



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

Кафедра гидрометрии

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
(бакалаврская работа)

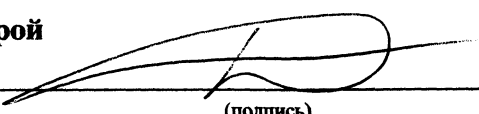
На тему **Гидравлические**
сопротивления зарастающих русел

Исполнитель Пожарицкая Александра Дмитриевна 
(фамилия, имя, отчество)

Руководитель кандидат физ.-мат. наук
(ученая степень, ученое звание)

Саноцкая Надежда Александровна 
(фамилия, имя, отчество)

«К защите допускаю»
Заведующий кафедрой


(подпись)

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

Исаев Дмитрий Игоревич
(фамилия, имя, отчество)

«ИД» серия 2017.

Санкт-Петербург
2017



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

Кафедра гидрометрии

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
(бакалаврская работа)

На тему **Гидравлические
сопротивления зарастающих русел**

Исполнитель Пожарицкая Александра Дмитриевна
(фамилия, имя, отчество)

Руководитель кандидат физ.-мат. наук
(ученая степень, ученое звание)

Саноцкая Надежда Александровна
(фамилия, имя, отчество)

«К защите допускаю»
Заведующий кафедрой

(подпись)
кандидат географических наук, доцент
(ученая степень, ученое звание)
Исаев Дмитрий Игоревич
(фамилия, имя, отчество)

«__» _____ 20__ г.

Санкт-Петербург
2017

Оглавление

Введение.....	3
1 Общие сведения о зарастающих руслах.....	5
1.1 Факторы зарастаемости	5
1.2 Коэффициент шероховатости и режим уклона потока, текущего в заросшем русле	13
1.3 Краткий обзор способов вычисления стока воды зарастающих рек	16
1.4 Зависимость коэффициента $K_{зар}$ от гидравлических характеристик	19
1.5 Вычисление стока воды зарастающих рек способом линейной интерполяции	23
2	30
2.1 Влияние водной растительности на гидравлические сопротивления и шероховатость русел каналов.....	30
3 Эксперименты в русловой лаборатории	45
3.1 Описание лабораторной установки	45
4 Наблюдения за водным режимом на р. Оредеж.....	52
4.1 Физико-географическое положение р. Оредеж	52
4.2 Наблюдения за водной растительностью.....	59
Заключение	60
Список литературы	Ошибка! Закладка не определена.

Введение

Растительность, покрывающая дно и берега рек и ручьев, играет важную роль в гидродинамическом поведении, экологическом равновесии и характеристиках самих рек. Взаимодействия между потоком и растительностью являются сложными и зависят от факторов потока (например, средней скорости потока, турбулентности, характеристик воды, морфологии каналов) и характеристик растительности (тип растения, возраст и размер).

Знание о взаимодействии потока и растительности важно для решения как инженерных, так и экологических вопросов и задач.

Водная растительность стабилизирует речное дно, обеспечивает укрытие для рыб и улучшает качество воды, фильтруя питательные вещества. Поглощение питательных веществ отдельным стеблем зависит от его пограничного слоя, как это происходит при захвате пыльцы. Водная растительность предоставляет среду обитания, изменяет доступность света и температуру, регулирует концентрацию кислорода, углерода и питательных веществ.

Также изобилие растений влияет на глубину потока, уровень воды, пропускную способность и другие важные гидравлические параметры.

Пропускная способность русла зависит от растительности. Наличие многочисленных препятствий на пути потока может вызвать значительную турбулентность: в этих условиях поток воды существенно задерживается. Увеличение гидравлических сопротивлений русла может привести к повышению уровня воды с неблагоприятными затоплениями и подтоплениями.

Хотя указанных последствий можно избежать путем полного или частичного удаления растительности, это дорогостоящая процедура и может иметь экологические последствия. Полное удаление растений в реке может привести к размыву дна и берегов и увеличению мутности воды. Способность растений препятствовать размыву зависит от вида растительности и

однородности покрытия. Для любого отдельного вида растительности он варьируется в зависимости от возраста и состояния растений и от сезона года.

Развитие знаний о гидродинамике зарастающих русел является основной целью понимания условий потока воды, разработки защиты от наводнений и планирования скорректированного управления смягчением последствий для естественных рек.

Одной из не до конца разрешенных задач речной гидравлики является расчет средних скоростей речных потоков, основанный на определении величины гидравлических сопротивлений.

Гидравлические сопротивления – это силы, противодействующие движению воды. В естественных руслах и каналах эти силы обусловлены наличием выступов шероховатости, ледовых явлений, донных отложений, изгибов русла и растительности.

Для оценки этих сил наиболее часто используются такие характеристики как: коэффициент Шези C , коэффициент шероховатости n , высота выступов шероховатости Δ и коэффициент гидравлического трения λ .

При расчете средних скоростей и гидравлических сопротивлений в речных руслах и каналах зачастую используют формулы, основным параметром которых является коэффициент шероховатости (формулы: Шези, Маннинга, Павловского и др). Его величину обычно определяют по описательной характеристике сопротивлений русла и поймы и соответствующим таблицам.

Общим недостатком такого типа формул является их эмпирическая природа, не раскрывающая физической сути коэффициента шероховатости.[1]

Целью данной работы было выявление методики расчета гидравлических сопротивлений, учитывающей физические характеристики зарастающего русла.

1 Общие сведения о зарастающих руслах.

1.1 Факторы зарастаемости

Ежегодно с наступлением лета десятки тысяч водотоков, протекающих в умеренных и южных широтах ЕТС, зарастают водной растительностью. На первый взгляд это явление не имеет практического значения. Между тем убытки от зарастания весьма ощутительны. По данным Б. В. Вершинина [2], на Новомосковской ГРЭС, где зарастание водоема-охладителя охватывает всего 10% его площади, оно вызывает снижение вакуума по машинному залу на 0,5%, что влечет за собой недовыработку 5760 000 кВт-ч. электроэнергии в год. Зарастание также удорожает стоимость сооружения охладителей, так как оно заставляет увеличивать их глубину.

Значительный ущерб зарастание наносит водному хозяйству и мелиорации. Так, потери воды в озерах Келифского Узбоя только за счет транспирации водной растительности, по данным ТуркменНИИГиМ, составили более 14 млн. м³/год. Борьба с зарастанием на осушительных и оросительных каналах ведется далеко не везде успешно и обходится весьма дорого. Если учесть, что в России в оросительных и осушительных системах имеется около 1 млн. км каналов и многие из них подвержены зарастанию, то станет ясной актуальность проблемы борьбы с зарастанием, которая не может быть решена без знания факторов зарастания. Следует также помнить, что зарастание равнинных рек сопровождается подпором уровня воды, который нередко достигает 0,4-0,8 м, а иногда и 1,5 м, что ведет к заболачиванию пойменных земель. Зарастание рек не меньше бед приносит и гидрометрам, так как оно мешает производству работ, усложняет методику и удорожает учет стока воды. В гидрологической литературе о зарастании рек упоминается весьма кратко. М. А. Великанов [4] так описывает процесс зарастания: «Но раз зарастание дна началось, то оно может лишь сильнее и сильнее развиваться, так как зарастание дна повышает коэффициент шероховатости русла и тем самым при данном уклоне уменьшает скорости течения, т. е. создает все более и более благоприятные условия для

зарастания». Н. Н. Воронихин [2] и Г. Н. Петров [3] опровергают мнение только о прогрессирующем зарастании: первый, показывая это на примерах распространения и развития элодеи, второй-, на эпизодических усилениях и ослаблениях зарастания рек республики Татарстан.

Зарастание рек зависит от многих факторов: климата, высоты местности над уровнем моря, продольного уклона водной поверхности, размеров реки (глубина, ширина), химического состава вод, состава донных грунтов и наносов, мутности воды, освещенности и т. д. При многообразии влияющих факторов встает вопрос о критических значениях того или иного фактора, при которых зарастание не наблюдается. Одним из важных факторов является климат. Известно, что вегетация водных и воздушно-водных растений наступает при так называемой эффективной температуре, которая близка к $5-10^{\circ}\text{C}$. Для нормального развития растений необходимо, чтобы температура воды была выше эффективной и наблюдалась бы длительное время. Из рассмотрения карт с изолиниями перехода температуры воды весной и осенью через 4 и 10° , составленных Е. М. Соколовой, видно, что по территории ЕТС почти всюду имеются благоприятные условия для развития водной растительности, за исключением севера и горных систем.

Значительную роль в развитии водной растительности имеет химизм вод и грунтов. Например, песчаные грунты и почво-грунты, имеющие в себе закисные соединения (вивианит, глей), не зарастают. Воды, протекающие в каналах, прорытых в торфе низинных болот, начинают зарастать с первого же года после прокопки, каналы же на верховых болотах зарастают значительно слабее. Каналы в суглинистых грунтах Колхидской низменности, богатых минеральными веществами, имеющие благоприятный термический режим, через полгода полностью покрываются растительностью. Минерализация сдерживает рост растительности только в очень высоких концентрациях. Некоторые речные и озерные растения (тростник, рупия) переносят концентрацию солей до $20-30\text{ г/л}$.

Высота местности оказывает влияние на зарастаемость рек не сама по себе, а в основном через гидравлические характеристики потока – продольный уклон, скорость потока. Рассмотрение гипсометрической карты России показывает, что зарастание рек распространено, преимущественно в зонах с высотами до 300-400 м над уровнем моря. Впрочем, некоторые реки, стекающие со склонов Урала, зарастают при отметках 500 м и более над уровнем моря (например, Кага, Белая и др.).

Рассмотрим влияние гидравлических характеристик потока и в первую очередь скорости течения на зарастаемость русла. Влияние скорости течения воды на зарастаемость сказывается двояким, образом.

С одной стороны, большие скорости приводят к размыву русла и тем самым препятствуют укоренению водной растительности на дне, водотока; с другой стороны, при больших скоростях набегающий поток вырывает, ломает стебли растений.

Мнения о критическом значении средней скорости потока для зарастания русел разноречивы, В. Г. Глушков [4] считает, что зарастание каналов отсутствует при средней скорости 0,95-1,00 м/с; по мнению А. Н. Костикова [5], критическая скорость равна 0,5 м/с.

