наличии достаточного перепада уклона между основным русло м и поймой. Градиент различий произошел вследствие удлинения русла, связанного с увеличением извилистости. Кроме того, часто образованная, измельчённая растительная масса застревает, эффективно блокируя поток воды и донных отложений и в результате чего образуется локальное сужение, которое являлось причиной расширения и выравнивания русла. Спрямления русел перенаправляли потоки воды и наносов в более крутые русла, по сути дела действуя как местные изменения русел, а также по-прежнему позволяли транспортировать воду и наносы через одно преобладающее русло.

Накопление наносов приводит к тому, что русло становится возвышенным над окружающей поймой и поэтому становится неустойчивы м; местный размыв берегов (авульсия) является результирующим процессом, с помощью которого поток отводят из-за неустойчивой части русла на новую траекторию в другом месте на пойме. В дополнении к спрямлению русла стоит отметить, что отведенный канал поворачивает от единичного (простого) длинноволнового изгиба (1-3 м) в продольном отдалении, и создавал (образовывал) крупномасштабый размыв, который способствовал изменению курса (направления) потока в русле.

Экспериментальная авульсия, как и в естественных реках, была обусловлена возвышением активного (действующего) русла над средней высотой поймы. Этот градиент, преимущество, было вызван намывом наносов в основном русле, а также наличием пойменных русел (заброшенных разветвлённых русел), которые были восстановлены и намыты действующими (активными) главными разрушающими потоками. В экспериментальной авульсии, это был действительно слабый поток, который был отведен от основного канала в пойменное русло, а затем укреплен при следующем затоплении. Таким образом, уменьшилась пропускная способность русла, связанная со снижением расхода воды, это, по-видимому и было толчком к авульсии.

Средняя разница высот подстилающей поверхности, непосредственно перед началом авульсии, составляла приблизительно 40 мм. Это неустойчивое состояние заставляло поток перемещаться в более крутые и глубокие пойменные русла и полностью покинуть старое. Глубина потока измерялась отдельно с использованием метода «цвет плотности» и имела среднее значение 32 мм. Оценивался подъем свободной поверхности, необходимый для поднятия подстилающей поверхности включая глубину потока. Согласно Мориджу и соавт [20]., возвышение (подъем) представляет собой рельеф между свободной поверхностью реки и точки на граничащей с поймой, представляющей собой локальный минимум потенциальной энергии. По нашим оценкам, подъем составляет приблизительно 80 мм, что почти в три раза превышает глубину потока. Мориджи др. [20] обнаружили, что высота намыва (подъема) прирусловых валов граничного русла, будет, в среднем в соотношении 0.6 к 1.1 глубины палеопотоков аллювиальных отложениях, и что это отношение представляет собой состояние достаточной для боковой нестабильности, чтобы привести к авульсии. Наше отношение выше, чем у Мориджаи, из-за ошибок, связанных с оценкой подъема поверхностей и глубины потока, а также, возможно, что более высокий подъем было необходимо прорезать через сильную (крепкую, выносливую) растительностью.

Динамика авульсии в заросшем состояния отображает (дублирует, повторяет) динамику спрямления излучин. В отличие от разветвлённых систем, где изменение направлений русел представляет собой почти непрерывный процесс с постоянным изменением направлений потоков между несколькими руслами следующих за незначительными градиентными различиями, заросшее состояние образовывало единственную отчетливую авульсию. Авульсия русла требовала большей разницы отметок поверхности, из-за добавленной сложности прорезанного направление через заросшие поверхности, что привело к истощению старого русла и, относительно, полного перехода потока к новому. После того, как поток покинул русло он стал зарастать и, в конечном итоге, вошел в состав поймы. Как и в случае спрямления русла, растительность стимулировала массовый уход потока и препятствовала сосуществование нескольких русел.

Общий механизм увеличение ширины русла в разветвлённом состоянии представляет собой процесс спонтанного создания новых русел. Поскольку существующие потоки становятся чуть менее благоприятными, например, из-за отложения наносов или увеличения извилистости, новые легко создаются в тех областях, которые, как правило, не заняты потоком. Это воздействие является одним из тех влияний, которое сделало содержание экспериментальных однопоточных каналов трудным. Расположение действующих русел в начальный момент времени (t_0) отсоединяется (отцепляется, разъединяется) от их расположения спустя один час. Кроме того, разностное изображение демонстрирует сложность прогнозирования того, где же новые потоки будут расположены в зависимости от их предыдущего местоположения. В противоположность этому, изменения во влажных и сухих территориях, когда русло в однопоточном состоянии. Изменения сильно локализованы в пространстве – преимущественно вдоль границы русла – и, таким образом, являются более предсказуемыми, так как они связаны с боковым перемещением русла. Непоследовательная (бессвязная) структура новых потоков в разветвлённом состоянии отражает бессвязную картину разветвлённого русла, в то время как более упорядоченные изменения в однопоточном состоянии отражают связанный характер русла и его кинематику перемещения. Влияние растительности заключается, исходя из вышеописанного, в организации потока таким образом, чтобы он перемещался в одном хорошо определенном русле, в котором локализованное изменения в увлажненной территории отражают последовательное перемещение русла в целом.

Способность потока свободно перемещаться и резко изменять свой курс далее выражается временной шкалой, на которой картина течения стирает «память» схему (характер) течения на более раннем моменте времени. Для этого измерялись временные рамки потери наглядной информации (графической информации) с использованием бинарных изображений (белый = влажный, черный = сухой), представляющих направления преобладающего потока (ов). Серия изображений с не заросшим и разветвленным руслом и ряд изображений, охватывающих последовательные затоплений в заросшем состоянии были сопоставлены с первым изображением в каждой серии соответственно. Для серии изображений с заросшим состоянием – эталонным изображением было основное русло в конце разветвлённого состояния перед первым засевом. Отслеживалось количество пикселей с потоком в первом изображении, которые продолжали содержать поток на каждом последующем шаге по времени. Пиксели, которые стали сухими (заброшенные или заросшие) на любом предыдущем шаге по времени, а затем становились снова влажными – не подсчитывались. Таким образом, в действительности, измерялось время, необходимое для переработки исходного изображения русла один раз. Более длительное время переработки обусловлено сочетанием медленных темпов эрозии и ограниченной возможностью случайного создания нового русла в областях, не занятых потоком. В конечном итоге, при низком расходе воды, растительность занимает участки, которые являются сухими, тем самым усиливая преобладающие потоки.

Эксперименты, о которых мы сообщаем здесь, начались, когда система находилась в не заросшем, разветвленном состоянии, с разветвленными и перемещающимися по всей ширине подстилающей поверхности руслами. Поймы развивались постепенно, в то время как осередки стали зарастать во время низких потоков и расширяться, в конце концов, сливались с другими заросшими осередками и островами. После того как система была разработана в отдельный однопоточный канал, оставшиеся покрытые естественной растительностью площади образовали, по существу, пойму. Эта пойма продолжает развиваться посредством боковой эрозии и нарастания побочня. Слой песка во всех опытах была составлен из однородных отложений, и во время экспериментов в систему подавался такой же однородный песок. Таким образом, состав осадочных отложений поймы была такой же, как и у активного канала. Другими словами, поймы были чисто морфологическими регионами (областями) подстилающей поверхности, которые были определены квазипостоянным образованием пространственно непрерывной растительности и слабого потока в целом. Глубина воды на пойме во время высоких (паводочных) потоков находилась в диапазоне от нуля до нескольких миллиметров, а по большей части, пойменные скорости потока были незначительными.

Из-за отсутствия мелкозернистого осадка, наполнение заброшенных (опустошенных) русел не происходило, поэтому остатки топографии (положения) старых русел сохранились на пойме под растительным покровом. Эти заброшенные русла часто сосредотачивали достаточный поток, чтобы начать восстановление, образуя пойменные каналы. Эти русла были меньше, чем основное русло и были, как правило, не активны во время низкого потока, хотя подземные воды держали их относительно увлажненными даже при низком расходе. Такое постоянное состояние увлажненности было неблагоприятным для растений люцерны и помогали держать русла открытыми.

Пойменные каналы обычно разрабатывали активные прямые вырезы, и, таким образом, играли важную роль в продвижении местного размыва и образовании излучиной реки новых русел. Прямые срезы усиливались по мере увеличения расхода воды, отведенное в пойменное русло из основного канала, и претерпевали намыв и / или удлинение. Это условие в конечном итоге приводило к авульсии или срезке русла. Поскольку растительность задерживает создание нового канала до тех пора пока проявляется существенное градиентное различие, после того, как отрывание или срезка произошли, и растительный покров был уничтожен (или засыпан или эродирован), бывший пойменный канал быстро расширялся, что делает его преобладающим. Это является основной причиной воздействия, которое обсуждалось ранее, авульсия в заросшем, однопоточном русле случается реже, но более яркой выраженной, чем в случае разветвленного русла. Наличие меандр в преобладающем русле иногда способствовало процессу авульсии путем подталкивания потока воды и наносов в направлении более крутого канала.

Четко определенной корреляции между колебаниями расхода наносов и увлажненного слоя (поперечника) найти не удалось. Совершенно ясно, что в целом явное уменьшение увлажненного слоя, пока растительность развивалась, совпадало с чистым накоплением наносов. Это выражалось через скорость оседания наносов, которая почти всегда меньше скорости их притока, а также с помощью кумулятивных параметров входящего и выходящего потоков для каждого эксперимента.

Колебания в расходе наносов в среднем в течение одного часа были связаны с местным временным накоплением и выпуском (выбросом) наносов из-за зажоров, образованных остатками растений, отклонений канала и авульсии, видимых на покадровых изображениях. Чистое накопление наносов в экспериментах, скорее всего, является результатом действия растений, колонизирующих большие площади поверхности при низком потоке и делая их неподвижными, не считая более продолжительного масштаба времени, необходимого руслам для переделки поверхности так, чтобы увлажненной слоя и скорости эрозии снизились.

Преобладающее русло, которое образуется в результате взаимодействия растительности и русла, приспособилось к размерам переполнения (занесения), которое только сдерживало паводочный сток. На пойме почти не было активного (интенсивного) потока. После того, как этот размер переполнения (занесения) был достигнут, он сохранял себя в течение всего эксперимента. Ключевым моментом в понимании обоих этих процессов была тенденция осередков (баров) к росту до полной высоты высокого (паводочного) потока, в разветвленных руслах, а позже и в однопоточных руслах, в результате чего верхняя часть осередков (баров) стада видна при низким (меженном) потоке. Растительность, введенная в конце каждого большого (паводочного) потока, стабилизировала некоторые из этих свежеосажденных поверхностей, заставляя поток перемещаться на следующий высокий (паводочный) поток и тем самым динамично создавая осередки и острова, а затем, и побочни на соответствующей высоте.

Динамические обратные связи между высоким (паводочным) потоком и низким (меженным) расходом привели к образованию однопоточных русел, которые имели вполне правильный размер для того, чтобы транспортировать затопление, т.е. каналы были ни слишком большими и ни слишком маленькими. При низком (меженном) расходе, растения колонизировали незанятое пространство. Способность растений удержать высокий (паводочный) поток от повторного занимания этих областей привело к прогрессивному увеличение ширины (слоя) смачивания низкого (меженного) потока и ликвидации (исключению) неиспользованного пространства, т.е. растения предотвратили увеличение (расширения) русла до слишком больших размеров. В то же время, пока однопоточный канал развивался, его берега становились круче, делая его более затруднительным для новых «завладений» растительности. Это, в сочетании с эрозионной емкостью высокого потока, обеспечивало то, что русла никогда не были меньше, чем минимальна я ширина необходимая транспорту наносов и расходу воды, и что растительность на берегах никогда не приобретала столько мощности (силы) для того, чтобы русла стали стационарными. Совокупный результат представлял собой динамические русла, которые были «самонастраивающимися» и переполняли наносами "емкости" при расходе воды во время наводнения. Еще одной важной характеристикой растений является то, что в то время как они стабилизируют берега, они не добавляют столько сил, необходимых для того, чтобы начать переход состояния русла в стационарное состояние.

В связи с тем, что расходы воды чередовались во время эксперимента, изменение между высоким и низким расходом воды шло от преимущественных различий в ширине увлажненного слоя к преимущественным различиям в глубине потока. Значительное уменьшение ширины увлажненного слоя, когда расход воды уменьшался, является одной из причин разветвления рек, которые являются уязвимыми к посягательству растительности. С другой стороны, для контролируемого растительностью однопоточного русла, возможность на посягательство растительностью было сведено к минимуму, так как смоченная (увлажненная) ширина при высоком и низком расходом сходились.

Лабораторные эксперименты, о которых мы докладываем здесь, в котором ключевыми элементами были двухуровневый цикл переменного расхода воды и добавление растительности, показывают, что растения в одиночку могут вызвать разветвленные реки самоорганизовываться, и поддерживать однопоточную извилистую морфологию. Экспериментальные однопоточные русла, которые развились из разветвленной морфологии, не обладают полной, высокоамплитудной извилистостью, с точки зрения формы в плане: извилистость была неравномерной и не показывала (не проявляла) характерную длину волны или амплитуду; относительно прямой пл ес разделял извилистые русла; постоянные острова иногда разделяют (разрезают) русло; а в некоторых случаях два русла сосуществовали. Форма в плане типичного однопоточного русла, вероятнее всего, лучше всего ха рактеризуется как блуждающее. Тем не менее, экс перименты показывают, что растительность в одиночку может превратить разветвлённое русло в реку с одним или двумя когерентными (связанными) руслами, которые, хотя и являются переходными к полностью развитой меандре, но уже показывают существенные динамичес кие характеристики извилистости (меандрирования). В частности, увеличение изгиба и срезание русла, как наблюдалось в экспериментальных руслах, являются основными механизмами, посредством которых природные блуждающие русла сох раняют характерную амплитуду и мигрируют при поддержке единственного преобладающего русла. Вероятные причины, по которым русла в этих экспериментах не развивали поистине меандрирующие формы в плане, включают ограниченную ширину лотка, которой ограничены боковое перемещение русел и скопл ение наносов, что привело к берегоотложению и сдвигу (перемещению) отсечек русла и авульсии. Если бы приток наносов был единовременно довели до (сравняли с) скорости перемещения (например, с использованием системы рециркуляции наносов) скорость аградации (берегоотложения), вероятно, была бы медленнее, что позволяет более извилистому руслу развиваться. Отсечки (срезание) в наших экспериментах, фактически то же самое, что и срезка меандрами, в том смысле, что они приводятся в движение с помощью дифференциальн ого наклона, но они возникают раньше, до того, как русло может разработать высокопроизводительную амплитудную извилистость. Это будет короткий следующий шаг – сделать эксперименты в более широком лотке, где приток наносов сравняют со скоростью их перемещения, который, как мы прогнозируем, приведет к полной извилистости русел. Тот факт, что наши эксперименты весьма упрощено воспроизводили ключевые элементы сложного поведения природной реки, также предполагает, что соответствующая динамика не сильно зависит от масштаба.

Результаты этих экспериментов показывают, что влияние растений выходит за рамки простого геотехнического укрепления берегов и увеличения сопротивления потоку. Морфодинамика экспериментальных русел была неразрывно связана с динамической природой растений. Экспериментальные исследования показали, что геотехническое укрепление берегов с помощью деревянных дюбелей успешно воспроизводит модели (характер) скорости и транспорта наносов, связанные с меандрированием и образованием извилистого тальвега. Тем не менее, эти стабилизирующие воздействия не повторялись пока русло перемещается, в результате чего оно достигнет статического равновесия. Все развития событий (динамика) в экспериментах мы сообщаем здесь, произошедших в результате непрерывного восстановления растительности на свежеосажденные поверхности и созревания укоренившихся растений, которое происходит естественным образом в реках на ежегодной основе (в регионах с умеренным климатом).