А Д Брудастов [6] считает, что эта скорость еще в два раза меньше, т е 0,25-0,30 м/с. Справочник ВНИИГиМ по мелиорации и гидротехнике рекомендует поддерживать средние скорости в каналах не левее 0,30-0,50 м/с. А. Ф. Печуров [7] считает, что зарастание отсутствует или бывает незначительным при скоростях потока 0,25-0,30 м/с. Флин определил для каналов Индии, что зарастание отсутствует при скоростях 0,56 м/с, а для каналов Испании – при 0,61-0,76 м/с.

При крайней разноречивости мнений авторы рекомендаций [5, 6, 7] не приводят конкретных данных, по которым были получены критические скорости. Несомненно, эти рекомендации являются приближенными, полученными для отдельных локальных условий, на разных реках, в разных климатических и гидрологических условиях. Практика показывает, что при средних скоростях потока около 0,30 м/с и более зарастают многие реки. Л.

М. Гринберг [8] приводит данные о зарастании Каракумского канала, где скорости были около 0,30 м/с и глубины до 3 м. Н. К. Бессеребренников [9], исследуя зарастаемость водотоков, сузил этот вопрос и свел его к анализу диапазонов скоростей, в которых находились фактические средние скорости на зарастающих и свободных реках и каналах, по следующей схеме:

- 1) $0 < v < v_0$ – фактические средние скорости на вертикалях меньше критических значений, определяющих начало размыва;
- 2) $v_0 < v < v'_0$ – диапазон скоростей, в котором воздействие потока на русло может менять характер от начальной стадии влечения по дну твердых частиц до начала взвешивания передвигающихся по дну наносов;
- 3) $v > v'_0$ – фактические средние скорости на вертикалях больше критических значений для начала взвешивания наносов.

Для вычисления средней скорости, соответствующей началу движения частиц, Н. К. Бессеребренниковым использовалась формула В. Н. Гончарова

$$v_0 = 3,9 H^{0,2} \left(\frac{d_{cp}}{D} \right)^{0,2} \sqrt{(d_{cp} + 0,0014)^{0,6}} \quad (1.1)$$

где d_{cp} – средний диаметр зерен наносов в метрах. D – наибольший диаметр зерен наносов в метрах. H – глубина потока в метрах.

Средняя скорость потока при начале взвешивания наносов вычислялась по формуле А. Ф. Печкурова

$$v'_0 = 24,6 H^{0,2} \sqrt{d_{10}} \quad (1.2)$$

где d_{10} – диаметр наносного материала, выше которого более крупные фракции содержатся в количестве 10% (в метрах).

Сопоставление вычисленных критических скоростей v_0 и v'_0 и фактических скоростей было произведено по 19 створам на 11 водотоках. При этом в руслах без растительности меженные средние скорости находились в двух диапазонах: $v_0 < v < v'_0$ и $v > v'_0$, и равнялись только 0,215–0,36 м/с. Для зарастающих рек преобладали скорости в диапазоне $v > v_0$ и были малы (0,037–0,104 м/с). Применительно к проектируемым руслам каналов Бессеребренников [9] считает возможным для вычисления критической скорости не зарастания применять формулу (1.1) с добавлением

коэффициента $\beta=1,05$. В итоге он признает, что цель исследования не достигнута, так как не установлено влияние величины скорости движения на степень зарастания. Разумеется, при малом диапазоне скоростей по небольшому числу рек (11), которыми располагал этот автор, трудно получить сколько-нибудь надежные выводы, тем более, что недостатки чисто гидравлического подхода в оценке зарастаемости русла очевидны. Прежде всего они видны в стремлении объяснить такое сложное явление, как зарастание русла, влиянием одного фактора — средней скоростью потока. Как известно, последняя никоим образом не может характеризовать распределение скоростей по глубине и ширине потока. Как правило, в прибрежных частях русла всегда наблюдаются благоприятные условия для развития водной растительности, и в действительности получается очень пестрая картина зарастаемости. Даже на реках с размываемым руслом зарастание может быть в виде куртин или отдельных длинных полос (зон). Типичным в этом отношении является русло р. Великой на участке поста г. Опочка, где одновременно наблюдалось и перемещение донных гряд наносов, и зарастание дна, причем влияние зарастания на поток было весьма ощутимым: коэффициент $K_{зар} = 0,40-0,60$. В районе водомерного поста передвижение донных наносов приводило к эпизодическому замыву песком двух последних свай. Между тем вдоль правого берега и по всей ширине реки в виде отдельных куртин располагались заросли тростника, рдеста и другой растительности. В гидрологическом створе, расположенном в 1,47 км ниже водомерного поста, передвижение донных наносов происходило на середине русла, а зарастание отмечалось только вдоль левого берега. Наблюдения над развитием и распространением водной растительности на многих реках показали, что куртины растительности, раз появившиеся, обычно устойчивы в плане и препятствуют передвижению влекомых по дну наносов. Это приводит к постепенному повышению дна в месте расположения куртин, и рельеф русла приобретает волнистый характер. Совершенно неправильно некоторые авторы относят критические (незарастающие) скорости к меженному состоянию русла. Наши наблюдения

показывают, что развитие растительности начинается весной на спаде половодья, когда уровни воды и скорости течения выше меженных. Для выяснения вопроса, при каких скоростях начинается зарастание, нами были построены совмещенные графики $K_{зар} = f(T)$ и $U_{cp} = f(T)$ по отдельным створам. Как видно из рис. 1. для поста д. Визги (рИсса) в начальной фазе вегетации 25/IV 1960 года, когда появились первые побеги водных растений, $K_{зар} = 0.97$, средняя скорость $U_{cp} = 0.63$ м/с; соответственно для поста г. Великие Луки, р. Ловать 23/V 1959 г. $K_{зар} = 0.93$, $U_{cp} = 0.49$ м/с. С развитием растительности и повышением уровня коэффициенты $K_{зар}$ и средние скорости в межень по этим постам уменьшились соответственно до 0.12 и 0.34 (19/VI), 0.15 и 0.17 (23/VII), 0.36 и 0.14 м/с (19/VI).

В периоды прохождения ранних летних дождевых паводков развитие водной растительности не прекращается, хотя на реках наблюдались факты вырывания стеблей, так как максимальные скорости достигали 1,0-1,2 м/с.

Чтобы окончательно проверить концепцию о решающем влиянии скорости потока на зарастание, а также определить критические скорости, при которых уже невозможно зарастание в естественных условиях равнинных рек, нами после предварительного анализа были сделаны выборки гидравлических характеристик по 1121 створу, расположенному на реках ЕТС, без рек районов Карелии, Севера ЕТС, Крыма и Кубани, где в силу специфических условий реки, как правило, не зарастают. В основу выборки легли материалы гидрологических ежегодников за 1956-1959 гг. Гидравлические характеристики выбирались при меженном состоянии русла и при наименьших значениях уровня и средней скорости потока. Кроме того, для зарастающих рек выбирались моменты начала зарастания и для этих моментов определялись средние скорости течения и глубины. Всего был отобран шестьсот двадцать один гидрологический створ на зарастающих реках и 500 – на незарастающих. При исследовании поставленной задачи был охвачен большой диапазон условий. Для незарастающих русел гидравлические характеристики изменялись в следующих пределах: средняя

скорость потока в межень 0,01-1,23 м/с, средняя глубина 0,07-8,33 м, ширина русла 0,8-506 м, расход воды 0,017-3570 м³/с, продольный уклон 0,002-0,8‰; для зарастающих русел соответственно: 0,01-1,59 м/с; 0,06-4,01м; 1,0-408 м; 0,011-503 м³/с; 0,015-10,0‰. Статистический анализ распределения рек по ступеням средних скоростей (таблица 1.1) показал следующее:

Таблица 1.1 Распределение средних скоростей

Интервал средней скорости потока, м/с	Свободные, незарастающие реки		Зарастающие реки	
	Число рек со средней скоростью данного интервала	Число рек данного интервала в % от общего числа рек	Число рек со средней скоростью данного интервала	Число рек данного интервала в % от общего числа рек
0,01-0,25	260	52,0	511	82,5
0,26-0,40	135	27,0	80	12,9
0,41-0,55	73	14,6	23	3,1
0,56-0,80	28	5,6	5	0,8
более 0,80	4	0,8	2	0,1
Итого	500	100	621	100

На двухсот шестидесяти незарастающих реках (из пятисот) средние скорости малы т. е. не превышают 0,25 м/с. На зарастающих реках малые скорости наблюдаются на пятьсот одиннадцати реках, а повышенные (0,26-0,40 м/с) – всего на восьмидесяти гидрологических створах. В общей сложности на зарастающих реках в 95% случаев преобладают скорости до 0,40 м/с, а на незарастающих в 80% случаев. Массовый материал также подтвердил, что зарастание большинства рек начинается при скоростях 0,4-0,8 м/с и в отдельных случаях около 1,0 м/с. Относительно небольшое число зарастающих рек (всего тридцать) имеет скорости в межень 0,41 м/с и выше.

Это отчасти объясняется тем, что большинство створов располагается на плесовых участках, где течение в несколько раз медленнее, чем на перекатах. Кроме того, для анализа были выбраны меженные наименьшие скорости, тогда как в течение вегетационного периода скорости, особенно в начальную фазу вегетации, иногда превышают меженные в два – десять раз.

Проведенная обработка не подтверждает мнение некоторых авторов [7, 10], что скорости 0,25-0,30 м/с являются критическими для зарастания. По нашим данным, в межень на ста зарастающих реках (из шестьсот двадцати

одной) средние скорости превышали этот предел. Вообще критическая скорость, при которой не наблюдается зарастание, зависит от средней крупности донных наносов, их распределения по руслу, а также распределения ширин и глубин потока и, наконец, от вида водной растительности, так как одни виды растений могут произрастать только в медленных водах, а другие – в быстрых. Известно, например, что в тропиках некоторые водные растения произрастают только на быстротоках и даже в водопадах.

С учетом изложенного можно сказать, что критические средние скорости, при которых русла рек не зарастают, для равнинных рек ЕТС с легкими грунтами (мелкий и средний песок, $d=0,1-0,3$ и $0,3-1,0$ мм) равны $0,45-0,65$ м/с. Для русел с тяжелыми моренными грунтами (глиной, суглинком), а также для русел с крупным песком и хрящеватыми грунтами при наличии крупных камней, валунов или захламлений эти скорости равны $0,65-0,95$ м/с. Отсутствие растительности в русле при скоростях меньше указанных объясняется другими факторами – глубиной потока, освещенностью, химизмом вод и грунтов, или гидрологическим и термическим режимом и пр.