В ряде исследований отмечено, что в разветвленных реках, большую часть времени, только одно или два русла, интенсивно перемещают донные материал. Другие русла в сети, как правило, были ранее активным и могут быть возобновлены за счет тех, что в настоящее время являются действующими. Смысл в том, что донная активность переходит от одного русла к другому, не уничтожая предыдущее русло. Наше наблюдение того, что растительность приводит к изменению от коммутации каналов, которая является почти непрерывным процессом в разветвленном состоянии русла, к коммутации каналов которая встречается реже, но включает в себя массовые (огромные) утечки потока путем авульсий и срезок русла, когда система является заросшей, хорошо согласуются с этими исследованиями разветвлённой кинематики.

Доминирующее русло все еще может легко переключать русла, когда предоставляется возможность, и предыдущий канал остается открытым для повторного занятия, что приводит к течению, постоянно меняется распределение потока между каналами в разветвленной реке – даже если река только с одним потоком активного перемещения в любой момент. Когда присутствует растительность, то существует четкая организация реки в отдельное русло и области без русла (т.е. поймы).

Если, как это было предложено Игози и Эшмор [21], общая морфодинамика русла в разветвленном состоянии может не быть существенно отличной от однопоточных каналов, и что разветвленные реки могут на самом деле вести себя как неустойчивые однопоточные, то в действительности растения просто извлекают выгоду из неактивных частей разветвленной сети и стабилизируют расположение активной транспортной зоны.

Эти эксперименты подчеркивают существенную роль изменения (колебания) расхода в динамике извилистой реки, в которой растительность играет ключевую роль в стабилизации берегов. Изменение (колебание) расхода воды является ключевым фактором в процессе обнажения (выхода) новых поверхностей и предоставляя время растениям для того, чтобы укорениться. И наоборот, этот и предыдущие эксперименты ясно показывают, что колеблющийся расход воды не является необходимым условием для разветвления: первоначальное разветвленное русло сформировалось и было поддержано в одинаковых условиях. Кроме того, в присутствии растительности колеблющийся расход может подавить развитие разветвления, предоставляя возможность для растительности укорениться.

Растения в одиночку способны достичь двух ключевых механизмов для разработки (образования) экспериментального (лоткового) меандрирования: замедление скорости расширения и препятствование срезки русла. Как только однопоточное русло развивается, укоренение новой растительности гарантирует, что осаждение вдоль внутреннего берега может идти в ногу (будет на одном уровне) с эрозией вдоль внешнего берега, таким образом, позволяя каналу активно мигрировать (перемещаться), сохраняя при этом постоянную ширину.

Растительность препятствует срезки берегов, происходящей до момента развития значительной разницы отметок между дна у вогнутого и выпуклого берега реки (виража). Это вводит порог (барьер) для срезки и авульсий, что приводит к массовой утечки потока и препятствует сосуществование нескольких каналов. Этот процесс заметно отличается от процесса происходящего при разветвленном состоянии русла, в котором незначительные градиентные преимущества вызывают частое перемещение потока из одного канала в другой без полного забрасывания (оставления) прежнего канала, что приводит к нескольким занятым руслам.

Градиентные различия, которые управляют срезкой русел и авульсиями в опытах вызваны удлинением русла в связи с увеличением извилистости, намыва из-за скопления наносов, а также наличием пойменных каналов, которые самоочищаются активными прямыми вырубами.

Изменяющийся расход воды является ключевым фактором в содействии переходу от разветвленного русла к динамическому однопоточному руслу путем подвергания новых поверхностей засеванию, чтобы укорениться на них, обеспечивая периоды не активного транспорта нано сов, поэтому растения могут расти, и позволяя растительности использовать разницу в увлажненной территории между высоким и низким расходом.

Растительность является причиной характера эрозии и осаждения наносов, чтобы стать более сильно связанной с латерал ьным перемещением доминирующего русла. В результате, они более локализованы вдоль границы русла и более предсказуемы, чем некогерентные (не связанные) эрозия и осаждение наносов в разветвлённом состоянии, где новые пути потока легко создаются.

Растения заставляют систему организовываться в отдельный канал и поймы. Область без русла (пойма) составляется из ранее активных частей разветвленной поверхности, которые становятся заросшими и постепенно сливаются, чтобы создать хорошо определенную (четко выраженную) пойму.

3.2 Численная модель формирования скоростного поля

Трёхмерная численная модель для вычисления стока воды в реке с растительностью была опробована на основании предоставляемого полевогоматериала с реки Мюгелспри в Германии. Численная модель была основана на методе конечных объектов и на $k - \varepsilon$модели турбулентности.

К модели растительности был применены принцип (теория) силы сопротивления. Данные с реки включали измерения геометрии дна, плотность растительного покрова, высоту, стволовые характеристики и скоростные профили.

На реке были смоделированы две ситуации: упрощённый случай с квадратным участком в плоском русле и с естественной геометрия потока с совокупностью (комплексом) пространственной вариации (изменённой в пространстве) растительного покрова.

Скоростные профили на выделенном участке были достаточно хорошосмоделированы. Численная модель показала менее точные результаты для русла с естественной геометрией дна, где в том числе были измерены скорости на поперечном сечении с растительностью.

Главной неопределённостью в моделировании является определение правильного (корректного) пространственного распределения плотности растительного покрова.

В состав модели входит исследование влияниянеопределённости на коэффициентысопротивления и обсуждение возможных влияний для дальнейших исследований воздействий последствий морфологического моделирования.

Гидравлическое сопротивление растительности или сила сопротивления тела в жидкости, в общем, описывается как сумма сопротивления давления и сопротивления вязкости. Растительность часто моделируется как вертикальный цилиндр, где следующая формула используетсяд ля вычисления силы сопротивления:

$$F_D = C_D \cdot \rho_w \cdot \frac{U_0^2}{2} \cdot A_C. \quad (3.1)$$

где F_D – сила сопротивления,
C_D – коэффициент сопротивления,
ρ_w – плотность воды,
U – скорость
A_C – характеристика территории (чаще всего это площадь проекции объекта, перпендикулярная потоку)

На практике коэффициент сопротивления обычно берётся из экспериментальных данных.

Если использовать уравнение (3.1) для гибких растений, коэффициент сопротивления C_D должен учитывать их особые (специальные или индивидуальные), зависящиеот скорости, изменения свойств. С возрастающей скоростью потока гибкие растения сжимают свои листья друг против друга и против стебля, достигая более обтекаемой геометрии, сниженная лобная область обращается (направляется) «лицом» к потоку и в целом защищает (экранирует) большинство растительных поверхностей. В следствии этой реконфигурации (изменение структуры) сопротивление с увеличением скорости потока обычно не повышается так же круто, как и наблюденное (сопротивление) для жесткихобъектов.

Зависимость между силой сопротивления и скоростью потока исследовалась недавними лабораторными экспериментами включающих прямые измерения или сопротивления оказывающих влияние на отдельные гибкие элементы под воздействием различных условий течения.

Корреляции (связи) между двумя коэффициентом сопротивления и скоростью потока или число *Re* были иногда очень различными друг от друга в зависимости от или площадь смачивания растения или от площади экспозиции стояния растения, которая была испол ьзована как характеристика территории в уравнении (3.1).

Статзнер и др.[22] продемонстрировал в экспериментах что разное определение параметра A_C в уравнении (3.1) может привести к образованию обратных трендов в взаимосвязи связи между C_D и *Re*. Они также показали, что C_D с разными определениямиA_C могут отличаться примерно на 2 порядка от величины (размера) для данного растения и потока.

Численная модель была опробована с использование м полевых данных полученных с реки Мюггеллепри, которая находится н еподалёку от деревни Фрайнбринк, 10 км восточнее Берлина, Германия.На реке находилось сообщество подводных растений с преобладающим большинством стрелолиста. Исследования проводились на участке ре ки длинной 150 м, русло прямолинейное, трапециевидной формы, берега покрыты камнем, дно песчаное. Гидравлический режим регулируется плотиной, наход ящейся в 20 км выше по течению, которая регулировала средние скорости в диапазоне от 20 до 60 см/с и средние значение глубины – от 0.8 до 1.8 м. Наблюдения осуществлялись на данной реке в тече нии нескольких лет, с подробным исследованиями морфометрии речного дна и раст ительного покрова в 2004 2005 годах.

Массив данных включал высоту ложе русла перед вегетативным периодам и на пике цветения, распределения средних значений и характеристик турбулентности на поперечном сечении в отсутствии и при наличии растительности, гидрограф притока, кривую развития (роста), биомассы и картырастительного покрова.

В 2005 была выполнена экспериментальная программа по получению данных о пространственной структуре характеристик потока на участке с подводной растительностью. Для этой цели в центральной части речного русла был искусственносделан (сооружен) прямоугольный участок ширино й 4 метра и длинной 8 метров. Он был составлен из равномерно распределяемых подводных макрофитовстрело листа обыкновенного.

Растения были приблизительно одинакового размера (длина листа 1 .6 м, 12 листов на растение, ширина листа 15 мм, диамет р близи корня 20 мм), собирались в русле и вручную посажены на искусственно созданном участке.

Исследование включало 3 эксперимента с разным числом растений и следовательно различными биомассами и у глами изгиба.

Для каждого эксперимента измерения мгновенных скоростей были выполнены навертикалях,распределённых вдоль продольной оси на участке. Гидравлические условия в течении измерений былипрактически постоянными: значения расхода воды находились в диапазоне от 5.2 до 6.1 м^3/с и средняя скорость потока б ыла 0.18 м/с.

На основе 3-х экспериментов была получена связь между плотностью, растительностью и его оптимальной высотой:

$$\frac{h_l}{h} = 0.35 \cdot exp \cdot \left(0.33 * \frac{\rho_{TS}}{\rho_w} * 10^4\right). \qquad (3.2)$$

где h – глубина воды,

h_l – отклоненная высота стояния растительности,

ρ_{TS} – плотность растительность покрова,

ρ_w – плотность воды.

Стрелолист является многоле тним травянистым растением, естесвтенным образом распространяется в пределах умеренных широт Азии и Европы. Он так же может обитать и в насыщенных питательными веществамиводно –болотных территориях, в камышовых зарослях медленно текущих вод и рек. Это растения является хорошо адаптир уемым с точки зрения морфологии и физиологии и изменениями в окружающей среде.

Стрелолист обыкновенный даёт (плодит, создаёт) обычно листья 2-х типов – линейные листья (первичная листва) и стреловидные листья, размах которых зависит от различных условий окружающей среды и которые, в конечном итоге, могут перерасти в подводную листву, плавающую листву или воздушнуюлиству. Подводная листва является гибкой, как правило, достигая размеров до 80 см в длину и 2 см в ширину.

Воздушная листва является жёсткой (не гибкой) со стреловидной формой листа на уровне воды. Стрелолист обыкновенный размножается семенами и вегетативно, подземными клубнями. В глубинах воды между 1.5 и 2 м линейно погруженные листья становятся преобладающими и достигают больших размеров, тогда как цветы и воздушные листьяисчезают.

Стрелолист часто произрастает в сообществе с ежеголовником простым, макрофит с аналогичными длинными и прямо погруженными листьями. О'Харе и др. [23] выполнил лабораторные эксперименты с ежеголовником простым и измерил его угол изгиба как функцию скорости течения. Их результаты для скорости течения 0.2 м/с находятся в том же диапазоне что измеренные углы изгиба для стрелолиста обыкновенного, полученного в результате трёх экспериментов.Мы предполагаем, что, следовательно, оба вида растений имеют не только похожую среду обитания, но и так же аналогичные гидравлические свойства.

Скорости потока в заросших стрелолистом руслах изменяется (варьируется) в диапазоне от 0.1 до 1 м/с. Для этого характерного диапазона скоростей мы можем сравнить порядок регулирующих усилий на единицу площади действия на растение в потоке: сила сопротивления давления, сила вязкого сопротивления, подъёмная (выталкивающая сила) и сила упругости вызванные моментом внутренних сил в погнутых (согнутых) растениях.

Сила вязкого сопротивления F_s может быть рассчитана используя формулу для плоского дна связанного с потоком, действующим на ламинарные пограничные слои, соответственно $Re_L < 5 \cdot 10^5$:

$$F_s = 0.664 * \rho_w * \vartheta * U * Re_L^{\frac{1}{2}} * B, \qquad (3.3)$$

где

$$ReL = \frac{U * L}{\vartheta} \qquad (3.4)$$

$$\vartheta = 1 * \frac{10^{-6} \text{м}^2}{\text{с}}, \quad (10^0 C).$$

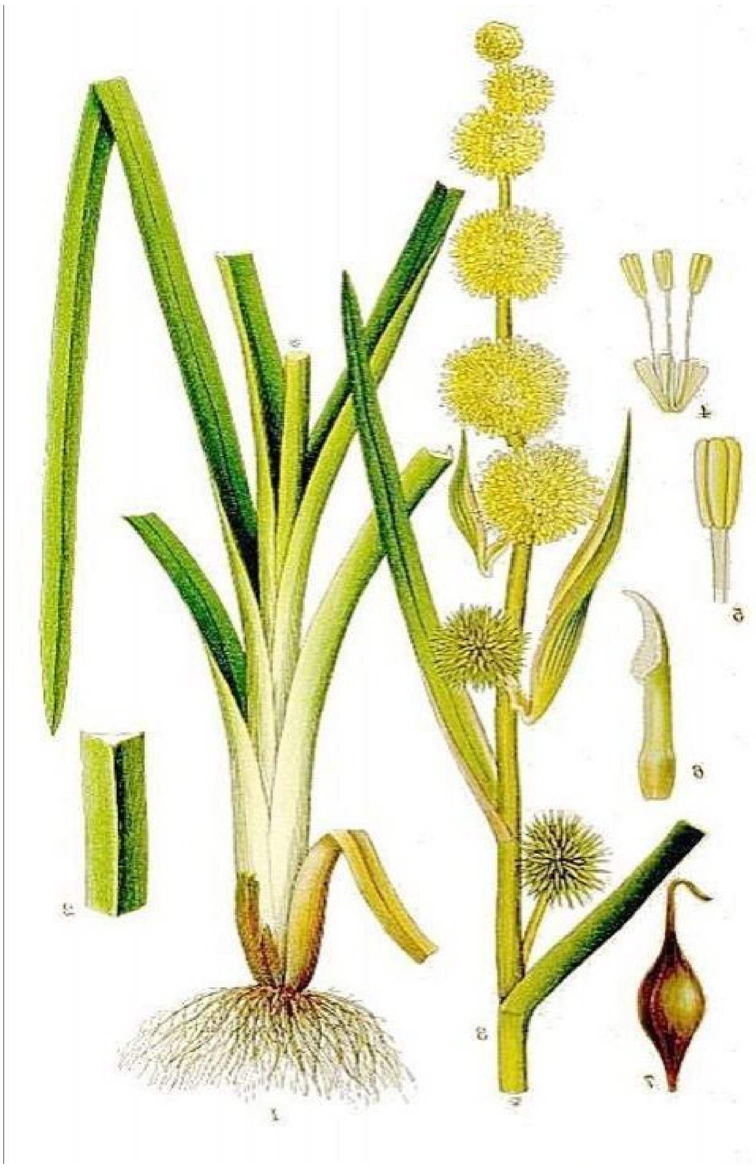

Рисунок 3.1–Ежеголовник простой

Тогда получаем число Re растительной ткани равное $Re_L=2 \cdot 10^5$ и силу вязкости сопротивления на единицу площади.

$$\frac{F_s}{A_P} = 0.12 \cdot \frac{N}{m^2}.$$

Сила сопротивления давления F_D согласно уравнению (3.1) для наклоненной растительности находится по формуле:

(3.5)

Диапазон углов, характерных для гибкой подводной растительности в потоке со скоростью около 0.2 м/с составляет от 20 до 35 градусов, в то время как коэффициент сопротивления обычно варьируется от 0.3 до 1. Следовательно сопротивление давления на единицу пл ощади составляет

$$\frac{F_D}{A_P} = 2.05 \div 11.5 \cdot \frac{N}{m^2}$$

Выталкивающая сила F_B погруженного тела составляет

$$F_B = g \cdot V_m \cdot (\rho_w - \rho_m), \quad (3.6)$$

где g это ускорение свободного падения; V_m и ρ_m – объём и плотность ткани макрофитов; ρ_w = 998 кг/м^3 – плотность растений стрелолиста обыкновенного, которая была определена экспериментально как отношение массы к объёму.

Выталкивающая сила к единице площади составляет:

$$\frac{F_B}{A_P} = 2.3 * \frac{N}{m^2}$$

Сила упругости F_E в следствии жестких свойств растений обычно оценивается используя аналогию (сходство) между согнутымирастительными тканями и кантилеверной балкой. Сила упругости F_E рассчитывается по формуле:

$$F_E = EI * L * \left(\frac{K}{L}\right)^2. \tag{3.7}$$

где K – безразмерный параметр, зависящий от угла отклонения;

EI – жесткость при изгибе.

Жёсткость при изгибе — это мера способности объекта сопротивляться изгибу. Она зависит как от размера поперечного сечения измеряемого объекта, так и от момента инерции площади I и от модуля упругости материала E. Среднее значение EI для растений стрелолиста было определено петлёй и навесным способом, и экспериментами. Значение EI составило $1.44 * 10^{-5} Nm^2$.

Сила упругости на единицу площади листа размером 1 м в длину и 0.01 м в ширину будет высчитываться по формуле:

$$\frac{F_E}{A_P} = 0.71 * \frac{N}{m^2}.$$

Таким образом в рассматриваемом случае основное воздействие набаланс сил действующих на растительные ткани в потоке обусловлено силой сопротивления давления и выталкивающей силой.

Как было описано выше, гидродинамическое сопротивление и подъемная сила являются преобладающими силами, определяющими сопротивление потоку от стрелолиста. Этот факт подводит нас использовать наши данные измерений трех экспериментов в совокупности, соблюдая условие равнодействия 2-х сил для первичного расчета коэффициента сопротивления C_D. Грин представил следующее уравнение баланса сил:

$$b * l * \sin(90 - Ф) = (\sin[Ф])^2 * 0{,}5 * C_D * \rho_w * d * l * U^2, \tag{3.8}$$

$$b = g * (\rho_w - \rho_m) * A_x, \tag{3.9}$$

$$b = d * t, \tag{3.10}$$

где

g – ускорение свободного падения;

A_x – площадь поперечного сечения стебля макрофита;

ρ_w – плотность макрофитов (645 кг/м^3);

l – длина стебля;

d – диаметр стебля;

t – толщина листа (0.5 мм);

U – скорость течения потока (предполагается, что является постоянной по глубине).

Для того, чтобы получить выражение для расчета коэффициента сопротивления для отклоненной длины, приведенные выше уравнения могут быть упрошены и преобразованы.

$$C_D = \frac{2 * g * (\rho_w - \rho_m) * \sin(90 - Ф)}{\rho_w * (\sin[Ф])^2 * U^2}. \tag{3.11}$$

Уравнение (3.11) было использовано с учетом осредненных по площади выделенного участка значений плотности растительного покрова, толщины листа, угла изгиба Ф и осредненной по площади выделенного участка скорости потока внутри растительного покрова. Вычисленные коэффициенты сопротивления являются, следовательно, пространственными и интегрированными по глубине, осредненными для выделенного участка значениями. Уравнение (3.11) было получено в предположении постоянства скорости течения на вертикале. Уравнение не учитывает упругость растений и предполагает постоянство угла сгиба по всему растительному покрову. Результаты в высокой степени находятся в зависимости от процедуры осреднения, которую мы используем для скорости. Для эксперимента №1 мы получаем значение коэффициента сопротивления между 0.25 (используя среднею скорость течения равную 0.18 м/с) и 0.42 (для средней скорости для выделенного участка 0.15 м/с).

Другие расчеты коэффициента сопротивления были выполнены по методике Гхисальберти и Непфа для развитого потока, используя последние 3 вертикали на каждом из измерений и известное распределение расчетной площади растений по глубине:

$$C_D = \frac{g * S + \frac{du' * w'}{dz}}{0.5 * A * u^2}. \tag{3.12}$$

где S – поверхностный уклон;

$u'w'$ – напряжения Рейнольдса;

z – глубина на вертикале;

A – площадь лобной поверхности на единицу объема;

u – скорость течения.

В связи с тем, что существуют различные методы оценивания коэффициента сопротивления, значения коэффициента C_DA, исходя из 3-х проведенных экспериментов, могут варьироваться в широком диапазоне, находясь в зависимости от плотности растительного покрова.

3.2 Способы учета стока в заросшем русле

Развитие способов вычисления стока воды, как известно, шло весьма неравномерно. В начале XX века, вплоть до 30-х годов, по существу не было никакой методики учета стока зарастающих рек, так как расходы вычислялись по определенной кривой, проводимой в поле точек (Q, H), отклонившихся от кривой свободного русла. Оживление в развитии методов учета стока зарастающих рек наблюдалось в 30-х годах, когда А. В. Огиевский впервые в Советском Союзе предложил, в порядке общей схемы, учет стока воды зарастающих рек вести либо по способу фазовых кривых расхода воды, либо с использованием графика $K_{зар} = f(t)$.

О. Фауст предложил применять частные кривые $Q = f(H)$. Существенным недостатком предлагаемого способа является отсутствие приемов перехода с одной частной кривой на другую. Предлагаемый автором прием, заключающийся в определении «неповышенных» уровней заросшего участка по соответственным уровням незарастающего участка, не всегда может быть использован, так как случаи, когда такие обособленные участки находятся поблизости, очень редки. О. Фауст полагал, что увеличение подпора совершается в некоторой мере пропорционально повышению уровня воды, т. е. частные сезонные кривые расходов для высоких уровней не сливаются вместе, а расходятся, что является, конечно, неверным [24].

Г. Гербих[25], подобно Фаусту, также прибегал к построению временных сезонных кривых, но для перехода от одной кривой к другой предлагал устанавливать зависимость между температурой воздуха и подъемом уровня воды, вызванного подпором от растительности. Сопоставляя значения вредней температуры за вегетационный период t со средней высотой подъема уровня H за период зарастания (май – ноябрь), Гербих получил зависимость вида

$$H = A \cdot (t - B)^n. \quad (3.13)$$

Эта формула дает возможность вычислить значения уровня, которые наблюдались бы, если предположить, что подпора не было за весь вегетационный период, и в итоге позволяет использовать для вычисления стока однозначную кривую $Q = f(H)$ свободного русла. Ценность предложенного метода невелика; это сознавал и сам автор, который в з аключении указывал на малое значение полученных формул в практике и на необходимость непосредственного измерения расхода воды. Работа Г. Гербиха интересна в том отношении, что, по-видимому, он впервые пытался косвенным путем учесть влияние развивающейся водной растительности на уровенный режим речного потока, полагая, что должна суще ствовать некоторая зависимость между ходом развития водной растительности и ходом температ уры воды (воздуха). Однако эта зависимость почти во всех случаях бывает затушевана ко лебаниями уровня, происходящими вследствие изменения вод ности, поэтому способ Гербиха имеет очень ограниченное применение в практике.

А. М. Сотченко [26]предложил метод учета стока воды при наличии недостаточного количества опорных измерений расхода воды . Он считал, что, зная гидрометеорологические условия за ряд лет, можно построить схему хронологического хода значений коэффициента $K_{зар}$.

Для построения схемы Сотченко рекомендует использовать среднесуточные температуры воздуха и данные о ходе раз вития растительности.

Схема хода коэффициента $K_{зар}$ имеет вид трапеции, т.е. в общих чертах соответствует естественному ходу $K_{зар}$, если его строить по фактическим измерениям при условии беспаводочного меженного периода.

Определение дат начала и конца фаз ве гетации водной растительности по сумме температур, вероятно, более или менее надежно только в отдельных слу - чаях. Для фазы отмирания, как признает и сам автор, «вопрос об определе нии $K_{зар}$ разрешен пека несколько упрощенн».

Сотченко предполагал, что величина $K_{зар}$ должна постоянно возрастать до 1.0, причем за конец фазы отмирания рекомендуется принимать сутки, предшествующие началу осеннего ледохода. С такой рекомендацией нельзя согласиться, так как наблюдения показывают, что водная растительность к началу ледостава не отмирает полностью.

П. А. Даватц, как и Сотченко, предлагает вычислять сток воды с использованием графика $K_{зар}$, причем даты начала и конца влияния водной растительности считает возможным определять по температуре воды. Он рекомендует строить один многолетний график $K_{зар} = f(t)$,сместив даты начала вегетации всех лет вправо/на самую позднюю дату [27].

А. Г. Трестман [28], рассматривая случай недостаточного количества измерений расхода воды, предлагал для надежного учета стока воды применять несколько видоизмененный способ временных (фазовых) кривых расхода, полагая, что расходы веды, измеренные в период зарастания реки, представляют собой «хронологическую линию расхода». Все явно, отклонившиеся от этой «линии» расходы воды автор считает сомнительными. Из-за субъективности метод нельзя считать бесспорным, тем более что «хронологическую линию расхода» невозможно уверенно провести в случае колебаний водности и тем более, когда опорных измерений расхода очень мало. И. П. Петрикевич [29]полагала, что способ переходных коэффициентов $K_{зар}$ наиболее перспективный и что задачей дальнейших исследований является выявление коррелятивной зависимости $K_{зар} = f(H)$. Такого же мнения придерживается и Р. А. Флерова [30].

Как видно, многие гидрологи считали, что способ временных кривых и способ переходных коэффициентов $K_{зар}$ достаточно надежны. Поэтому исследования сводились не к разработке принципиально новых способов и гидравлическому обоснованию уже известных, а к уточнению некоторых частных положений и улучшению наиболее слабых сторон техники вычислений.

Как будет показано ниже, установление универсальной зависимости $K_{зар} = f(H)$, по-видимому, невозможно. Если бы она и была установлена, то ничего не дала бы для объяснения процесса протекания воды в заросшем русле. Отсутствие или, во всяком случае, неясность зависимости $K_{зар}$ от высоты уровня воды заставили нас взяться за наблюдения в природе и изучение основных гидравлических характеристик заросшего русла.

В 30-х годах, когда наблюдений было мало, считалось, что коэффициент $K_{зар}$ в течение вегетационного периода изменяется плавно.

В дальнейшем, с накоплением материалов частых измерений расхода воды на зарастающих реках, было замечено, что в периоды дождевых паводков плавный ход $K_{зар}$ нарушается, при этом во многих случаях наблюдалось, что с повышением уровня возрастают и коэффициенты $K_{зар}$.

Сотченко отмечал, что установить зависимость между изменениями уровне воды и коэффициента $K_{зар}$ не представляется возможным. Поэтому он ограничился лишь указанием на то, что изменению уровня на 5 см соответствует примерно изменение коэффициента $K_{зар}$ на 0.01. В Методических указаниях УГМС № 23 (ГГИ, 1951 г.) рекомендовалось при вычислениях стока воды зарастающих рек в случае недостаточного числа опорных измерений в периоды паводков пользоваться зависимостями $K_{зар} = f(H)$ или $K_{зар} = f(I)$

Практически очень редко удавалось построить графики этих зависимостей; почти всегда оказывалось, что одному и тому же значению уровня или уклона для данного гидрсствора в зависимости от фазы вегетации могут соответствовать разные коэффициенты $K_{зар}$ – от 0.10 до 1.0.

Неудачи многих исследователей, пытавшихся установить закономерность изменения коэффициентов $K_{зар}$ в паводки, на наш взгляд, были обусловлены тем, что изменения $K_{зар}$ в паводки рассматривались только в зависимости от одного какого-либо фактора и опускалась из виду возможность влияния других факторов движения воды в заросшем русле.

Коэффициент $K_{зар}$ является суммарным показателем, характеризующим степень замедления средней скорости течения воды в данном гидростворе в данный момент времени, по сравнению со скоростью, которая наблюдалась при том же наполнении русла, но, когда растительности не было.

При постоянном коэффициенте $K_{зар}$ гидравлические характеристики изменяются весьма значительно. Таким образом, было бы неправильным полагать, что $K_{зар}$ однозначно отражает изменение сопротивления и что коэффициент $K_{зар}$ изменяется в зависимости от величины подпора, создаваемого растительностью в русле.

На рисунке 3.1 изображена связь $K_{зар}$ и коэффициента шероховатости n по данным наблюдений автора в 1957 – 1958 гг. на посту Визги на р. Иссе. Коэффициент шероховатости n вычислен по формуле Шези, выражая скоростной коэффициент C по формуле Маннинга. Как видно, коэффициент шероховатости n изменяется очень слабо; практически он остается постоянным при значительном изменении $K_{зар}$в диапазоне от 1.0 до 0.6; при $K_{зар}$ в диапазоне 0.5 – 0.2 намечается обратная пропорциональность его значений значениям коэффициента шероховатости. Высота уровня воды на характер связи $K_{зар}$ и n, по-видимому, влияет слабо.

Из рассмотрения материалов наблюдений на многих зарастающих реках нам представилось возможным выделить 6 типов изменений $K_{зар}$, расхода и уровня воды.

Первый тип характеризуется одновременным уменьшением расхода и коэффициента $K_{зар}$ при одновременном падении или стабильности уровня воды. Уменьшение коэффициента $K_{зар}$ происходит за счет интенсивного уменьшения расхода воды, при котором медленно развивающаяся растительность не в состоянии вызвать достаточный подпор, который привел бы к повышению уровня. Данный случай чаще всего наблюдается весной и ранним летом на спаде половодья.

Второй тип характеризуется тем, что уменьшение коэффициента $K_{зар}$ сопровождается повышением уровня и расхода воды. При этом уменьшение $K_{зар}$ происходит главным образом за счет увеличения шероховатости от развивающейся растительности. Этот случай наблюдается ранним летом и нередко совпадает с окончанием паводка, когда интенсивность истощения бассейновых и русловых запасов замедляется и расход стабилизируется, а водная растительность бурно развивается.

Третий тип характеризуется, так же, как и второй, противоположным по знаку изменением уровня и коэффициента $K_{зар}$. Отличие заключается в том, что в данном случае наблюдается увеличение расхода воды, однако коэффициент $K_{зар}$ уменьшается за счет возрастания шероховатости из-за бурного роста растительности.При этом быстрота увеличения сопротивления от растительности превышает быстроту прибыли расхода воды. Этот случай наблюдается в периоды весенне-летних дождливых паводков. Интенсивность изменения $K_{зар}$ обычно меньше, чем в двух первых типах режима.