Кратко перечислим критические значения некоторых других факторов, влияющих на развитие водной растительности. По нашим исследованиям, критический продольный уклон реки равен $1,0-2,0\text{‰}$), хотя в отдельных редких случаях наблюдаются зарастающие участки с уклонами до $8-10\text{‰}$. Большие реки с водосборами свыше $8000-10000$ км², как правило, не зарастают. Однако встречаются случаи, когда зарастанию подвергаются реки с весьма большими площадями водосборов, например: р. Северный Донец – г. Изюм ($F=22\,600$ км²), р. Воронеж – г. Воронеж, ($F=21\,100$ км²), р. Ловать – с. Ляховичи ($F = 15\,900$ км²) и др.

Исследованиями различных авторов установлено, что водная растительность произрастает на участках с глубинами до двух-трех метров. Для зарастающих рек средние глубины в межень, как правило, не превышают $1,0-1,5$ м и, лишь в отдельных случаях достигают $2,0-3,0$ м.

Свет совершенно необходим для роста водных растений. А. Ф. Тимофеев [11] показал, что интенсивность освещения 0,020-0,025 единиц/см² является критической, так как при меньших значениях зарастание почти не происходит. М. В. Страус [12] установил критические мутности при разных глубинах. От 0,05 до 0,28 м глубины мутность, поглощающая свет и способствующая росту водной растительности, изменяется от 1,61 до 0,161 кг/м³. Из прочих факторов определенное влияние на зарастание оказывают частые колебания уровня и ветер. В природе зарастаемость водотоков зависит чаще всего от комбинации многих факторов, поэтому, указав критические значения каждого, надо помнить, что их совместное сдерживающее влияние, даже при значениях каждого в отдельности меньше критических, может подавлять или совсем исключать зарастаемость водотоков.[13]

1.2 Коэффициент шероховатости и режим уклона потока, текущего в заросшем 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 $n = 0,0050$ и $\gamma = 3,75$; для рек заросших $n = 0,0067$ и $\gamma = 5,50$; для таежных глухих рек с медленным течением $n = 0,200$.

Б. В. Поляков даже для пойм, заросших лесом, считал, что $n = 0,60$ является уже наивысшим значением.

Кинг[14] 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 [15], Полякова и других можно считать только ориентировочными.

По измерениям на посту Визги на р. Иссе коэффициент шероховатости изменялся в течение сезона от 0,040 до 0,210, т.е. в пять раз.

При определении коэффициента шероховатости заросшего русла неизбежно возникают такие вопросы: являются 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 как «гидравлический радиус» как

$$R = \frac{\omega}{\chi} \quad (1.3)$$

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 сопротивления.

В заросшем русле приходится рассматривать два виде 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 поддержания колебательного движения стеблей.

Потери на раскачивание зависят от упругих свойств стеблей и скорости течения воды в русле. При малых скоростях раскачивание не наблюдается. 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. К сожалению, пока еще методика точного измерения уклонов рек нивелированием довольно громоздка и недостаточно разработана и в результате имеются лишь отрывочные данные об уклонах зарастающих рек. 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.

Нам кажется, что последнее мнение в ряде случаев несправедливо. Мы считаем, что, несмотря на невысокую точность, сведения об уклоне, полученные путем обычных массовых полевых измерений по уклонным постам, могут быть использованы для целей анализа гидравлических характеристик заросшего русла.

Изучение режима уклонов на зарастающем участке показало, что

1) Для осенних паводков, когда растительность уже отмирает уклоны на спаде меньше, чем на подъеме. Для летних паводков, наоборот, уклон на спаде больше, чем на подъеме.

2) Изучение режима уклонов зарастающих рек северо-запада Европейской части России и Эстонии позволило выделить 4 типа изменения уклона в зависимости от степени зарастания и местоположения участка наблюдения 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 при данном уровне и с ростом уровня уменьшается;

г) уклон при зарастании больше уклона при свободном русле и с ростом уровня уменьшается. [14]

1.3 Краткий обзор способов вычисления стока воды зарастающих рек

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 [16] впервые в России предложил, в порядке общей схемы, учет стока воды зарастающих рек вести либо по способу фазовых кривых расхода воды, либо с использованием графика $K_{\text{зар}} = f(t)$.

О. Фауст [17] 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 не зарастающего 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.

Г. Гербих[18], 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 средней температуры за вегетационный период t со средней высотой подъема уровня H за период зарастания (май-ноябрь), Гербих получил зависимость вида

$$H = A(t - B)^n \quad (1.4)$$

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 заключении 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 существовать некоторая зависимость между ходом развития водной растительности и ходом температуры воды (воздуха). Однако эта зависимость почти во всех случаях бывает затуманена колебаниями уровня, происходящими вследствие изменения водности, поэтому способ Гербиха имеет очень ограниченное применение в практике.

А. М. Сотченко[19] 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 развития 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 межлетнего периода.

Определение дат начала и конца фаз вегетации водной растительности по сумме температур, вероятно, более или менее надежно: только в отдельных случаях. Для фазы отмирания, как признает и сам автор, „вопрос об определении $K_{зар}$ разрешен пока несколько упрощенно”.

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[20], как и Сотченко, предлагает вычислять сток воды с использованием графика $K_{зар}$, причем даты начала и конца влияний 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.

А. Г. Трёстман[21], рассматривая случай недостаточного количества измерения расхода воды, предлагал для надежного учета стока воды применять несколько видоизмененный способ временных (фазовых) кривых расхода, полагая, что расходы воды, 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 расходакаев” невозможно уверенно провести в случае колебаний водности и тем более, когда опорных измерений расхода очень мало. Н. П. Петрикевич[22] полагала, что способ переходныхкоэффициентов $K_{зар}$ наиболее перспективный и что задачей дальнейших исследований является выявление коррелятивной зависимости $K_{зар} = f(H)$. Такого же мнения придерживается и Р. А. Флерова [23].

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.[24]

1.4 Зависимость коэффициента $K_{зар}$ от гидравлических характеристик

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[19] отмечал, что установить зависимость между изменениями уровнями воды и коэффициентом $K_{зар}$ 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

$$K_{\text{зар}}=f(H) \text{ или } K_{\text{зар}}=f(I).$$

Практически очень редко удавалось построить графики этих зависимостей; почти всегда оказывалось, что одному и тому же значению уровня или уклона для данного гидроствора в зависимости от фазы вегетации могут соответствовать разные коэффициенты $K_{\text{зар}}$ – от 0,10 до 1,0.

Неудачи многих исследователей, пытавшихся установить закономерность изменения коэффициентов $K_{\text{зар}}$ в паводки, на наш взгляд, были обусловлены тем, что изменения $K_{\text{зар}}$ 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 $K_{\text{зар}}$ 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. Представление о том, как изменяются гидравлические характеристики заросшего русла при одном и том же значении $K_{\text{зар}}$ наблюдаемого в разное время при разных уровнях и состоянии растительности, можно получить из таблицы 1, составленной по наблюдениям автора на посту Визги на р. Иссе.

Таблица 1.2 Гидравлические характеристики русла на р. Исса – д. Визги

Дата наблюдений	Уровень воды H см	Расход воды Q м ³ /с	Уклон I ‰	Глубина ср. h м	Подпор Δz см	Скорость средняя	$K_{\text{зар}}$	Коэфф. шероховатости n	Число Фруда Fr
1958 г. 10/IV	129	3,87	0,42	0,76	29	0,21	0,46	0,081	0,006
11/V	126	3,63	0,42	0,73	27	0,21	0,46	0,079	0,006
22/VI	119	3,08	0,38	0,7	25	0,19	0,46	0,081	0,005
29/VII	144	5,34	0,46	0,93	33	0,24	0,46	0,085	0,006

30/VII	146	5,56	0,44	0,94	34	0,24	0,46	0,084	0,006
14/VIII	138	4,71	0,48	0,86	32	0,23	0,46	0,086	0,006
17/VIII	133	4,28	0,44	0,82	30	0,22	0,46	0,083	0,006
22/VIII	128	3,8	0,42	0,78	28	0,21	0,46	0,083	0,005
24/VIII	128	3,83	0,43	0,79	28	0,2	0,46	0,088	0,005
Относит. изменени е	–	1,8	1,26	1,34	1,36	1,26	1	1,1	1,21

Как видно из таблицы, 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.

РИСУНОК

Рисунок 1.1

На рисунке 1.1 изображена связь $K_{зар}$ и коэффициента шероховатости n по данным наблюдений в 1957-1958 гг. на посту Визги на р. Иссе. Коэффициент шероховатости n вычислен по 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 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 прироста расхода воды. Этот случай наблюдается в периоды весенне-летних дождевых паводков. Интенсивность изменения $K_{зар}$ обычно меньше, чем в двух первых типах режима.

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 $K_{\text{зар}}$ возможны еще два, когда коэффициент $K_{\text{зар}}$ 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.

Выводы

Для точных опорных измерений расхода воды и вообще повышения точности учета стока воды зарастающих рек рекомендуется следующее:

- На зарастающих реках с неравномерным распределением кустов водной растительности различной густоты при разбивке скоростных вертикалей необходимо учитывать расположение кустов водной растительности.
- Всегда, когда позволяет глубина, рекомендуется удалять (выкашивать) растительность по гидрометрическому створу.
- 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.
- На каждом посту необходимо изучить распределение скоростей по вертикалям гидрометрического створа и выбрать наиболее подходящий способ вычисления средней скорости течения на вертикали.
- Малые значения $K_{\text{зар}}$ (меньше 0,3) следует вычислять до третьего знака после запятой. [24]

1.5 Вычисление стока воды зарастающих рек способом линейной интерполяции

В Наставлении гидрометеорологическим станциям и постам, выпуск 6, часть III, 1958 г. говорится, что «при большой частоте измерений расходов в период зарастания, когда все дождевые паводки освещены полностью или почти по всей амплитуде расходами, измеренными на подъеме и на спаде, и измерения в периоды длительного стояния низких уровней и малых их

колебаний достаточно часты, вычисление стока производится по интерполяции между измеренными расходами».