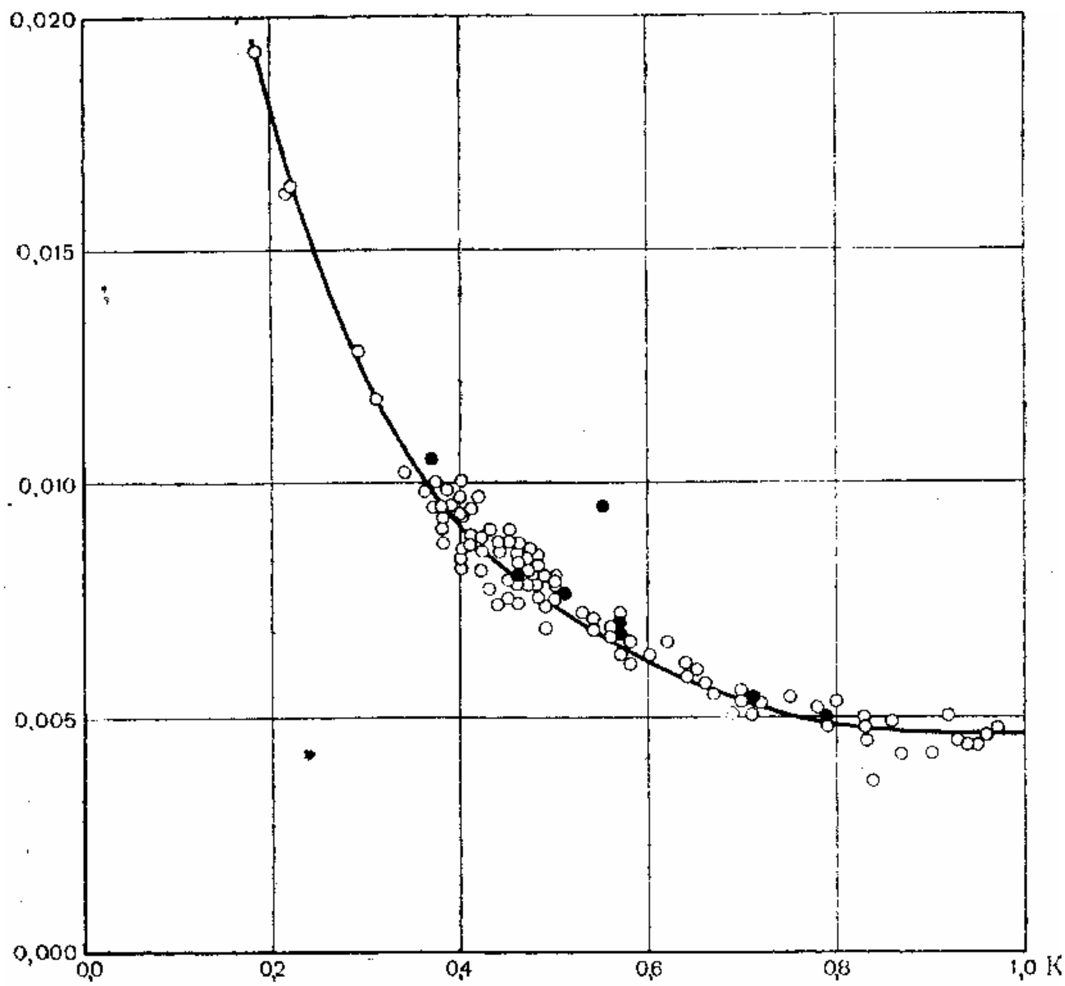

Рисунок 3.1 – График связи между коэффициентами шероховатости n и коэффициентом $K_{зар}$. Залитые кружки относятся к измерениям при одном и том же уровне

Четвертый тип характеризуется одновременным ростом коэффициента $K_{зар}$, уровня и расхода воды. Наблюдается в периоды паводков при стабильной фазе вегетации летом и осенью; встречается часто.

Пятый тип характеризуется увеличением коэффициента $K_{зар}$ и расхода при одновременном падении уровня воды. Возрастание $K_{зар}$ объясняется отмиранием водной растительности и увеличением водности реки. Обычно наблюдается осенью, при резком изменении состояния растительности; встречается довольно редко.

Шестой тип характеризуется увеличением коэффициента $K_{зар}$ при одновременном падении уровня и расхода воды. Наблюдается при отмирании водной растительности, при снижении уровня воды за счет уменьшения водности и сопротивления от растительности.

Дополнительно к описанным типам режима изменений $K_{зар}$ возможны еще два, когда коэффициент $K_{зар}$ сравнительно длительное время не изменяется и остается постоянным с ростом или падением уровня и расхода воды. Подобные случаи на некоторых гидростворах наблюдаются ежегодно на спаде весеннего паводка, а иногда и при осеннем подъеме уровня воды.

4 ГИДРАВЛИЧЕСКИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ ЗАРАСТАЮЩИХ РЕЧНЫХ РУСЕЛ В УСЛОВИЯХ ВЫСОКИХ ДОЖДЕВЫХ ПАВОДКОВ

4.1 Натурные исследования

Как уже было сказано ранее, гидравлические сопротивления зарастающих русел рек являются одной из основных проблем речной гидравлики. В связи с этим особую важность приобретает исследование водного потока в заросшем речном русле.

Для детального изучения особенностей режимов сопротивления при различных объемах заполнения речного русла, на базе учебных практик в д. Даймище был открыт экспериментальный полигон, проводимые специальные наблюдения на котором позволят по-новому подойти к оценке сопротивления зарастающих русел.

На экспериментальном полигоне производится ежемесячный мониторинг состояния реки с составлением ортофотоплана по снимкам с камеры высокого разрешения (Рисунок 4.1 – 4.4).

Рисунок 4.1 – Исследуемый участок р. Оредеж (Дата: 28.04.2014)

Рисунок 4.2 – Исследуемый участок р. Оредеж (Дата: 05.06.2017)

Рисунок 4.3 – Исследуемый участок р. Оредеж (Дата: 18.07.2017)

Рисунок 4.4 – Исследуемый участок р. Оредеж (Дата: 22.08.2017)

Для изучения особенностей режимов сопротивления заросшего речного русла на исследуемом участке измеряются расходы воды и уклоны свободной поверхности, ведутся непрерывные измерения уровня воды, температуры воды и воздуха. Производятся регулярные подводные съемки.

Исследования воздействия растительности на гидравлику водного потока в речном русле основано на измерении пульсационных составляющих скорости водного потока.

Измерения проводились с помощью аналогово – цифрового преобразователя VellemanPCS10 в комплексе с ПК, гидрометрической вертушкой ГР 21-М-1 и измерителем скорости потока (ИСП) (Рисунок 4.5).

Время измерения пульсационных составляющих скорости составляло не менее 30 минут. Измеренные пульсационные составляющие скорости потока записываются в файл формата .txt, вид предоставления данных представлен в таблице 4.1.

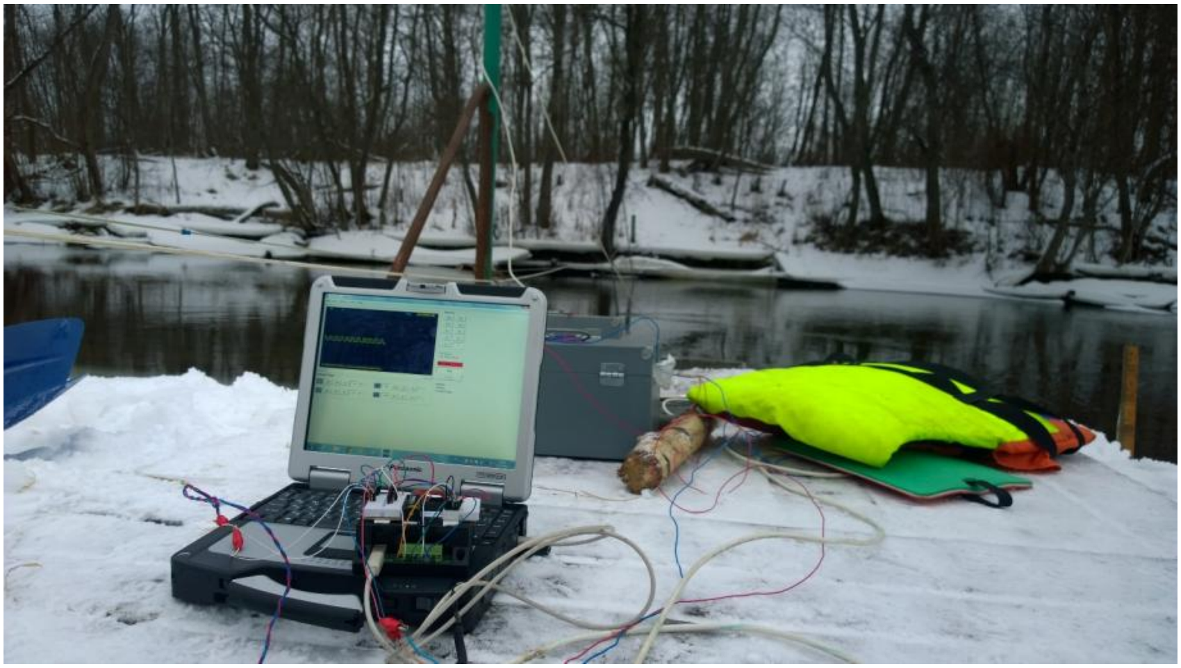

Рисунок 4.5 – Аппаратный комплекс для измерения пульсационных составляющих скорости водного потока

Таблица 4.1 – Вид предоставления данных с аналогово – цифрового преобразователя

Time/s	CH1/V	CH2/V	CH3/V	CH4/V
0,00	1,553	1,129	1,565	1,553
0,01	1,553	1,129	1,565	1,553
0,02	1,553	1,129	1,576	1,541
0,03	1,553	1,129	1,565	1,541
0,04	1,553	1,141	1,565	1,541
0,05	1,553	1,141	1,576	1,541
0,06	1,553	1,141	1,565	1,541
0,07	1,553	1,141	1,565	1,541
0,08	1,553	1,141	1,576	1,541
0,09	1,553	1,141	1,565	1,541
0,10	1,553	1,141	1,576	1,541
…	…	…	…	…

Полученные данные возможно преобразовать в значения периода, а затем и в значение частоты вращения вертушки. Затем значения частоты вращения вертушки возможно свободно преобразовать в значения скоростей течения потока через уравнения начальной скорости вертушки.

По данным измерений пульсационных составляющих скорости потока в периоды заросшего и свободного русла был построен сравнительный график, показывающий пульсационный характер изменения скоростей потока (Рисунок 4.6).

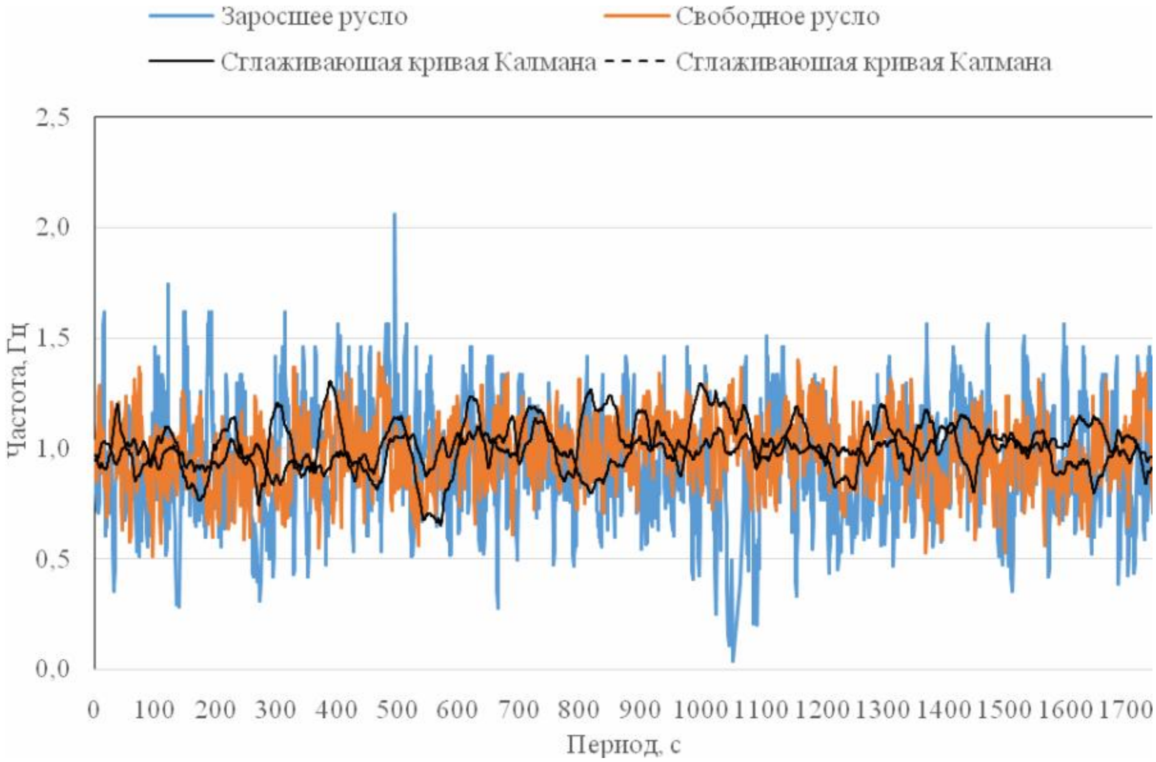

Рисунок 4.6 –Пульсационный характер изменения скоростей потока

Однако стоит сказать, что исследование статистических характеристик турбулентности требует весьма тонких измерений при четкой ориентации измерительных приборов к вектору осредненной скорости, а также по отношению к поверхности трения. В связи со значительной неровностью речного дна строгая постановка измерений труднодостижима. Поэтому было принято решение одновременно с натурными измерениями выполнятьи лабораторные исследования воздействия растительности на гидравлику потока в русле. Более подробно в этом будет сказано в разделе 4.2 данной работы.

В летний период 2017 года на учебной базе практик РГГМУ в д. Даймище были проведены эксперименты по оценке степени полегания водной растительности под воздействием скорости речного потока.

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 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 GoProHero 3 в автоматическом режиме с интервалом 10 секунд между кадрами. Скорость течения измерялась с помощью гидрометрической вертушки ГР-21М.

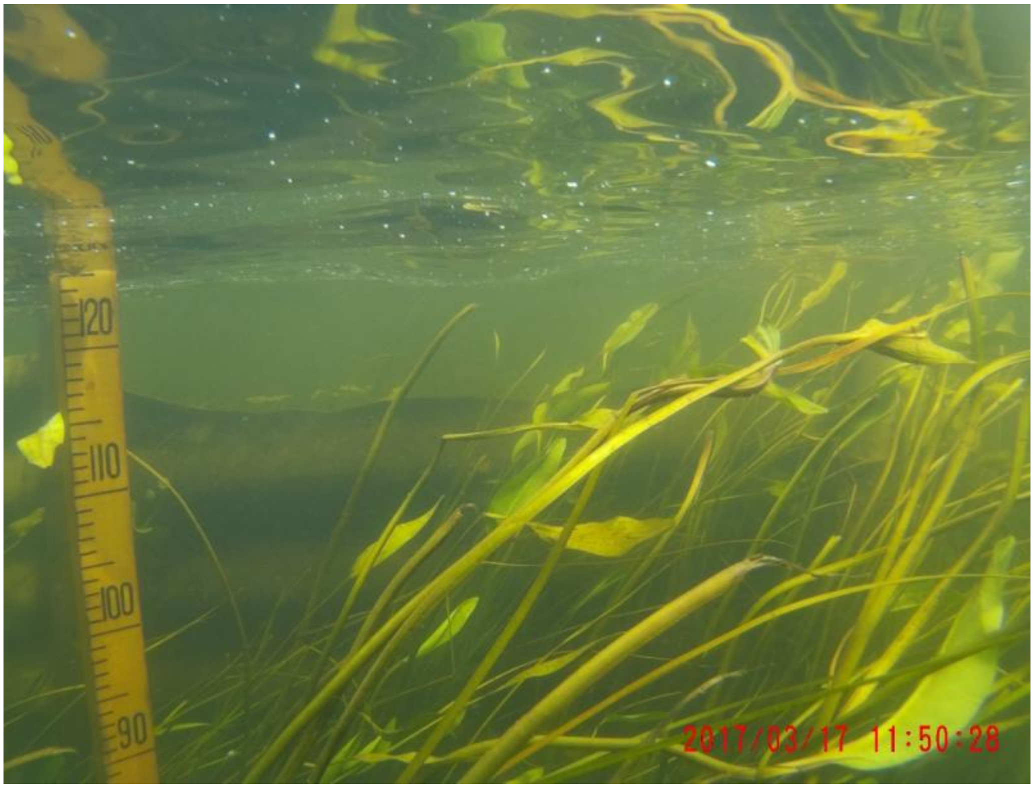

Рисунок 4.7– Снимок подводной растительности, полученный в ходе проведения эксперимента

Поскольку река Оредеж на исследуемом участке зарегулирована плотинами и дамбами местного назначения, её уровенный и скоростной режимы изменяются слабо. По этой причине был применен метод изменения скоростей.