Вышеприведенную рекомендацию по учету стока нельзя признать четкой. В самом деле, слова «при большой частоте измерений», «при малых колебаниях уровня» можно весьма по-разному перевести на язык чисел, а поэтому неизвестно, какое число опорных измерений можно считать «большим» и какие колебания уровня «малыми». Между тем, это важно знать для надежного учета стока, особенно на временных гидрологических створах неизученных рек, где способ линейной интерполяции является единственным.

Считают, что для вычисления стока в межень способом $K_{зар}$ достаточно трех опорных измерений в месяц, способ же линейной интерполяции при трех опорных измерениях дает низкую точность вычисления месячного стока. Для проверки этого мнения были вычислены среднемесячные расходы воды способом $K_{зар}$ и линейной интерполяцией по двадцати двум гидрологическим створам за 1958-59 гг.

Все 22 гидрологических створа были выбраны на зарастающих реках Северо-Запада Европейской территории России с беспаводочным режимом уровня в течение всего вегетационного периода. На этих створах с июня по октябрь было измерено в каждом месяце по три расхода воды. Средний месячный сток воды вычислялся линейной интерполяцией по трем опорным измерениям данного месяца с учетом последнего измерения предыдущего и первого измерения последующего месяца. Для второго способа графики $K_{зар}$ строились строго по опорным измерениям.

Результаты сравнения вычисленных средних месячных расходов воды по обоим способам приведены в таблице 1.3 в виде числа случаев разных интервалов соотношения $\frac{Q_{и}}{Q_{к}}$, где $Q_{и}$ – среднемесячный расход воды, вычисленный линейной интерполяцией, а $Q_{к}$ – способом $K_{зар}$.

Как видно из данных таблицы 1.4, из общего числа случаев (месяцев) 110, для 104 соотношение не превышало 10%. Таким образом, в подавляющем большинстве случаев расхождения в значениях среднего

месячного расхода воды было не выше 10 %. Однако такое малое расхождение вычисленных величин стока еще не позволяет окончательно утверждать, что оба способа вычисления равны по точности. Дело в том, что точность вычисления среднего месячного стока по обоим способам зависит не только от числа опорных измерений, но и от распределения дат измерения опорных расходов воды.

Таблица 1.3 Результаты сравнения полученных значений расходов воды по способам линейной интерполяции и $K_{\text{зар}}$

Интервалсоотношения	Число соотношений данного интервала	Число соотношений в % общего числа случаев
1,25-1,21	1	1,0
1,20-1,16	—	—
1,15-1,11	4	3,6
1,10-1,06	8	7,3
1,05-1,01	53	48,1
1,00-0,96	37	33,6
0,95 - 0,91	6	5,4
0,90-0,86	1	1,0

Вообще говоря, если не ставить условия равенства интервалов между опорными измерениями в пределах месяца, то при трех опорных измерениях в месяц возможно четыре тысячи шестьдесят случаев размещения дат опорных измерений¹. При условии строгой равномерности между опорными измерениями будем иметь всего лишь десять вариантов с различным размещением дат опорных измерений, в таблице 1.5 представлены отклонения выборочных расходов воды, вычисленных способом $K_{\text{зар}}$ и линейной интерполяцией, в процентах истинных. За истинные средние месячные расходы воды брались расходы, вычисленные как среднеарифметическое из ежедневных измерений. В таблице 1.4 в первом варианте опорные измерения были взяты 1, 11, 21-го числа каждого месяца, во втором – 2, 12, 22-го и т. д. до десятого варианта. В вариантах одиннадцать и двенадцать даты опорных измерений выбраны с учетом

получения минимального и максимального значений средних месячных расходов воды.

¹ Число всех возможных расположений трех измерений в течение месяца можно вычислить по формуле сочетаний

$$C_m^n = \frac{n!}{m!(n-m)!} = \frac{30!}{3!27!} = 4060 \quad (1.5)$$

Таблица 1.4. Отклонения вычисленных расходов воды от истинных (в %) на р. Исса – д. Визги, 1958 г.

Варианты	июнь		июль		август		сентябрь		октябрь	
	К	Инт.	К	Инт.	К	Инт.	К	Инт.	К	Инт.
1	3	0	10	13	5	4	-9	-5	-1	-10
2	-10	-6	5	-6	-5	-2	5	27	-1	-3
3	4	7	1	-2	-5	-8	-1	14	-6	-4
4	0	9	9	1	-5	-6	-2	9	3	-5
5	-1	6	-5	-14	-8	-6	5	6	1	-7
6	1	5	12	2	1	-6	0	12	1	5
7	5	25	-2	-4	-3	1	-7	11	-2	0
8	9	30	1	0	2	1	-5	-7	3	5
9	1	25	3	11	4	6	-3	3	0	1
10	0	21	18	12	0	2	-4	3	0	-1
11	-11	-17	-10	-30	-9	-26	-13	-21	2	16
12	11	30	16	36	10	17	9	24	4	10

Как видно из данных таблицы 1.4, полученные отклонения средних месячных расходов воды от истинных по обоим способам различаются между собой в большинстве случаев на 5-10%, хотя и в отдельных вариантах это различие достигает 16-25%. Из данных этой таблицы также видно, что для оценки точности учета месячного стока недостаточно знать величины отдельных отклонений, а необходимо еще вычислить обеспеченность отклонения.

Для четырех постов, на которых измерялись ежедневные расходы воды, нами были вычислены средние месячные расходы с учетом трех, четырех, пяти, шести, семи, восьми, десяти опорных измерений в месяц. Для

каждого числа опорных измерений вычислялось по 14 выборочных средних месячный расход воды, Обеспеченность вычисления среднего месячного стока с точностью 5 или 10% для каждого числа опорных измерений определялось по формуле

$$P = \frac{m}{n} \cdot 100\%, \quad (1.6)$$

где m – число выборочных средних месячных расходов воды, отклонившихся не более чем на 5 или 10% от истинного, n – общее число выборочных расходов воды (в этом случае четырнадцать).

По графику связи величин обеспеченности средних месячных расходов воды, вычисленных с точностью 5 и 10%, и числа опорных измерений в месяц по данным 4 постов находим, что для вычисления линейной интерполяцией месячного стока с точностью 10% и обеспеченностью 80% для постов Осипкино, Сельцо, Козлово и Бородино необходимо три – четыре опорных измерения в месяц, а для вычисления с точностью 5% и обеспеченностью 80% необходимо почти вдвое больше опорных измерений.

Вычисления обеспеченности средних месячных расходов воды по этим же постам способом $K_{\text{зар}}$ показали, что для определения месячного стока с точностью 10% и обеспеченностью 80% достаточно два – три измерения в месяц.

Таким образом, данные таблиц 1.3 и 1.4 и вычисления обеспеченности средних месячных расходов воды позволяют сделать вывод, что способ $K_{\text{зар}}$ при наличии трех опорных измерений в месяц не имеет существенного преимущества в отношении точности вычисления меженного месячного стока перед линейной интерполяцией. Учитывая это обстоятельство, мы считаем целесообразным применять для вычисления среднего месячного меженного стока воды зарастающих рек способ линейной интерполяции между опорными измерениями расхода воды. Это даст возможность в десять – пятнадцать раз быстрее вычислять сток и до минимума сократить пояснения к подсчету стока. Наконец, такая элементарная простота вычислений стока при достаточной точности их дает возможность поручать эту работу наблюдателям постов.

Следует отметить, что способ линейной интерполяции по существу является единственным для вычисления стока неизученных рек, на которых в настоящее время эпизодически измеряются расходы воды путем выездов техперсонала гидрологических станций. Ежедневные измерения уровня на таких постах (гидрологических створах) не производятся. Очевидно, число опорных измерений расходов воды, достаточное для надежного вычисления стока линейной интерполяцией, на таких постах необходимо назначать по аналогии с изученными гидрологическими створами, по которым имеются графики связи обеспеченности средних месячных расходов воды и водный режим которых подобен водному режиму неизученной реки.

Проведенные вычисления показывают, что в межень беспаводочные периоды для учета стока с точностью 10% и обеспеченностью 80% достаточно трех-четырех опорных измерений в месяц, равномерно распределенных по времени. При прохождении одиночного паводка в течение месяца для надежного вычисления стока линейной интерполяцией необходимо измерять шесть-восемь опорных расходов воды, репрезентативно размещенных по амплитуде уровня.

Для быстрого вычисления и проверки средних месячных расходов воды удобно применять формулу трапеции:

$$\bar{Q} = \frac{(Q_1 + 2Q_2 + 2Q_3 + \dots + 2Q_{n-1} + Q_n)}{2(n-1)} \quad (1.7)$$

где $\bar{Q}$ – средний месячный расход воды, Q_i – измеренные опорные расходы воды, n – число опорных измерений в данном месяце. Индексы около Q означают порядковый номер расхода воды в данном месяце.

Расходы Q_1 и Q_n обязательно должны относиться к первому и последнему числу каждого месяца. Если в эти даты расходы не измерены, то их можно предварительно определить по интерполяции с учетом последнего измерения в предыдущем месяце и первого измерения в последующем. Наиболее выгодно равномерно располагать в течение месяца 6 опорных расходов воды так, чтобы средний месячный расход можно было вычислить по формуле

$$Q = 0,1(Q_1 + 2Q_2 + 2Q_3 + 2Q_4 + 2Q_5 + Q_6) \quad (1.8)$$

Вычисление среднего месячного расхода воды по формуле (1.8) занимает около одной минуты, тогда как по способу $K_{\text{зар}}$ требует около тридцати минут. [25]

2.1 Влияние водной растительности на гидравлические сопротивления и шероховатость русел каналов

Многие оросительные каналы в процессе эксплуатации зарастают растительностью. Особенно сильно зарастают каналы в земляном русле периодического действия. Заращение русла отмечается и в крупных каналах переброски стока. В бетонных руслах каналов при относительно малых скоростях часто развиваются водоросли. Все это непосредственно оказывает влияние на гидравлические сопротивления русел и, в конечном итоге, на их гидравлическую эффективность и эксплуатационную надежность.

Гидравлическими исследованиями заросших русел занимались В.Т. Чоу (1969), И. А. Долгушев (1975), Г.П. Жук и др. (1984), В.М. Лятхер и И.Н. Гурин (1978), А.Д. Альтшуль и Н. Тай, В.С. Боровков (1989), Э.Л. Беновицкий (1988, 1991), В.Ю. Ляпин (1994), А.Д. Асанова (1987) и др.

В работах Э.Л. Беновицкого (1988, 1991) предложены расчетные зависимости для определения шероховатости заросших русел. Однако они не учитывают случайный характер распределения растительности вдоль откосов, влияние водорослей в средней части потока.

Рассмотрим определение гидравлических сопротивлений и шероховатости заросших русел каналов для общего случая с учетом береговой растительности и водорослей, а также случайного характера их распределения (Косиченко, 1997). Расчетная схема приведена на рисунке 2.1. Русло канала считаем призматическим, движение — равномерным.

Выделим в русле канала отсек жидкости, ограниченный двумя произвольными сечениями 1-1 и 2-2 на расстоянии l и площадью ω (заштрихованная область). На выделенный отсек действуют следующие силы: силы гидродинамического давления R , силы трения по боковой поверхности отсека T , касательная составляющая веса отсека G_s , сила

лобового сопротивления от растительности $P_{\text{лоб}}$, сила сопротивления от водорослей $F_{\text{вод}}$. Дополнительная сила сопротивления на границе зарослей растительности и свободного потока $F_{\text{гр}}$.

Запишем уравнение равновесия всех внешних сил, действующих на жидкость в выделенном отсеке, на направление движения (ось S)

$$P_1 - P_2 + G_s - T - F_{\text{лоб}} - F_{\text{гр}} - F_{\text{вод}} = 0. \quad (2.1)$$

Силы гидродинамического давления P_1 и P_2 , действующие на живое сечение потока в выделенном отсеке 1-2, находим как

$$P_1 = p_1 \omega \quad P_2 = p_2 \omega$$

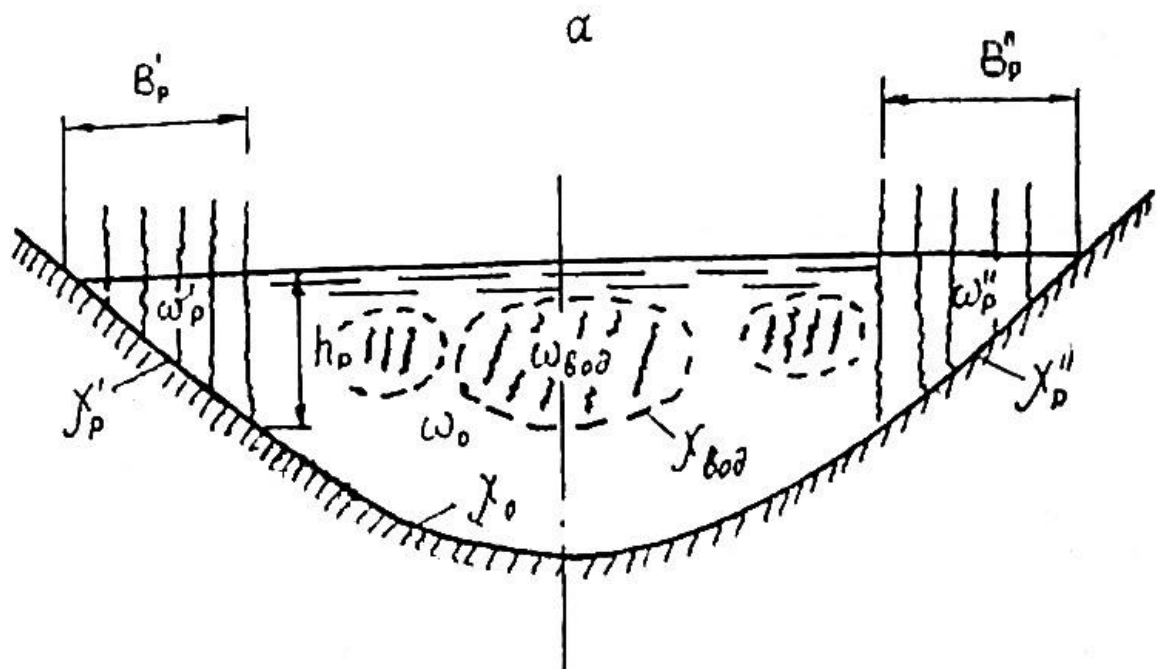


Рисунок 2.1 — Поперечное сечение заросшего русла

τ_0 – касательное напряжение трения свободной части русла

τ_p – касательное напряжение трения для зоны с растительностью

$\tau_{\text{вод}}$ – касательное напряжение трения для зоны водорослей.

Сила лобового сопротивления отдельного растения определяется по формуле (Беновицкой, 1988)

$$F'_{\text{лоб}} = \rho g C_d S_p \frac{V_p^2}{2g} \quad (2.6)$$

где

C_d – коэффициент лобового сопротивления растений;

$S_p = d \cdot h_p$ – площадь миделевого сечения;

d – средний диаметр тела растения;

h_p – средняя высота смоченной части растения;

V_p – средняя скорость потока в пределах зоны растительности.

Общая сила лобового сопротивления береговой растительности вычисляется по формуле

$$F_{\text{лоб}} = F'_{\text{лоб}} \cdot N \cdot B_p \cdot l \text{ при } v = N/F_0, \quad (2.7)$$

$$\text{или } F_{\text{лоб}} = F'_{\text{лоб}} \cdot N \cdot l \text{ при } v = N/l, \quad (2.7')$$

N – густота растений на единицу площади или единицу длины береговой полосы;

$B_p = B'_p + B''_p$ – ширина русла с растительностью;

v – интенсивность (частота) растительности.

Подставляя в (2.7) и (2.7') в выражение (2.6), будем иметь

$$F'_{\text{лоб}} = \rho g C_d \bar{d} N \omega_p \frac{V_p^2}{2g} l \quad (2.8)$$

$$F'_{\text{лоб}} = \rho g C_d \bar{d} N \bar{h}_p l \frac{V_p^2}{2g} \quad (2.9)$$

Так как растительность располагается на откосах канала произвольно и нерегулярно, учтем случайный характер распределения растительности. Полагая, что растительность вдоль береговой полосы распределяется в

соответствии с нормальным законом Гаусса, вероятность выражается зависимостью (Мирцхулава, 1974)

$$P_N = v_0 \exp \left[-\frac{(N-\bar{N})^2}{2\sigma_N^2} \right] \quad (2.10)$$

P_N — вероятность распределения растительности по нормальному закону;

v_0 — интенсивность (частота) распределения растений на единицу длины береговой полосы;

N — средняя густота растений на 1 м² или на 1 м береговой полосы;

G_N — среднеквадратичное отклонение густоты растений.

Из уравнения (2.10) получаем зависимость для установления расчетной густоты растений с учетом статистических параметров

$$N = \bar{N} \pm \sigma_N \sqrt{2 \ln \frac{v_0}{P_N}} \quad (2.11)$$

Подставляя в (2.8) или (2.9) вместо N выражение (2.11), получим зависимости для определения силы лобового сопротивления растительности с учетом случайного характера их распределения

$$F'_{\text{лоб}} = \rho g C_d \bar{d} N \omega_p \frac{V_p^2}{2g} l \left(\bar{N} \pm \sigma_N \sqrt{2 \ln \frac{v_0}{P_N}} \right), \quad (2.12)$$

$$F'_{\text{лоб}} = \rho g C_d \bar{d} N \bar{h}_p l \frac{V_p^2}{2g} \left(\bar{N} \pm \sigma_N \sqrt{2 \ln \frac{v_0}{P_N}} \right). \quad (2.13)$$

Дополнительная сила сопротивления на границе зарослей возникает вследствие обтекания растений потока и образования крупномасштабных вихрей, проникающих в поток и движущихся вместе с ним, а также в результате взаимообмена массами воды между потоком в свободной части русла и зарослях (Беновицкий, 1988) и определяется по формуле:

$$F_{\text{гр}} = \tau'_p \cdot h_p \cdot k, \quad (2.14)$$

$$\tau'_p = \rho g \frac{\lambda'_p}{4} \cdot \frac{V_0^2}{2g}, \quad (2.15)$$

h_p — глубина на границе зарослей;

k — число границ раздела (для обоих берегов $k = 2$).

Зависимость (2.14) с учетом (2.15) получит вид

$$F_{\text{гр}} = \rho g \frac{\lambda'_{\text{р}}}{4} \cdot \frac{V_0^2}{2g} \cdot h_{\text{р}} \cdot k \cdot l, \quad (2.16)$$

Силу сопротивления, оказываемую водорослями, найдем из соотношения

$$F_{\text{вод}} = \tau_{\text{вод}} \cdot \bar{h}_{\text{вод}} \cdot \bar{l}_{\text{вод}} \cdot \bar{N}_{\text{вод}} \cdot l, \quad (2.17)$$

где

$$\tau'_{\text{вод}} = \rho g \frac{\lambda'_{\text{вод}}}{4} \cdot \frac{V_0^2}{2g}, \quad (2.18)$$

$h_{\text{вод}}, l_{\text{вод}}$ – средняя высота и длина зоны водорослей;

$N_{\text{вод}}$ – среднее число водорослей в пределах отсека длиной l

Полагая, что распределение водорослей в пределах выбранного отсека соответствует закону редких явлений – закону Пуассона (Мирцхулаева 1974), среднее число зон водорослей найдем по зависимости

$$\bar{N}_{\text{вод}} = \ln \frac{(v_1 \omega_{\text{вод}})^m}{P_1 m!}, \quad (2.19)$$

v_1 – интенсивность (частота) зон водорослей;

$\omega_{\text{вод}}$ – площадь зон водорослей;

m – число интервалов водорослей (например, от одной до пяти зон $m=1$; от пяти до десяти зон $m=2$);

P_1 – вероятность распределения водорослей по закону Пуассона.