Суть эксперимента заключалась в следующ ем:

Испытываемая группа растений помещалась 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 (Рисунок 4.8а).

Во втором эксперименте верховые части щитов раздвигались, образуя при этом в вертикальной проекции сходящийся конус. Данное положение щитов способствовало увеличению скоростей течения внутри конуса (Рисунок 4.8б).

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 4.8в).

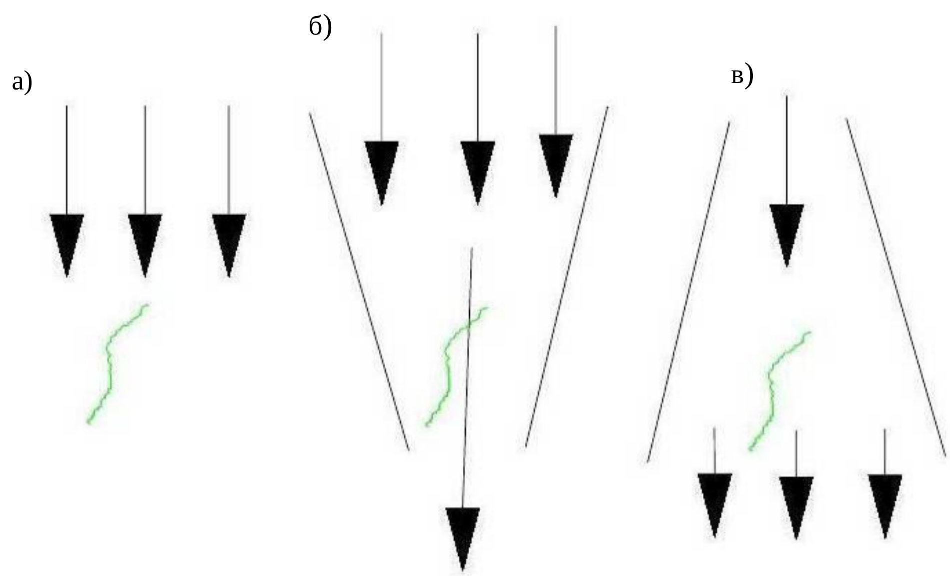

Рисунок 4.8 – Схемы проведения эксперимента

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

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 натурных условиях, также включал в себя подводную съемку водной растительности с интервалом в 10 секунд и измерение скоростей течения.

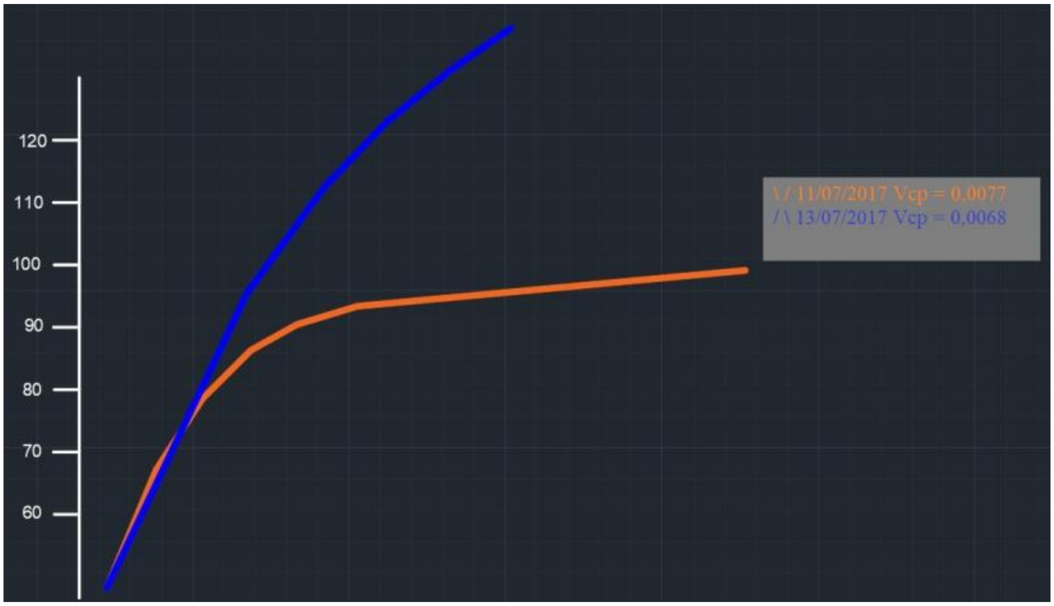

Рисунок 4.9 – Изгиб водной растительности при различных скоростях потока

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

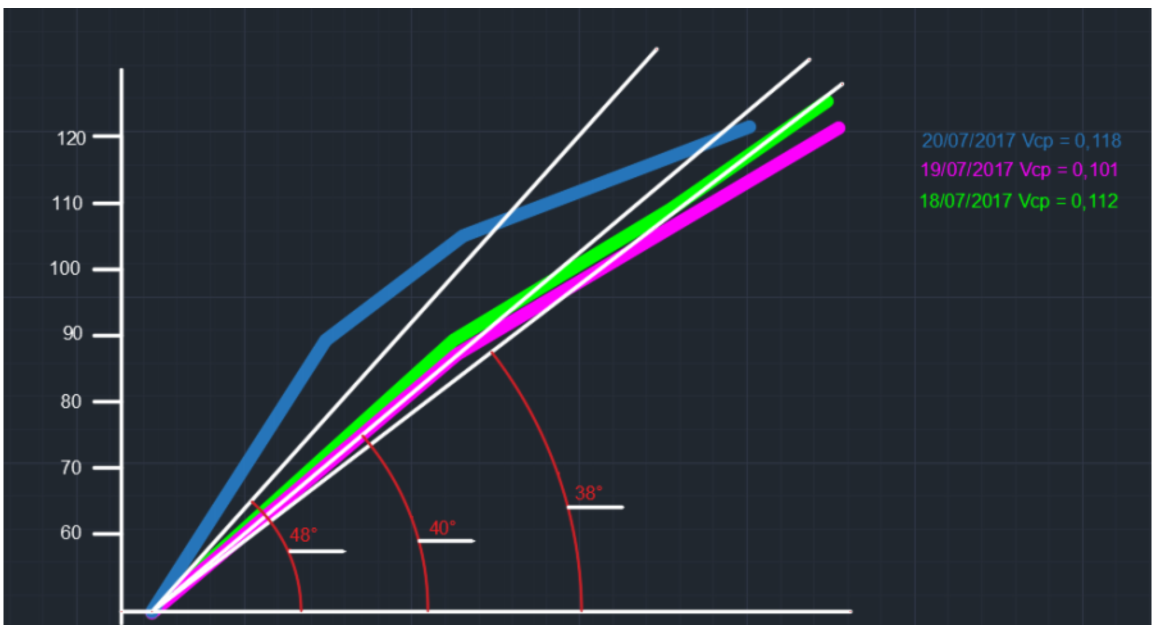

Рисунок 4.10 – Схема полегания растительности в натурных условиях

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.

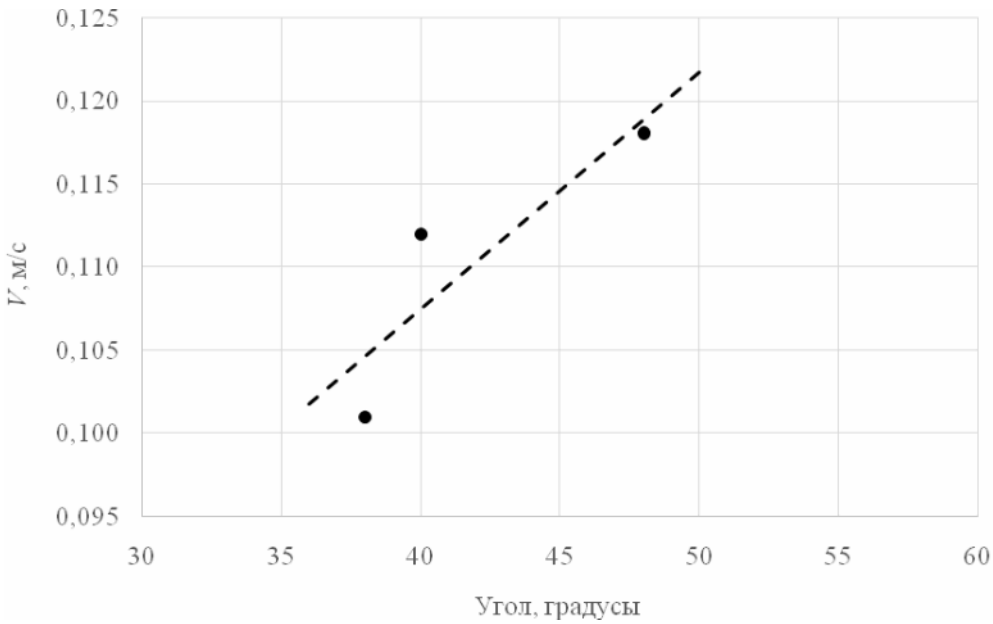

Рисунок 4.11 – График зависимости угла наклона полегания растительности от скорости течения потока

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.

4.2 Физическая модельучастка р. Оредеж

Использование физического моделирования в качестве метода описания процесса воздействия растительности на гидравлику водного потока было выбрано не без оснований. В математических моделях используются традиционные представления и методы определения гидравлических сопротивлений на основе коэффициента шероховатости n (принимаемого постоянным) ианализа кривых $Q = f(H)$, которые, как известно, отличаются своей неоднозначностью и наличием петель гистерезиса при разных наполнениях русла и поймы. Эта неоднозначность и закон изменения гидравлических сопротивлений с наполнением русла никак не может быть корректно описана математической моделью с еекрайне упрощенными представлениями о гидравлических сопротивлениях. Физическая же модель, отражающая реальную морфологию русла (и поймы) с ее реальными морфологическими фрагментами (изгибы и излучины русла, русловые формы, русловые и пойменные протоки и т. д.), являющимися источниками гидравлических сопротивленийпривсех наполнениях русла самовоспроизводит фрагменты и в целом закономерности изменения гидравлических сопротивлений во всем диапазоне измененияагидравлических характерис тик потока.

По этим соображениям, зимой 2016 года на кафедре гидрометрии РГ ГМУ началось создание физической модели участка реки Оредеж. Модель участка реки выполнена в масштабе 1:75 и затрагивает оборудованный натурный экспериментальный полигон (Рисунок 4.12).

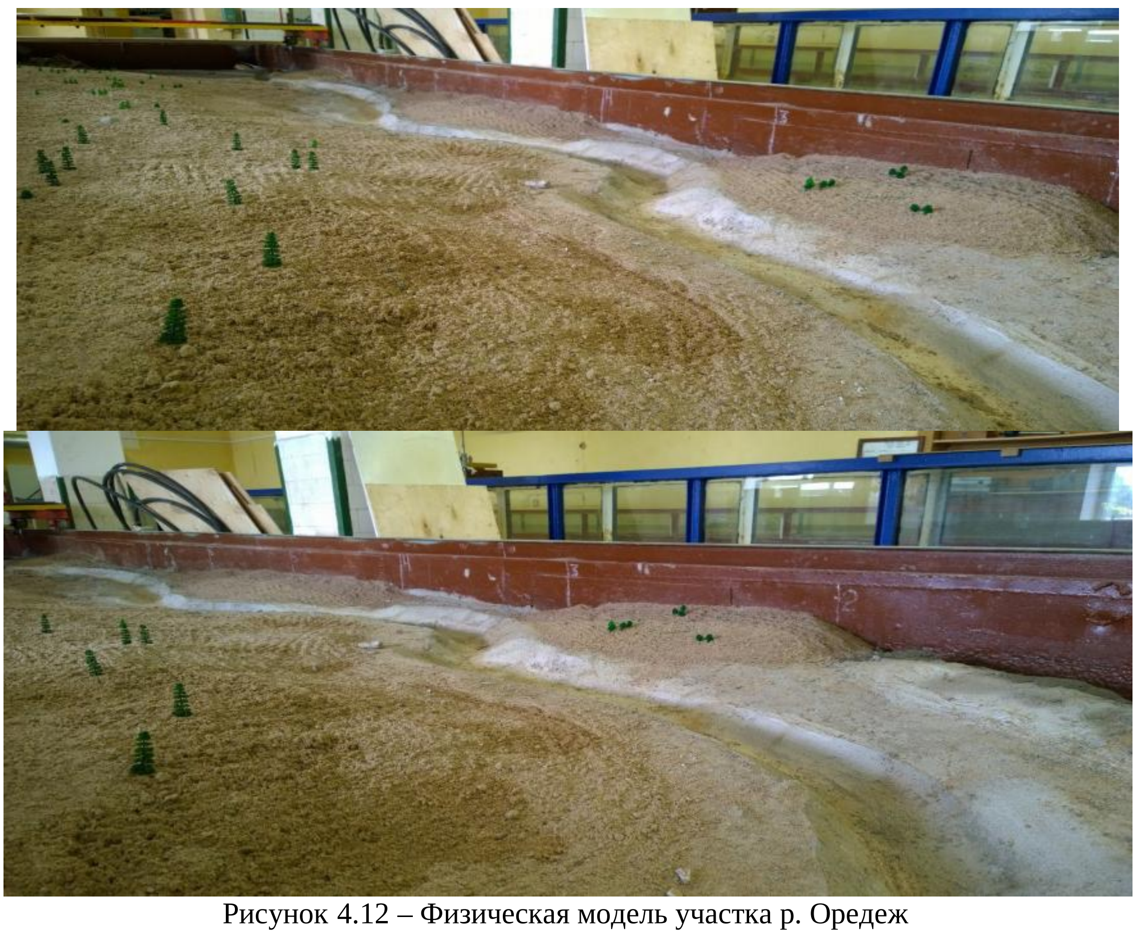

Рисунок 4.12 – Физическая модель участка р. Оредеж

На сооружаемом лабораторном полигоне планировалось выполнить весь комплекс наблюдений и измерений, выполненных ранее в натурных условиях. Помимо этого, планировалось выполнить исследования по изучению изменения значений коэффициента шероховатости при разной степени зарастании русла по длине водотока при различном его наполнении.

Проводимые лабораторные исследования визуально были описаны с помощью программного комплекса Hex – Ras, который распространяется бесплатно и имеет достаточное количество инструментов и утилит для выполнения поставленных задач.