Подставляя зависимость (6.104) и (6.105) в (6.103) получим

$$F_{\text{вод}} = \rho g \frac{\lambda'_{\text{вод}}}{4} \cdot \frac{V_0^2}{2g} \cdot \bar{h}_{\text{вод}} \cdot l_{\text{вод}} \cdot l \cdot \ln \frac{(v_1 \omega_{\text{вод}})^m}{P_1 m!}, \quad (2.20)$$

Уравнение равновесия (2.1) теперь с учетом зависимостей для всех сил будет иметь вид

$$p_1 \omega - p_2 \omega + \rho g \omega (z_1 - z_2) - (\tau_0 \chi_0 + \tau_{\text{р}} \chi_{\text{р}} + \tau_{\text{вод}} \chi_{\text{вод}}) \times \\ \times l - \rho g C_{\text{д}} \bar{d} N \bar{h}_{\text{р}} l \frac{V_{\text{р}}^2}{2g} \left(\bar{N} \pm \sigma_N \sqrt{2 \ln \frac{\bar{v}_0}{P_N}} \right) - \rho g \frac{\lambda'_{\text{р}}}{4} \cdot \frac{V_0^2}{2g} \cdot h_{\text{р}} \cdot k \cdot l -$$

$$-\rho g \frac{\lambda'_{\text{вод}}}{4} \cdot \frac{V_0^2}{2g} \cdot \bar{h}_{\text{вод}} \cdot l_{\text{вод}} \cdot l \cdot \ln \frac{(v_1 \omega_{\text{вод}})^m}{P_1 m!} = 0 \quad (2.21)$$

$$\begin{aligned} (z_1 - z_2) - \frac{p_1}{\rho g} - \frac{p_2}{\rho g} + &= \frac{(\tau_0 \chi_0 + \tau_p \chi_p + \tau_{\text{вод}} \chi_{\text{вод}}) l}{\rho g \omega} + \\ + C_d \frac{\omega_p}{\omega} \frac{V_p^2}{2g} l \left(\bar{N} \pm \sigma_N \sqrt{2 \ln \frac{\bar{v}_0}{P_N}} \right) + &\frac{\lambda'_p}{4} \cdot \frac{V_0^2}{2g} \cdot \frac{h_p}{\omega} \cdot k \cdot l + \\ + \rho g \frac{\lambda'_{\text{вод}}}{4} \cdot \frac{V_0^2}{2g} \cdot \frac{\omega_{\text{вод}}}{\omega} \cdot l \cdot \ln &\frac{(v_1 \omega_{\text{вод}})^m}{P_1 m!} \end{aligned} \quad (2.22)$$

Составим уравнение Бернулли для сечений (1-1) и (2-2)

$$z_1 + \frac{p_1}{\rho g} - \frac{\alpha V_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\rho g} - \frac{\alpha V_2^2}{2g} + h_l l, \quad (2.23)$$

Учитывая, что при равномерном движении $V_1 = V_2$, из уравнения (2.22) получим

$$z_1 - z_2 + \frac{p_1}{\rho g} - \frac{p_2}{\rho g} = h_l, \quad (2.24)$$

Так как левые части уравнений (2.22) и (2.24) равны, то приравниваем их правые части. Откуда найдем

$$\begin{aligned} I = \frac{h_l}{l} = &\frac{(\tau_0 \chi_0 + \tau_p \chi_p + \tau_{\text{вод}} \chi_{\text{вод}})}{\rho g \omega} + C_d \bar{d} \frac{\omega_p}{\omega} \frac{V_p^2}{2g} \left(\bar{N} \pm \sigma_N \sqrt{2 \ln \frac{\bar{v}_0}{P_N}} \right) + \\ + \frac{\lambda'_p}{4} \cdot \frac{V_0^2}{2g} \cdot \frac{h_p}{\omega} \cdot k + &\frac{\lambda'_{\text{вод}}}{4} \cdot \frac{V_0^2}{2g} \cdot \frac{\omega_{\text{вод}}}{\omega} \cdot l \cdot \ln \frac{(v_1 \omega_{\text{вод}})^m}{P_1 m!}, \end{aligned} \quad (2.25)$$

Выразим гидравлический уклон из формулы Шези

$$I = \frac{V^2}{C^2 R} = \frac{V^2}{\left(\frac{1}{n} R^{1/6}\right)^2 R} = \frac{n^2 V^2}{R^{4/3}}, \quad (2.26)$$

а, также коэффициент гидравлического трения русла без растительности

$$\lambda_0 = \frac{8g}{C_0^2} = \frac{8g \cdot n_0^2}{R^{1/3}}, \quad (2.27)$$

Полагаем, что зависимости касательного напряжения трения от гидравлического сопротивления имеют вид

$$\frac{\tau_0}{\rho g} = \frac{\lambda_p}{4} \cdot \frac{V_0^2}{2g}, \quad (2.28)$$

$$\frac{\tau_p}{\rho g} = \frac{\lambda_0}{4} \cdot \frac{V_p^2}{2g}, \quad (2.29)$$

$$\frac{\tau_{\text{вод}}}{\rho g} = \frac{\lambda_0}{4} \cdot \frac{V_{\text{вод}}^2}{2g}, \quad (2.30)$$

Подставляя соотношения (2.26), (2.28 – 2.30) в уравнение (2.25), получим

$$\begin{aligned} \frac{n^2 V^2}{R^{\frac{4}{3}}} = & \frac{\lambda_0}{4} \cdot \frac{1}{\omega} \left(\chi_0 \cdot \frac{V_0^2}{2g} + \chi_p \cdot \frac{V_p^2}{2g} + \chi_{\text{вод}} \cdot \frac{V_{\text{вод}}^2}{2g} \right) + \\ & + C_d \bar{d} \frac{\omega_p}{\omega} \frac{V_p^2}{2g} \left(\bar{N} \pm \sigma_N \sqrt{2 \ln \frac{\bar{v}_0}{P_N}} \right) + \frac{\lambda_p}{4} \cdot \frac{V_0^2}{2g} \times \\ & \times \frac{h_p}{\omega} \cdot k + \frac{\lambda'_{\text{вод}}}{4} \cdot \frac{V_0^2}{2g} \cdot \frac{\omega_{\text{вод}}}{\omega} \cdot \ln \frac{(v_1 \omega_{\text{вод}})^m}{P_1 m!}, \end{aligned} \quad (2.31)$$

Используя выражение для λ_0 (2.27), уравнение (2.31) запишем в виде

$$\begin{aligned} n^2 = n_0^2 \frac{R}{\omega} \left[\chi_0 \cdot \left(\frac{V_0}{V} \right)^2 + \chi_p \cdot \left(\frac{V_p}{V} \right)^2 + \chi_{\text{вод}} \cdot \left(\frac{V_{\text{вод}}}{V} \right)^2 \right] + \\ + \frac{R^{\frac{4}{3}}}{2g\omega} \left[C_d \bar{d} \frac{\omega_p}{\omega} \frac{V_p^2}{2g} \left(\bar{N} \pm \sigma_N \sqrt{2 \ln \frac{\bar{v}_0}{P_N}} \right) + \frac{\lambda_p}{4} h_p k \left(\frac{V_0}{V} \right)^2 + \right. \\ \left. + \frac{\lambda'_{\text{вод}}}{4} \cdot \omega_{\text{вод}} \cdot \left(\frac{V_0}{V} \right)^2 \cdot \ln \frac{(v_1 \omega_{\text{вод}})^m}{P_1 m!} \right], \end{aligned} \quad (2.32)$$

где

n_0 — коэффициент шероховатости;

χ_0 — смоченный периметр;

V_0 — и средняя скорость русла без растительности.

Общий вид зависимости для вычисления коэффициента шероховатости заросшего русла канала с учетом замены $R/\omega = 1/\chi$ будет

$$n = n_0 \sqrt{\chi_0 \cdot \left(\frac{V_0}{V} \right)^2 + \chi_p \cdot \left(\frac{V_p}{V} \right)^2 + \chi_{\text{вод}} \cdot \left(\frac{V_{\text{вод}}}{V} \right)^2 +}$$

$$+ \frac{R^{\frac{4}{3}}}{2g\omega} \left[C_d \bar{d} \frac{\omega_p}{\omega} \frac{V_p^2}{2g} \left(\bar{N} \pm \sigma_N \sqrt{2 \ln \frac{\bar{v}_0}{P_N}} \right) + \frac{\lambda_p}{4} h_p k \left(\frac{V_0}{V} \right)^2 + \right. \\ \left. + \frac{\lambda'_{вод}}{4} \cdot \omega_{вод} \cdot \left(\frac{V_0}{V} \right)^2 \cdot \ln \frac{(v_1 \omega_{вод})^m}{P_1 m!} \right], \quad (2.33)$$

Полагая, что $V_p/V \approx 0$, $V_{вод}/V \approx 0$, $V_0/V \approx \omega/\omega_0$, получим приближенную зависимость для оценки коэффициента шероховатости заросшего русла канала

$$n = n_0 \sqrt{\frac{\chi_0}{\chi} \left(\frac{\omega}{\omega_0} \right) + \frac{R^{\frac{4}{3}}}{2g\omega} \left[k \frac{\lambda_p}{4} \cdot \frac{h_p}{\omega} \left(\frac{\omega}{\omega_0} \right)^2 + \right. \\ \left. + \frac{\lambda'_{вод}}{4} \cdot \frac{\omega_{вод}}{\omega} \left(\frac{\omega}{\omega_0} \right)^2 \cdot \ln \frac{(v_1 \omega_{вод})^m}{P_1 m!} \right]}, \quad (2.34)$$

При полном зарастании русла и отсутствии водорослей (когда $\chi_0 = 0$, $\chi_p = \chi$, $\lambda'_p = 0$, $\lambda'_{вод} = 0$, $V_p = V$ зависимость для коэффициента шероховатости имеет вид:

$$n = n_0 \sqrt{1 + \frac{R^{\frac{4}{3}}}{2g\omega} \left[C_d \bar{d} \left(\bar{N} \pm \sigma_N \sqrt{2 \ln \frac{\bar{v}_0}{P_N}} \right) \right]}, \quad (2.35)$$

Пренебрегая единицей в выражении (2.35), для практических расчетов можно использовать формулу

$$n = \sqrt{\frac{R^{\frac{4}{3}}}{2g\omega} \left[C_d \bar{d} \left(\bar{N} \pm \sigma_N \sqrt{2 \ln \frac{\bar{v}_0}{P_N}} \right) \right]}, \quad (2.36)$$

которая без учета случайного характера распределения растительности совпадает с известной зависимостью (Беновицкий, 1988)

$$n = \sqrt{C_d \bar{d} \frac{R^{\frac{4}{3}}}{2g\omega} N}, \quad (2.37)$$

В случае наличия в русле канала только водорослей без береговой полупогруженной растительности, что имеет место, например, в бетонных

руслах каналов, расчетная формула приобретает следующий вид

$$(\chi_0 = \chi, V_0/V \approx \omega/\omega_0, V_{\text{вод}}/V \approx 0)$$

$$n = \frac{n_0}{\omega_0/\omega} \sqrt{1 + \frac{R^{\frac{4}{3}}}{2g \cdot n_0^2} \cdot \frac{\lambda'_{\text{вод}}}{4} \cdot \frac{\omega_{\text{вод}}}{\omega} \ln \frac{(v_1 \omega_{\text{вод}})^m}{P_1 m!}}, \quad (2.38)$$

В случае полного отсутствия растительности и водорослей, как следует из зависимостей (2.35) и (2.38), так и из формулы (2.33), они приводятся к уравнению типа $n = n_0$, что свидетельствует о правильности структуры этих формул.

В случае хаотично заросшего русла без водорослей, полагая

$$\omega_0 = \omega - \omega_p,$$

$$\chi_0 = \chi - \chi_p$$

и пренебрегая малыми величинами, из уравнения (2.33) найдем отношение коэффициентов шероховатости

$$\begin{aligned} \frac{n}{n_0} = \frac{1}{1 - \omega_p/\omega} \sqrt{1 - \frac{\chi_p}{\chi} + k \frac{\lambda_p}{4} \cdot \frac{h_p}{\omega} +} \\ + \frac{(1 - \omega_p/\omega)^2 R^{\frac{4}{3}} \omega_p/\omega}{2g \cdot n_0^2} C_d \bar{d} \left(\frac{V_p}{V} \right)^2 \cdot \left(\bar{N} \pm \sigma_N \sqrt{2 \ln \frac{v_0}{P_N}} \right), \end{aligned} \quad (2.39)$$

Найдем теперь зависимость для определения коэффициента гидравлических сопротивлений полностью заросшего русла λ , используя уравнение (2.36), где представим

$$n = \sqrt{\frac{\lambda R^{\frac{1}{3}}}{8g}}, \quad (2.40)$$

Тогда

$$\lambda = 4C_d \bar{d} R \left(\bar{N} \pm \sigma_N \sqrt{2 \ln \frac{v_0}{P_N}} \right), \quad (2.41)$$

Гидравлические сопротивления частично заросшего русла с наличием водорослей в пределах живого сечения потока получим из (2.34)

$$\lambda = \frac{8g \cdot n_0^2}{R^{\frac{1}{3}}} \cdot \frac{X_0}{\chi} \left(\frac{\omega}{\omega_0} \right)^2 + 4R \left[k \frac{\lambda_p}{4} \cdot \frac{h_p}{\omega} \left(\frac{\omega}{\omega_0} \right)^2 + \right.$$

$$+\frac{\lambda'_{\text{вод}}}{4} \cdot \frac{\omega_{\text{вод}}}{\omega} \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2 \ln \frac{(\bar{v}_1 \omega_{\text{вод}})^m}{P_1 m!} \Big], \quad (2.42)$$

Для определения коэффициента гидравлического сопротивления водорослей $\lambda'_{\text{вод}}$ воспользуемся результатами натурных исследований распределительного канала в бетонном русле Бг-Р-7 (Косиченко, 1993).

Значения $\lambda'_{\text{вод}}$ найдем из уравнения (2.95).

$$\lambda'_{\text{вод}} = \frac{\lambda_0}{R\omega_{\text{вод}}/\omega \bar{N}_{\text{вод}}} \left[\left(\frac{n}{n_0} \cdot \frac{\omega}{\omega_0} \right)^2 - 1 \right], \quad (2.43)$$

Результаты расчета приведены в таблице 2.1

Таблица 2.1– Значения коэффициентов гидравлического сопротивления $\lambda'_{\text{вод}}$ по данным натурных наблюдений распределительного канала Бг-Р-7

Пикет	$\omega, \text{ м}^2$	R, м	$\frac{n}{n_0}$	λ_0	$\frac{\omega_{\text{вод}}}{\omega}$	$\lambda'_{\text{вод}}$
ГК-56	13,6	1,27	$\frac{0,0354}{0,0157}$	0,0179	0,20	0,158
ГК-189	5,6	0,76	$\frac{0,369}{0,0157}$	0,0212	0,20	0,354

Среднее значение $\lambda'_{\text{вод}} = 0,256$.

Используя зависимости для вычисления коэффициента шероховатости заросших русел (2.36) и (2.35), найдем выражения для средней скорости потока, исходя из формулы Шези для равномерного движения

$$V = \frac{R^{2/3} I^{1/2}}{n}, \quad (2.44)$$

Тогда подставляя (2.36) и (2.35) в (2.44), будем иметь для полностью заросшего русла

$$V = \sqrt{I / \left[C_d \frac{\bar{d}}{2g} \left(\bar{N} \pm \sigma_N \sqrt{2 \ln \frac{v_0}{P_N}} \right) \right]}, \quad (2.45)$$

для частичного заросшего русла

$$V = \sqrt{I \left\{ \frac{n_0^2}{R^{\frac{1}{3}}} \cdot \frac{X_0}{\chi} \left(\frac{\omega}{\omega_0} \right)^2 + \frac{1}{2g} \left[k \frac{\lambda_p}{4} \cdot \frac{h_p}{\omega} \left(\frac{\omega}{\omega_0} \right)^2 + \right. \right.}$$

$$+ \frac{\lambda'_{\text{вод}}}{4} \cdot \frac{\omega_{\text{вод}}}{\omega} \left(\frac{\omega}{\omega_0} \right)^2 \ln \frac{(\bar{V}_1 \omega_{\text{вод}})^m}{P_1 m!} \Bigg\}, \quad (2.46)$$

Для анализа изменчивости отношений коэффициентов шероховатости заросшего (водной растительностью или водорослями) и не заросшего русел n / n_0 произведем расчеты при следующих данных:

1) для русла заросшего растительностью:

$$h_p = 1 \text{ м};$$

$$\omega = 24 \text{ м}^2;$$

$$R = 1 \text{ М};$$

$$n = 0,0225;$$

$$\bar{d} = 0,01 \text{ м};$$

$$\bar{N} = 100 \text{ шт/м}^2;$$

$$B_N = 0,1;$$

$$N = 10 \text{ шт/м}^2;$$

$$C_d = 0,5;$$

$$k = 0,5;$$

$$P_N = 0,9,$$

по данным Э. Л. Беновицкого также принимаем $k'_p = 0,30$ и $V_p/V = 0,01$

Определение n / n_0 производим для различных соотношений площадей $\omega_p / \omega = (0,2; 0,4; 0,6; 0,9; 1,0)$ при частичном зарастании русла – по формуле (2.38), при полном зарастании – по формуле (2.35). Результаты расчета сведены в таблицу 2.2.

2) для русла покрытого только водорослями;

$$n_0 = 0,0157;$$

$$R = 1,27 \text{ м};$$

$$\omega = 13,6 \text{ м}^2;$$

По результатам обработки натурных данных гидравлических сопротивлений бетонных русел, приведенных выше в таблице 2.1, принимаем

$$\lambda'_{\text{вод}} = 0,25;$$

$$m = 4;$$

$$\bar{v}_1 = 1.$$

Расчет изменения n/n_0 производим для соотношения площадей $\omega_0 = (0,2; 0,4; 0,6; 0,9)$ по формуле (2.38). Результаты расчета сведены в таблицу 2.2.

Таблица 2.2– Изменчивость отношений коэффициентов шероховатости заросших русел n/n_0 .

Характер зарастания русел	$\frac{\omega_p}{\omega}$	$\bar{N}$, шт/м ²	λ'_p	$\frac{n}{n_0}$
сводной растительностью	0,2	100	0,3	1,12
	0,4			1,29
	0,6			1,58
	0,9			3,18
	1			8,13
с водорослями	$\frac{\omega_{\text{вод}}}{\omega}$	$\bar{v}_1 = \overline{N_{\text{вод}}}$ шт/м ²	$\lambda'_{\text{вод}}$	$\frac{n}{n_0}$
	0,2	1	0,25	2,57
	0,4			8,65
	0,6			18,86
	0,9			15,2

Анализ данных в таблице 2.2 показывает, что при степени зарастания водной растительностью $\omega_p/\omega < 0,4$ фактический коэффициент шероховатости заросшего русла по отношению к коэффициенту шероховатости заросшего русла изменяется несущественно, однако при $\omega_p/\omega > 0,6$ он резко возрастает и может превысить коэффициент шероховатости не заросшего русла в 8-10 раз.

Влияние водорослей на коэффициент шероховатости не заросшего русла гораздо ощутимее: при $\omega_{\text{вод}}/\omega > 0,2$ фактический коэффициент шероховатости начинает уже существенно изменяться (более чем в 2,5 раза), а при $\omega_{\text{вод}}/\omega > 0,4$ он увеличивается по сравнению с не заросшим руслом более, чем в 10-100 раз.

Отмеченные обстоятельства позволяют рекомендовать учитывать зарастаемость русла береговой водной растительностью при определении фактических коэффициентов шероховатости русел каналов только для достаточно высокой степени зарастаемости сечения, превышающей 40 %, а в

случае образования водорослей – даже при малой степени зарастаемости(более 10-20 %).

С целью выявления степени влияния учета случайного характера распределения растительности рассмотрим результаты расчета отношения n/n_0 для полностью заросшего русла при различных значениях

$$N = 1; 5; 10; 30; 100; 200 \text{ шт/м}^2$$

$$\text{для } n_0 = 0,0225,$$

$$R = 1 \text{ м},$$

$$d = 0,01 \text{ м}.$$

Таблица 2.3– Значения отношений коэффициентов шероховатости заросших русел n/n_0 в зависимости от густоты растительности

$\bar{N}$, шт/м ²	n/n_0	
	С учетом случайного характера (нормальное распределение)	Без учета случайного характера (равномерное распределение)
1	1,23	1,22
5	1,99	1,87
10	2,66	2,44
30	4,46	3,99
50	5,75	5,09
100	8,14	7,13
200	11,56	10,04

Из представленных данных в таблице 2.3 видно, что случайный характер распределения растительности существенно сказывается на результатах определения n/n_0 (в данном примере) при густоте растительности $N > 10$ шт/м². При $N < 10$ шт/м² это влияние пренебрежимо мало (не более пяти – десяти процентов), а, следовательно в этом случае можно пренебречь случайным характером распределения растительности и условно полагать ее распределение равномерным.