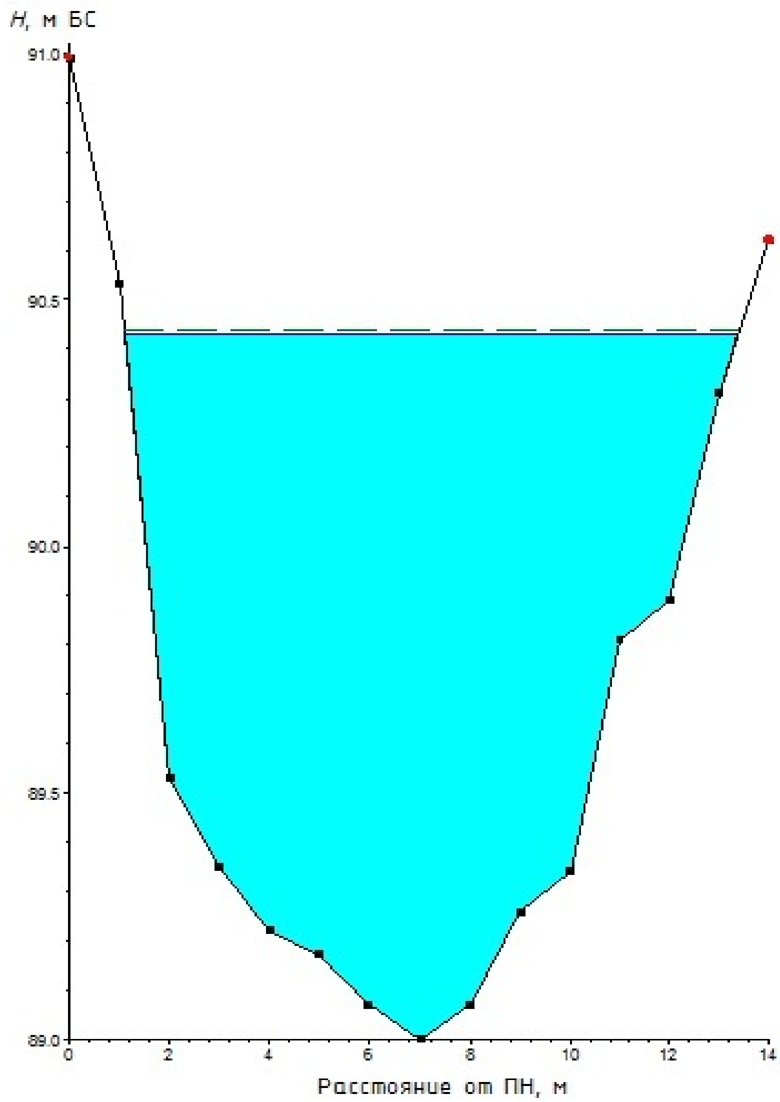

Рисунок 4.13 – Поперечный профиль, построенный в Hec – Ras

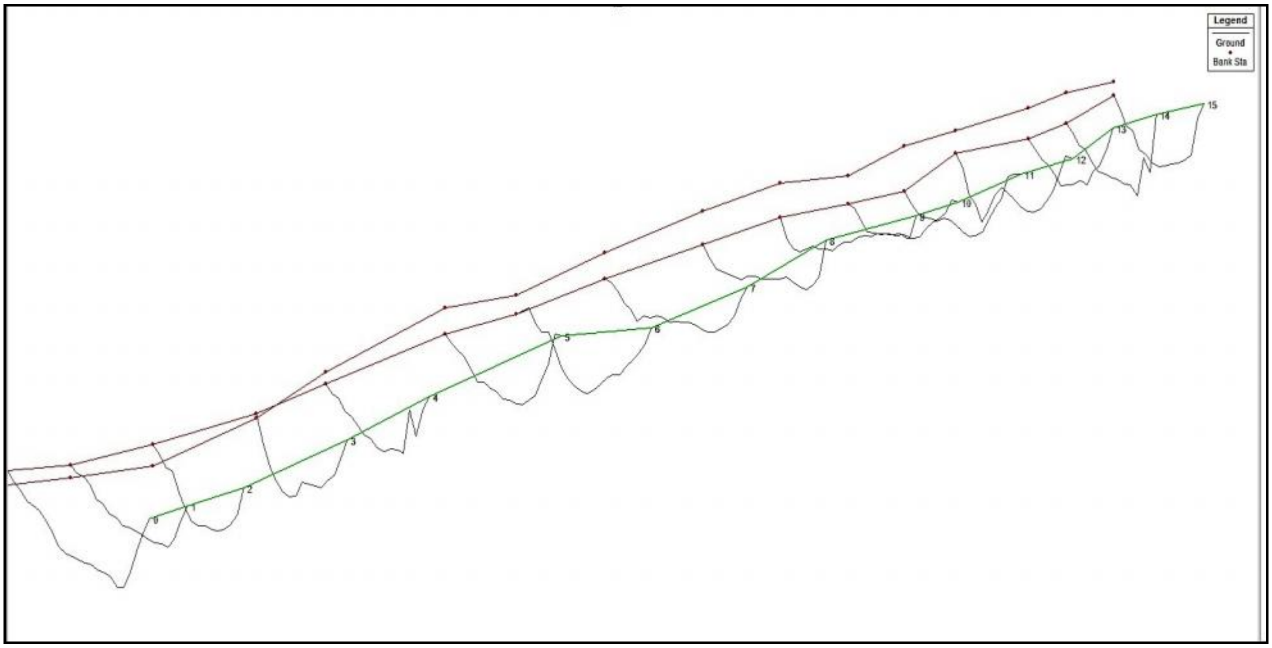

Рисунок 4.14 – Рельеф русла р. Оредеж на исследуемом участке, построенный в программе Hec – Ras

Исследуемый участок реки Оредеж включает в себя 15 створов, находящихся близ базы практик (Рисунок 4.15). В программе HEC-RASбыла построена математическая модель для расчетных створов.

В первом случае допускаем, что рассматриваемый нами участок порос водной растительностью. В этом случае для всего участка принимается осредненный коэффициент шероховатости, равный 0.046.

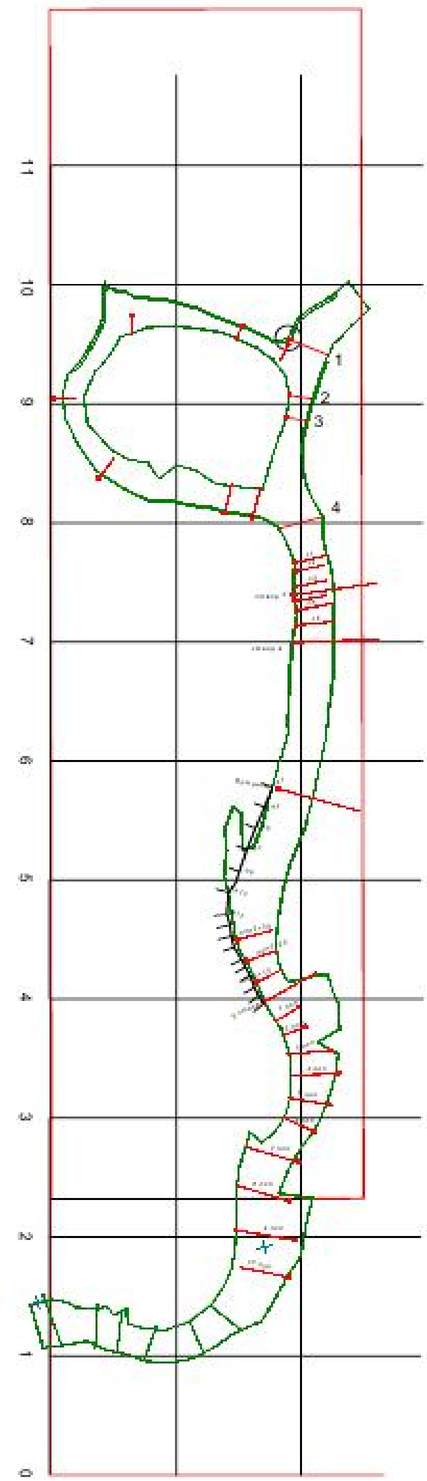

Рисунок 4.15 – Расположение расчетных створов на исследуемом участке р. Оредеж

Таблица 4.2 – Результаты расчета гидрометрических характеристик при n = 0.046

№ створа	Q, м^3/с	H, мБС	I	$V_{ср}$, м/с	ω, м^2
15	1	89.92	0.00011	0.16	6.32
	2	90.04	0.00025	0.26	7.60
	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	0.50	30.27
13	1	89.92	0.00079	0.31	3.20
	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	91.10	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
	2	90.00	0.00199	0.49	4.04
	5	90.42	0.00131	0.51	9.73
	10	91.10	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

Продолжение таблицы 4.2

№ створа	Q, м^3/с	H, мБС	I	$V_{ср}$, м/с	ω, м^2
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
	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 скашиваем всю подводную растительность на рассматриваемом участке. Коэффициент шероховатости в таком случае равен 0.025.

Таблица 4.3 – Результаты расчета гидрометрических характеристик при n = 0.025

№ створа	Q, м^3/с	H, мБС	I	$V_{ср}$, м/с	ω, м^2
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
	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	14.0
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	3.00
	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

Продолжение таблицы 4.3

№ створа	Q, м^3/с	H, мБС	I	$V_{ср}$, м/с	ω, м^2
6	1	89.30	0.00005	0.18	5.50
	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
5	1	89.27	0.00364	0.77	1.30
	2	89.40	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	5.60
	2	89.37	0.00007	0.25	7.86
	5	89.90	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	4.40
	2	89.36	0.00012	0.32	6.28
	5	89.90	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	89.10	0.00006	0.18	5.50
	2	89.35	0.00006	0.23	8.67
	5	89.89	0.00006	0.30	16.71
	10	90.46	0.00006	0.36	27.71
	15	90.85	0.00006	0.41	36.25

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

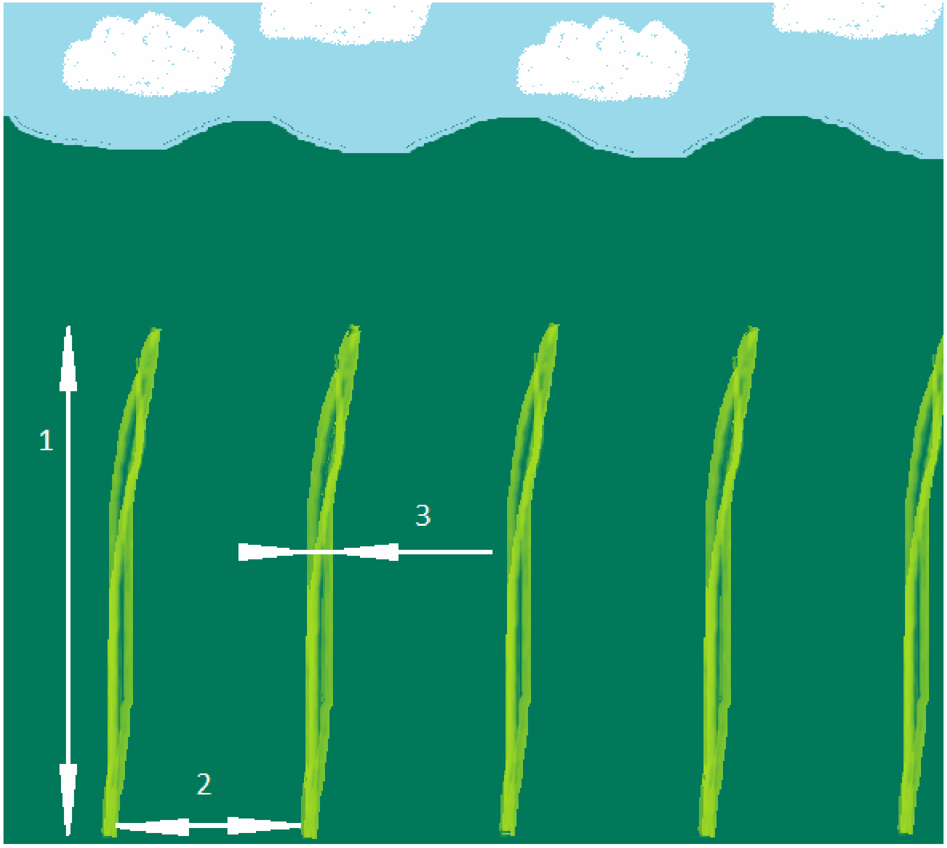

Рисунок 4.16 – Схема подводной растительности

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

$$C = \frac{1}{n} * h^{\frac{1}{6}} \quad (4.1)$$

Для получения значения коэффициента Шези C используется следующее уравнение:

(4.2)

где g – ускорение свободного падения = 9.81 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 (4.2):

$$C = \sqrt{\frac{2 * 9.81}{0.0063}} = 55.8.$$

Подставив значение C в формулу (4.1), получаем n = 0.019.

Таблица 4.4 – Результаты расчета гидрометрических характеристик при n = 0.046

№ створа	Q, м^3/с	Отметка дна, м БС	H, мБС	I	$V_{ср}$, м/с	ω, м^2
15	1	89.25	90.16	0.00002	0.16	6.12
	2	89.25	90.29	0.00004	0.27	7.50
	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
	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	14.74
13	1	89.78	90.07	0.00704	1.23	14.74
	2	89.78	90.16	0.00617	1.49	14.74
	5	89.78	90.36	0.00537	1.84	14.74
	10	89.78	90.57	0.00475	2.14	14.74
	15	89.78	90.73	0.00450	2.39	14.74
12	1	88.96	90.11	0.00002	0.15	14.74
	2	88.96	90.20	0.00006	0.26	14.74
	5	88.96	90.37	0.00015	0.49	14.74
	10	88.96	90.59	0.00026	0.74	14.74
	15	88.96	90.89	0.00023	0.82	14.74
11	1	89.29	90.11	0.00002	0.14	14.74
	2	89.29	90.20	0.00004	0.23	14.74
	5	89.29	90.37	0.00011	0.45	14.74
	10	89.29	90.59	0.00020	0.70	14.74
	15	89.29	90.89	0.00019	0.79	14.74
10	1	89.71	90.11	0.00023	0.34	14.74
	2	89.71	90.19	0.00043	0.53	14.74
	5	89.71	90.34	0.00092	0.90	14.74
	10	89.71	90.53	0.00119	1.23	14.74
	15	89.71	90.84	0.00068	1.17	14.74
9	1	89.61	90.10	0.00027	0.38	14.74
	2	89.61	90.18	0.00055	0.60	14.74
	5	89.61	90.31	0.00134	1.06	14.74
	10	89.61	90.48	0.00213	1.47	14.74
	15	89.61	90.84	0.00090	1.15	14.74
8	1	89.83	90.04	0.00814	0.97	14.74
	2	89.83	90.10	0.00730	1.15	14.74
	5	89.83	90.21	0.00622	1.46	14.74
	10	89.83	90.46	0.00189	1.30	14.74
	15	89.83	90.84	0.00056	1.03	14.74
7	1	89.46	89.74	0.00812	0.89	14.74
	2	89.46	89.79	0.00709	1.10	14.74

	5	89.46	89.97	0.00249	1.10	14.74
	10	89.46	90.49	0.00029	0.70	14.74
	15	89.46	90.85	0.00017	0.69	14.74

Продолжение таблицы 4.4

№ створа	Q, м^3/с	Отметка дна, м БС	H, мБС	I	$V_{ср}$, м/с	ω, м^2
6	1	88.66	89.53	0.00003	0.19	14.74
6	2	88.66	89.65	0.00007	0.30	14.74
6	5	88.66	90	0.00011	0.46	14.74
6	10	88.66	90.5	0.00010	0.52	14.74
6	15	88.66	90.86	0.00009	0.56	14.74
5	1	89.23	89.48	0.00397	0.96	14.74
5	2	89.23	89.59	0.00360	1.08	14.74
5	5	89.23	89.96	0.00073	0.89	14.74
5	10	89.23	90.48	0.00032	0.81	14.74
5	15	89.23	90.83	0.00023	0.83	14.74
4	1	89.10	89.37	0.00450	1.05	14.74
4	2	89.10	89.47	0.00418	1.28	14.74
4	5	89.10	89.94	0.00079	0.93	14.74
4	10	89.10	90.46	0.00037	0.84	14.74
4	15	89.10	90.82	0.00026	0.86	14.74
3	1	88.47	89.41	0.00003	0.18	14.74
3	2	88.47	89.52	0.00006	0.29	14.74
3	5	88.47	89.96	0.00007	0.42	14.74
3	10	88.47	90.48	0.00007	0.53	14.74
3	15	88.47	90.83	0.00008	0.63	14.74
2	1	88.75	89.41	0.00005	0.23	14.74
2	2	88.75	89.52	0.00011	0.37	14.74
2	5	88.75	89.95	0.00012	0.52	14.74
2	10	88.75	90.47	0.00012	0.63	14.74
2	15	88.75	90.83	0.00013	0.72	14.74
1	1	89.09	89.33	0.00705	1.17	14.74
1	2	89.09	89.45	0.00377	1.12	14.74
1	5	89.09	89.94	0.00042	0.71	14.74
1	10	89.09	90.46	0.00020	0.68	14.74
1	15	89.09	90.82	0.00016	0.71	14.74
0	1	88.50	89.28	0.00006	0.22	14.74
0	2	88.50	89.49	0.00006	0.28	14.74
0	5	88.50	89.95	0.00006	0.37	14.74
0	10	88.50	90.47	0.00006	0.44	14.74
0	15	88.50	90.83	0.00006	0.49	14.74

По результатам расчетов для трех случаев построены кривые $Q = f(H)$ для расчетного створа (Рисунок 4.17).

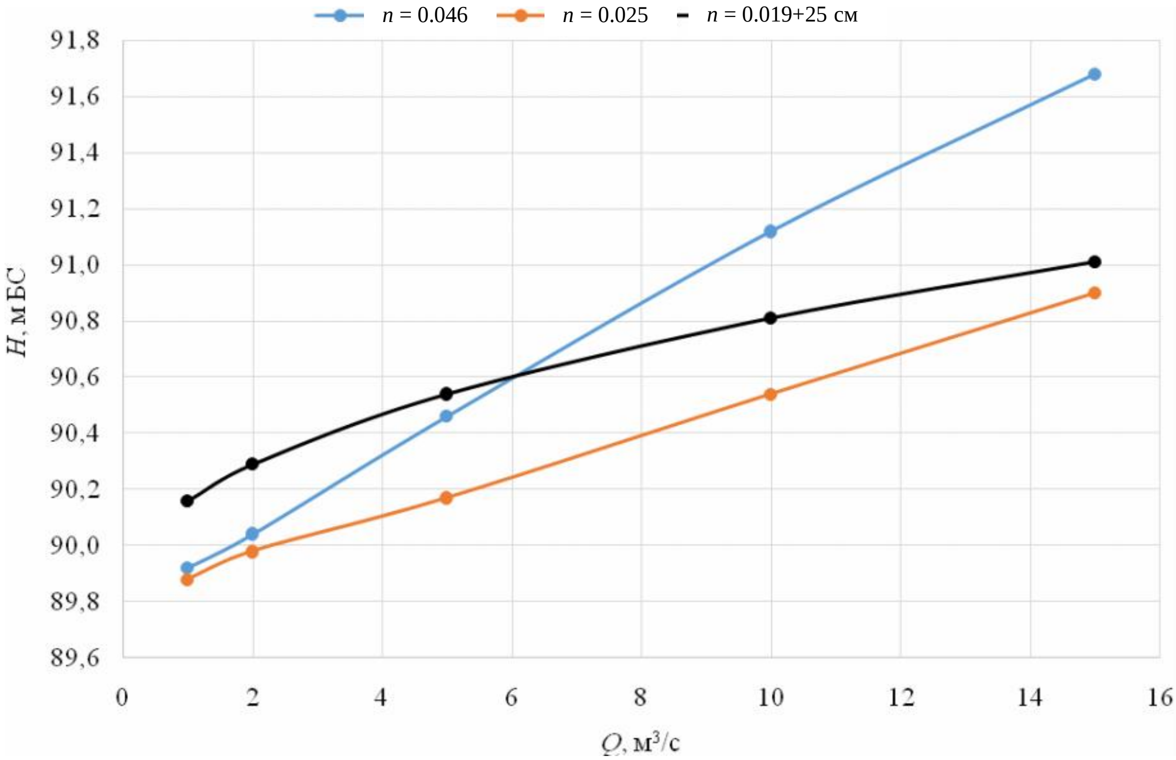

Рисунок 4.17 – Графики $Q = f(H)$ для различных коэффициентов шероховатости

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

4.3 Расчет гидравлических сопротивлений при разной степени зарастания русла по его длине

Одной из задач при расчете гидравлических сопротивлений при разной степени зарастания русла по его длине является рассмотрение продольного уклона свободной поверхности, а именно – будет ли он меняться при разной степени зарастания речного русла?

Сделав простейшее преобразование в формуле Шези:

$$V = C\sqrt{hI}, \tag{4.3}$$

уравнение (4.3) запишется в следующем виде:

$$V = \frac{h^{\frac{2}{3}} I^{\frac{1}{2}}}{n}. \qquad (4.4)$$

Из уравнения (4.4) можно сделать вывод, что значение уклона свободной поверхности будет почти постоянным и не зависит от изменения характера гидравлических сопротивлений *n*:

$$\frac{n}{\sqrt{I}} = \frac{h^{\frac{2}{3}}}{V}. \qquad (4.5)$$

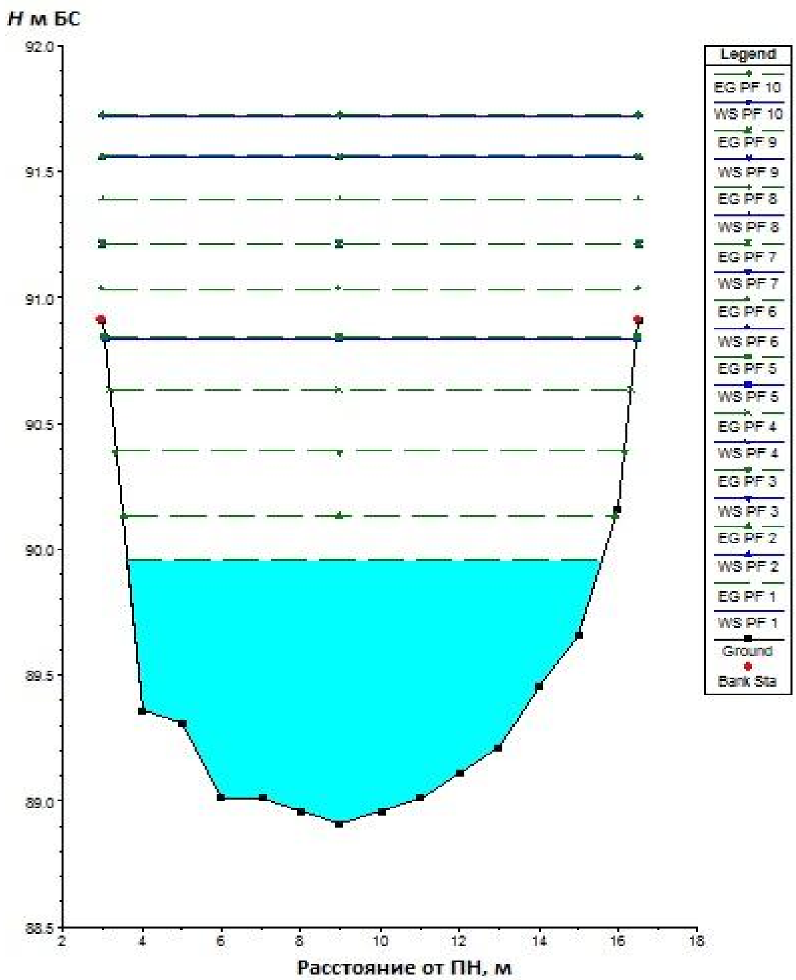

Рисунок 4.18 – Изменение уровня воды (в м БС), в зависимости от степени затопления русла

С помощью программного комплекса Hec – Ras и натурных данных об измеренных глубинах на поперечных створах р. Оредеж на участке исследования, было смоделировано, как изменится уклон свободной поверхности при различном объёме заполнения русла и разной степени зарастания русла по его длине.

Задаваясь расходами воды от 1 до 10 $м^3/с$, получили, как будет меняться уклон свободной поверхности (Рисунок 4.19).

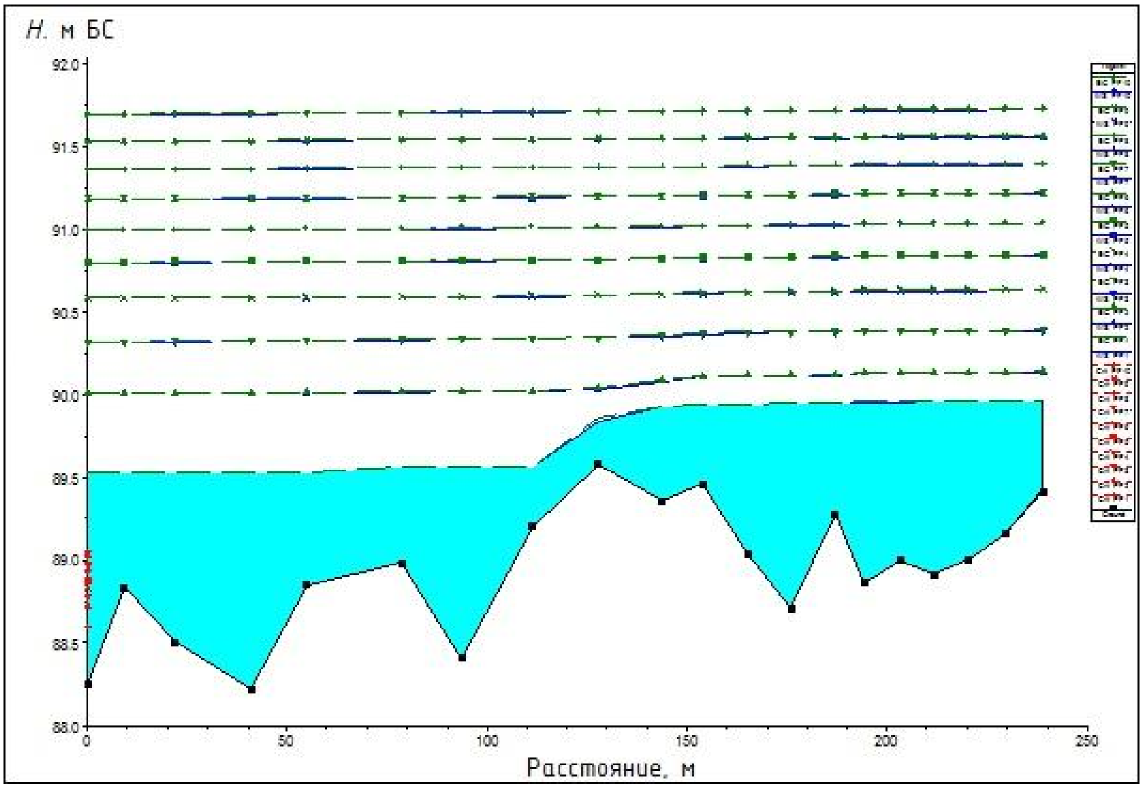

Рисунок 4.19 – Изменение продольных уклонов участка р. Оредеж при разно й степени заполнения русла

На следующем этапе посмотрели, как будет меняться уклон свободной поверхности при разном объёме заполнения русла и степени его зарастания.

В результате расчетов были построены графические зависимости $I = f(H)$ и $Q = f(H)$ (Рисунок 4.20 – 4.21).

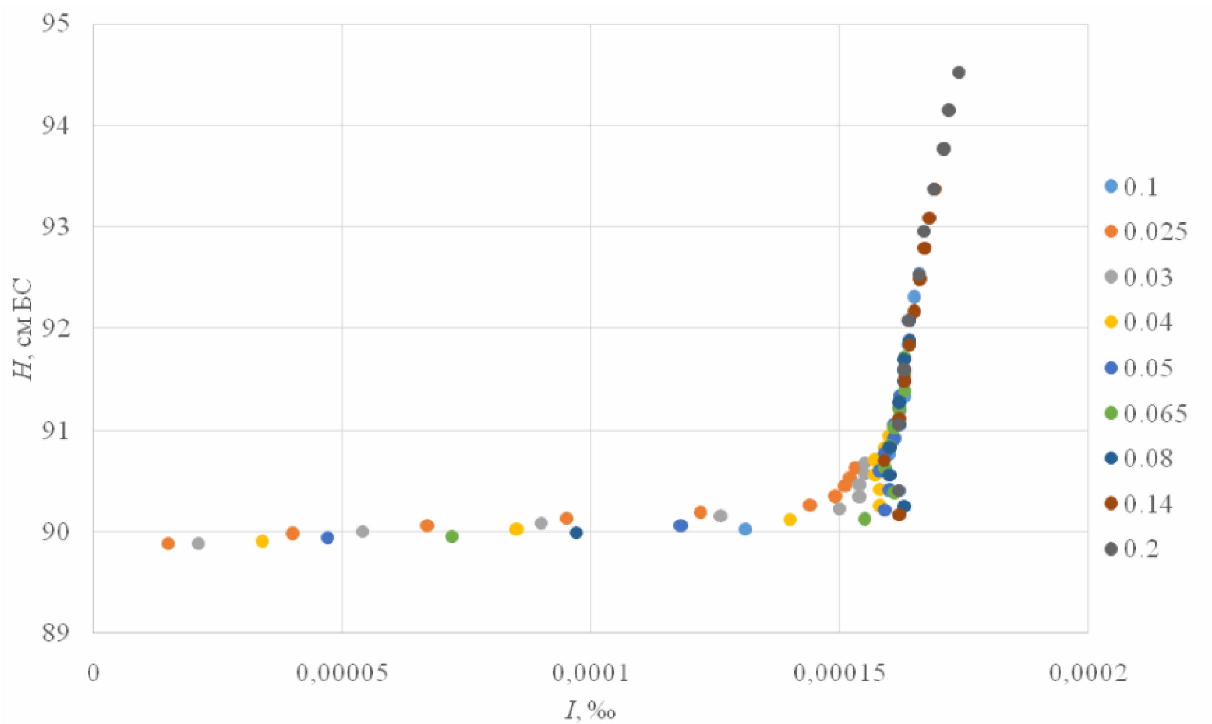

Рисунок 4.20 – График зависимости $I = f(H)$

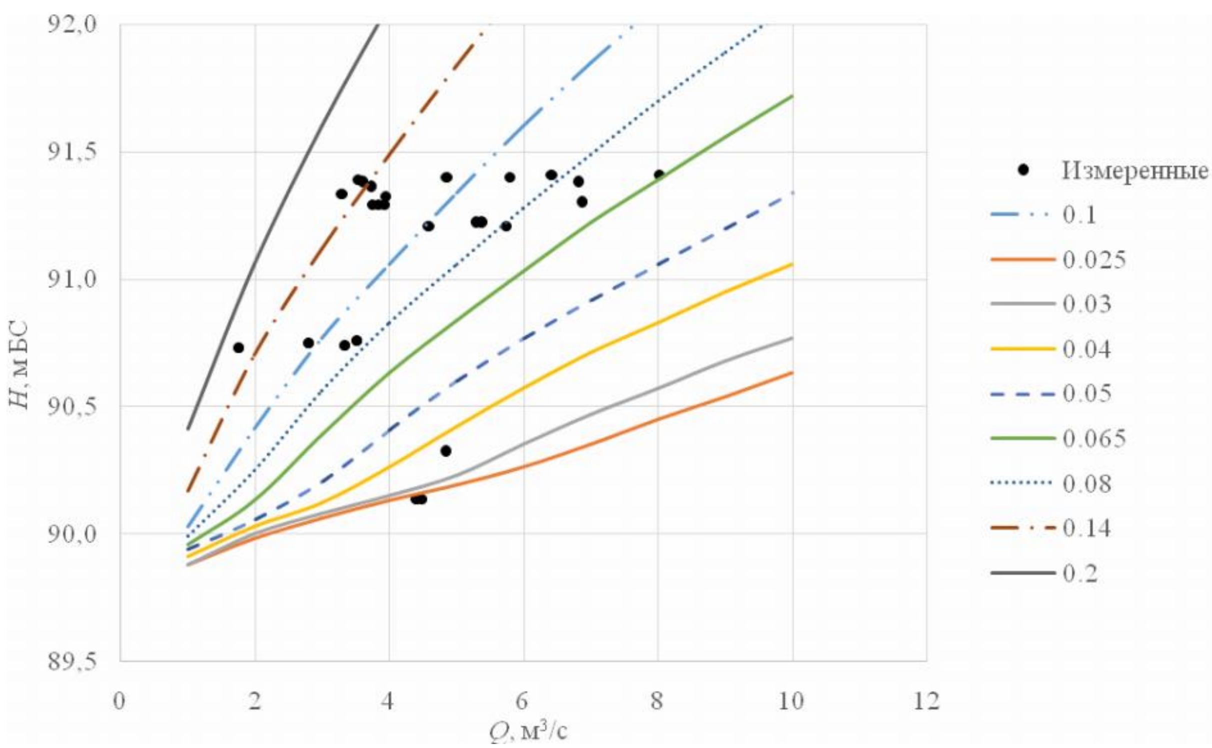

Рисунок 4.21 – Кривая $Q = f(H)$ при разной степени зарастания русла

Как видно из рисунка 4.20, уклоны свободной поверхности имеют более-менее схожие значения при различной степени зарастания русла. Это подтверждает сделанное выше предположение о том, что уклоны свободной поверхности будут оставаться постоянными вне зависимости от степени зарастания русла.

Из построенной графической зависимости $Q = f(H)$ (рисунок 4.21) можно сделать вывод, что коэффициент шероховатости n р. Оредеж на участке измерений изменяется в диапазоне от 0.065 до 0.16, в зависимости от уровня затопления русла.

Выполняемые специальные наблюдения и вычисления уже позволяют по-новому подойти к оценке сопротивления зарастающих русел.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Гидравлические сопротивления зарастающих русел рек являются одной из основных проблем речной гидравлики. Правильный и аргументированный учет гидравлических сопротивлений должен иметь место в расчетах важнейших характеристик речного потока, таких как средняя скорость, расход воды и др.

Водная растительностьоказывает значительное влияние на характеристики течения, транспорт наносов и морфологию рек.

Скорости течения ослабевают в областях с растительным покровом и под влиянием турбулентности. Транспортирующая способность наносов часто снижается в областях, заросших водной растительностью, там, где взвешенные наносы могут оседать. Область сопротивления растительного покрова может так же направить водный поток к тем местам, где растительность от сутствует, являясь причиной повышения скоростей и размыва. Поэтому важно учитывать сопротивления растительного покрова при вычислении геоморфологических изменений в реках.

Однако степень изученности характеристик течения в заросших р услах недостаточна ни для расчетов, ни для разработки новых концепций и теорий о гидродинамических закономерностях таких течений.

Цель исследования заключается в количественной оценке коэффициентов сопротивления для речных русел, подверженных зарастанию, и разработке методики учета стока малых зарастающих рек в период прохождения паводков .

Разрабатываемая 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. Помимо этого, эта методика будет основана на расчетно-вычислительном факторе речного русла, при котором значения коэффициента шероховатости будут зависеть от конкретных параметров потока и характеристик русла.

Для достижения поставленной цели было необходимо решить следующие задачи:

1. Исследовать закономерности развития и распространения в одолюбивой растительности, а также особенности режима гидравлических сопротивлений зарастающих речных русел.

2. Выявить определяющие факторы и установить критериальные комплексы для обобщенной количественной оценки при зарастании.

3. Получить расчетную формулу для коэффициентов шероховатости в зависимости от системно-зональных гидрологических факторов.

4. Оценить гидравлические сопротивления зарастающих речных русел малых водотоков в различные фазы вегетации.

5. Разработать модель гидрометрического учета стока зарастающих рек.

6. Разработать методику и алгоритмы автоматизированного учета стока зарастающих рек для внедрения их компьютерной технологии в гидрологическую сеть.

Для решения поставленных задач были проведены натурные и лабораторные исследования по изучению гидравлических сопротивлений зарастающих речных русел.

В рамках натурных исследований на реке Оредеж был выбран и оборудован экспериментальный участок.

Река Оредеж была выбрана не случайно. На данном этапе своего существования исследуемый водоток очень интенсивно зарастает водной растительностью. Главными причинами интенсивного зарастания руслареки высшими водными растениями являются:

–создание каскада дамб и плотин местного назначения, которые уменьшили скорость течения на реке; повлияли на формирование большего количества застойных зон;

–в бассейне реки, в последние 30 лет, образовалось большое количество сельскохозяйственных предприятий, промышленный сток из которых поспособствовал интенсивному развитию водной растительности в русле и на пойме реки.

Высшие водные растения верховий реки Оредеж составляют 29 видов, относящихся к 23 родам, распределенным между 18 семействами. Они являются представителями 3 классов и 2 отделов высших сосудистых растений.

На экспериментальном полигоне производится ежемесячный мониторинг состояния реки с составлением ортофотоплана по снимкам с камеры высокого разрешения.

Для изучения особенностей режимов сопротивления заросшего речного русла на исследуемом участке измеряются расходы воды и уклоны свободной поверхности, ведутся непрерывные измерения уровня воды, температуры воды и воздуха. Производятся регулярные подводные съемки.

Исследования воздействия растительности на гидравлику водного потока в речном русле основано на измерении пульсационных составляющих скорости водного потока.

Измерения проводились с помощью аналогово – цифрового преобразователя VellemanPCS10 в комплексе с ПК, гидрометрической вертушкой ГР 21-М-1 и измерителем скорости потока (ИСП).

Полученные данные возможно преобразовать в значения периода, а затем и в значение частоты вращения вертушки. Затем значения частоты вращения вертушки возможно свободно преобразовать в значения скоростей течения потока через уравнения начальной скорости вертушки.

По данным измерений пульсационных составляющих скорости потока в периоды заросшего и свободного русла был построен сравнительный график, показывающий пульсационный характер изменения скоростей потока.

Однако стоит сказать, что исследование статистических характеристик турбулентности требует весьма тонких измерений при четкой ориентации измерительных приборов к вектору осредненной скорости, а также по отношению к поверхности трения. В связи со значительной неровностью речного дна строгая постановка измерений труднодостижима. Поэтому было принято решение одновременно с натурными измерениями выполнятьи лабораторные исследования воздействия растительности на гидравлику потока в русле.

В летний период 2017 года были проведены эксперименты по оценке степени полегания водной растительности под воздействием скорости речного 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.

В рамках лабораторных исследований на кафедре гидрометрии РГГМУ была сооружена физическая модель участка р. Оредеж. На этой модели были выполнены все те же измерения, что и в натуре.

Данные измерений на модели обрабатывались в программном комплексе Hec-Ras.

По результатам измерений на физической модели с последующей обработкой в программе Hec-Ras можно сделать следующие выводы:

– полегание водной растительности уменьшает сопротивление и увеличивает пропускную способность;

– уклоны свободной поверхности будут оставаться постоянными вне зависимости от степени зарастания русла;

– коэффициент шероховатости *n* р. Оредеж на участке измерений изменяется в диапазоне от 0.065 до 0.16, в зависимости от уровня затопления русла;

Выполненные специальные наблюдения и вычисления уже позволяют по-новому подойти к оценке сопротивления зарастающих русел.

Таким образом разрабатываемая методика, с физической точки зрения, уже более обоснована, и значения коэффициентов шероховатости уже оцениваются более объективно.

Однако по причине того, что подобные исследования только начинают проводиться, нельзя говорить о каких-то глобальных достижениях, так как статистики пока недостаточно.

Но стоит отметить, что ранее предполагаемые общие тенденции уже прослеживаются, и при дальнейших исследованиях они могут принести существенные плоды.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. БарышниковН. Б., Гидравлические сопротивления речных русел. Учебное пособие. 2003. Раздел «Гидравлические сопротивления зарастающих русел». стр. 107-117

2. Боровков Б. С. Русловые процессы и динамика речных потоков на урбанизированных территориях. – Ленинград Гидрометеоиздат, 1989 – стр. 210

3. Барышников Н.Б., Попов И.В. Динамика русловых потоков и русловые процессы. – Л.: Гидрометеоиздат, 1988. – 456 с.

4. Снищенко Б.Ф. Русловые процессы и динамика речных потоков на урбанизированных территориях. – Л.: Гидрометеоиздат, 1989. – 288 с.

5. Клавен А.Б., Копалиани З.Д. Экспериментальные исследования и гидравлическое моделирование речных потоков и руслового процесса. –СПб.: Нестор-История, 2011. – 504 с.

6. Леонов Е. А.. Некоторые характеристики зарастающего речного русла в связи с методикой учета стока воды. – Труды ГГИ.– 1960. – Вып.77. – стр.74-85

7. Леонов Е. А. О вычислении стока воды зарастающих рек способом линейной интерполяции. Метеорология и гидрология №11. Гидрометеоиздат, 1961.

8. Петров Г. Н. Коэффициент шероховатости малых рек и его особенности в период межени в связи с зарастанием русел и техникой измерения расходов воды. Изв. Каз. фил. АН СССР, серия энергет. и водн. хоз - ва, № 2, 1961.

9. Глушков В. Г. Зарастание растениями и засорение наносами водохранилищ и оросительных каналов Западной Европы и меры борьбы с этими явлениями. СПб., 1910.

10. Костяков А. Н. Основы мелиорации. Сельхозгиз, М., 1951.

11. Брудастов А. Д. Осушение минеральных и болотных земель. Сельхозгиз, М.,1955.

12. Печкуров А. Ф. О проектировании и строительстве устойчивых водоприемников и проводящих каналов в условиях БССР. Труды Белорусского н.-и. ин-та мелиорации и водного хозяйства, т. 9, 1958

13. Гринберг Л. М. Некоторые особенности эксплуатации Каракумского канала. Гидротехника и мелиорация, № 7, 1962.

14. Бессеребренников Н. К. К вопросу о рекомендуемых скоростях, предупреждающих русла от зарастания. Труды Белорусского н.-и. ин-та мелиорации и водного хозяйства, т. 9, 1958.

15. Вершинин Б. В. Современное состояние и перспективы рыбохозяйственного использования толстолобика и белого амура в водоемах Советского Союза. Проблемы рыбохозяйственного использования растительноядных рыб в водоемах СССР. Изд. АН Туркм. ССР, Ашхабад, 1963.

16. Straus M. W. Control of Weeds on Irrigation systems. 1949.

17. Järvelä, J., Flow resistance in environmental channels: Focus on vegetation, Helsinki University of Technology Water Resources Publications, TKK-VTR-10, Espoo, 2004, 54 pp.

18. King H., Wisjer Ch. Hydraulics. London, 1927

19. Tal M, Paola C. 2007. Dynamic single-thread channels maintained by the interactions of flow and vegetation. *Geology* 35: 347-350. DOI. 10.1130/G23260A.1

20. Mohrig D, Heller PL, Paola C, Lyons WJ. 2000. Interpreting avulsion process from ancient alluvial sequences: Guadalope-Matarranya system (northern Spain) and Wasatch Formation (western Colorado). *GSA Bulletin* 112(12): 1787-1803.

21. Egozi R, Ashmore P. 2009. Experimental analysis of braided channel pattern response to increased discharge. *Journal of Geophysical Research* 114: F02012. DOI. 10.1029/2008JF001099

22. Statsner A. 1996. A simulation model for meandering rivers. *Water Resources Research* 32(9): 2937-2954.

23. Egozi R, Ashmore P. 2009. Experimental analysis of braided channel pattern response to increased discharge. *Journal of Geophysical Research* 114: F02012. DOI. 10.1029/2008JF001099

24. Фауст О. Основные черты метода исследования процесса течения на заросших растительностью речных участках. IV Гидрологическая конференция Балтийских стран, т. IV, 1933.

25. Гербих Г. Определение влияния растительности на подъем уровня воды в реках Брда (Брасс), Чарно Вода, Вирчика и Радуна. IV Гидрологическая конференция Балтийских стран, т. IV, 1933

26. Сотченко А. М. О вычислении стока в условиях зарастания русла реки. Метеорология и гидрология, № 7, 1940.

27. Даватц П. А. Пример определения связи между уровнями и расходами рек, подверженных зарастанию водной растительностью. Метеорология и гидрология, № 9, 1940.

28. Трестман А. Г. О построении кривых расходов воды при зарастании русла. Метеорология и гидрология, М 10, 1951.

29. Петрикевич Н. П. Уточнение методики учета стока рек с зарастающим руслом. ГГИ, 1951.

30. Флерова Р. А. Гидрологический анализ результатов наблюдений на речных станциях. Гидрометеоиздат, 1951

31. Срибный М. Ф. О нормах сопротивления движению естественных водотоков. Изв. ГГИ, № 50/51, 1932.

32. Огиевский А. В. Гидрометрия и производство гидрометрических работ. ОНТИ, 1947.

33. Västilä K. Flow–plant–sediment interactions: Vegetative resistance modeling and cohesive sediment processes. Helsinki, 2015.

34. Беновицкий Э. Л. Вывод расчетных зависимостей для коэффициента шероховатости частично заросших русел. Водные ресурсы 1988, №1.

35. Беновицкий Э. Л. О коэффициенте гидравлического трения на границе зарослей высшей водной растительности в открытых руслах. Водные ресурсы 1991, №3.

36. Косиченко Ю. М. Расчет коэффициентов шероховатости заросших русел каналов. Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Технические науки, 1997, №2.

37. Мирцхулава Ц. Е. Надежность гидромелеоративных сооружений. – М.:Колос, 1974)

38. Косиченко Ю. М. К гидравлическому расчету облицованных каналов. Известия вузов, Строительство, 1993, №2.

39. Косиченко Ю. М. Каналы переброски стока России – Новочеркасск. НГМА, 2004.

40. Valentina Boscolo: Effects of in-stream vegetation on hydraulic resistance in regulated rivers, Università degli Studi di Padova, Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Civile. Aberdeen, July 2014

41. Векшина Т.В. Гидравлические сопротивления русел рек, зарастающих растительностью. Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета, № 19.

42. Водокрасовые. Интернет-ресурс - https://ru.wikipedia.org/wiki/Водокрасовые

43. Высшие водные растения и их значения. Интернет-ресурс - http://sunat.admhmansy.ru/upload/iblock/f79/f79e6a6e08d6c4e4b0b07c77559906a6.pdf.

44. Злаковые. Интернет-ресурс –https://ru.wikipedia.org/wiki/Злаки (Дата обращения: 26.05.2018)

45. Лютиковые. Интернет-ресурс – https://ru.wikipedia.org/wiki/Лютиковые

46. Осока. Интернет-ресурс - https://ru.wikipedia.org/wiki/Осока

47. Рдест. Интернет-ресурс -https://ru.wikipedia.org/wiki/Рдест

48. Хвощ приречный. Интернет-ресурс - https://ru.wikipedia.org/wiki/Хвощ_приречный

49. Частуховые. Интернет-ресурс - https://ru.wikipedia.org/wiki/Частуховые