Таким образом, проведенные расчеты свидетельствуют, что учет случайного характера распределения растительности и влияния сопротивления от плавающих в русле водорослей, в большинстве случаев позволяет уточнить определяемые значения коэффициентов шероховатости

заросших русел, а, следовательно, их пропускную способность или гидравлическую эффективность. Вместе с тем, следует отметить, что на данной стадии исследования, вопросы определения гидравлических сопротивлений от жесткой береговой растительности (камыш, тростник, рогоз) и плавающих в средней чаше русла сине-зеленных водорослей (фитобентоса, микрофитобентоса) недостаточно изучены. Необходима также постановка специальных исследований по уточнению закономерностей распределения растительности и их статистических параметров с помощью методов теории вероятностей и математической статистики, которые в данной работе нами приняты априорно. По-видимому, такие исследования должны проводиться главным образом в натурных условиях.[26]

3 Эксперименты в русловой лаборатории

Все эксперименты проводились в русловой лаборатории Российского государственного гидрометеорологического университета. В нем находятся отличные исследовательские объекты, в том числе большой выбор лотков. Лаборатория оснащена приборами для измерения расхода, скоростей потока.

3.1 Описание лабораторной установки

Все эксперименты проводились в лотке, моделирующем изгиб русла.



Рисунок 3.1 – Вид лотка

Лоток имеет прямое, прямоугольное сечение, ... м в длину и 37 см в ширину. Поворот русла – 180 градусов.

Для проведения эксперимента использовался прямолинейный участок лотка

Поток течет в большой резервуар ниже по потоку и повторно циркулирует в верхний коллекторный бак через 6-дюймовую трубу с расходом потока до 20 л/с. Расход измеряется на контрольном водосливе Томсона с помощью шпигенмасштаба.



Рисунок 3.2 – Контрольный водослив

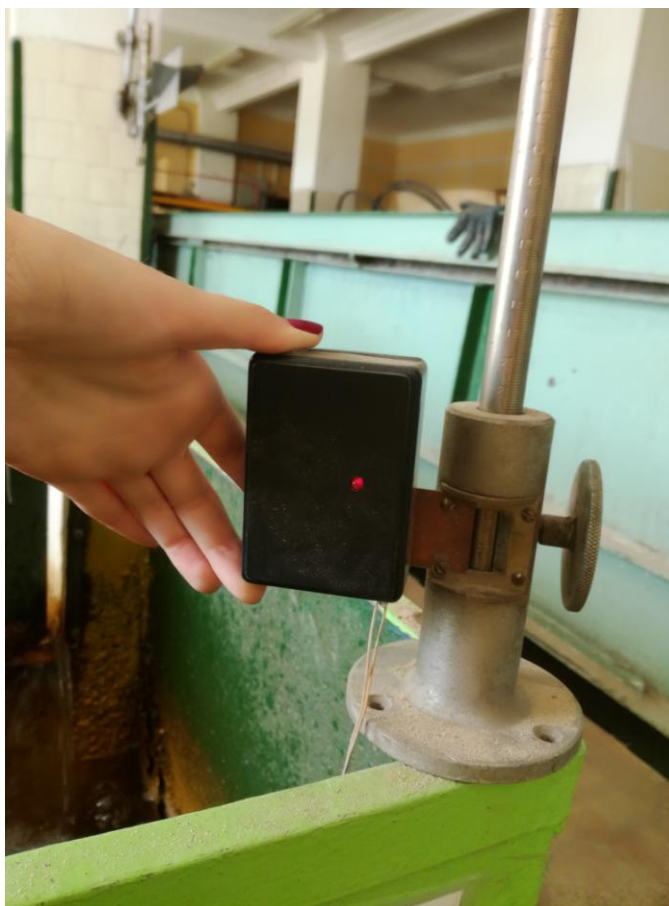


Рисунок 3.3 Шпигенмасштаб

3.2 Характеристики растительности

Для экспериментов в основном использовали водоросли для аквариумов вида *Cryptocoryneponerifolia* (рис. 3.4). Длина листьев 6-8 см.

Растения высаживались в нужном порядке на дне лотка в песок.



Рисунок 3.4 – *Cryptocoryneponerifolia*.

3.2.2 Характеристики растительности

Элементы растений, используемые для экспериментов, анализировались по геометрическим размерам. Для каждого растения были получены следующие характеристики: количество стеблей, высота H_v , ширина w и толщина t каждого стебля.

Одно растение травяного слоя с 16 стволами.

Рисунок 27: Метод измерения геометрии искусственной травы.

В таблице 3 показано среднее μ , стандартное отклонение σ и коэффициент вариации C_v геометрических характеристик стеблей.

Таблица 3.1 Характеристики растительности.

N	Кол-во стеблей	Высота см	ширина мм	толщина
				мм
1	1	8	0.1	1
	2	11.5	0.1	1
2	1	8.2	0.1	1
	2	10.6	0.1	1.2
	3	12.8	0.1	1.3
	4	14.5	0.1	1.5
3	1	7	0.1	0.9
	2	7.3	0.1	1
	3	13.9	0.1	1.1
4	1	8	0.1	1
	2	13.3	0.1	1.1
	3	14.1	0.1	1.1
	4	13.5	0.1	1.1
	5	15.5	0.1	1.1
5	1	6.3	0.1	1
	2	9.2	0.1	1
	3	9.6	0.1	1
	4	11.4	0.1	1.1
	5	11.2	0.1	1
6	1	8.1	0.1	0.9
	2	10.1	0.1	1
	3	12.2	0.1	1
	4	15	0.1	1.1
	5	19	0.1	1.2
7	1	6.9	0.1	1
	2	8.2	0.1	1
	3	8.5	0.1	1
	4	12	0.1	1
8	1	10.5	0.1	1
	2	11	0.1	1
	3	11	0.1	1
	4	13.5	0.1	1
	5	14.5	0.1	1
9	1	6.2	0.1	0.9
	2	6.6	0.1	0.9
	3	12.5	0.1	1
10	1	7.1	0.1	0.9
	2	9.6	0.1	0.9
	3	10.1	0.1	0.9
	4	11.1	0.1	0.9
μ	4	10.7	0.1	1,028
C_v	0.26	0.28	0	0.11
σ	1,054	3,0	0	0,118

Также была измерена плотность купола в единицах M_p и стеблей M_s на квадратный метр. Подсчитав количество растений на квадрате со стороны

(0,1 м • 0,1 м), было получено среднее число $M_p = 15200$ растений / м². Позднее было подсчитано количество стеблей на квадратный метр, M_s , путем умножения среднего числа растений на среднее число стеблей, как указано в уравнении 29:

Плоская плотность A_w представляет собой площадь поверхности увлажненной поверхности травы на квадратный метр и, таким образом, описывается как количество стеблей на квадратный метр, умноженное на площадь поверхности обеих сторон стеблей:

3.3 Результаты экспериментов

Таблица 3.2 Диапазон значений гидравлических параметров.

Q	u	$v (*10^{-5})$	h _{cp}	Re	R	l	n	f	C
0.0011	0.191	9.45	0.0188	3788	0.0174	0.0014	0.0131	0.052	38.74
0.0011	0.042	9.29	0.0188	846	0.0174	0.0014	0.0598	1.084	8.51
0.0034	0.270	9.27	0.0340	9894	0.0311	0.0014	0.0137	0.047	40.90

Параметры сопротивления потока как функция числа reynolds

Основные параметры гидравлического сопротивления Дарси-Вейсбаха f , Chezy's C и Manning's n были построены как функция числа Рейнольдса Re . Эти графики показаны соответственно на рисунках 3.5, 3.6 и 3.7.

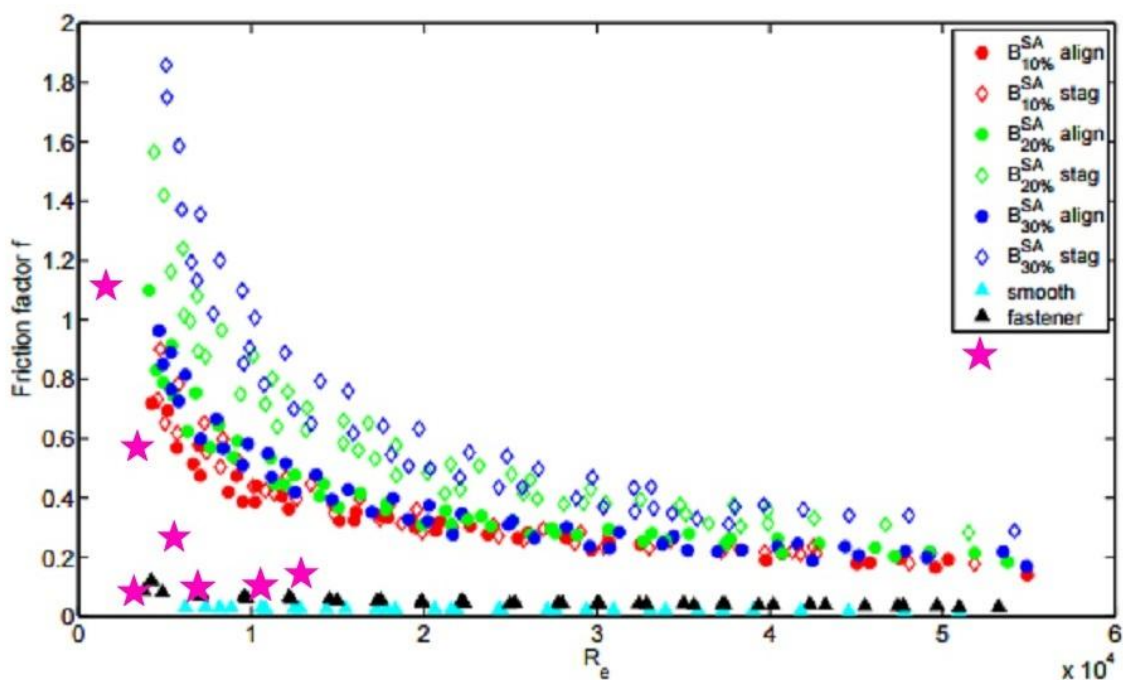


Рисунок 3.5 $f = F(Re)$

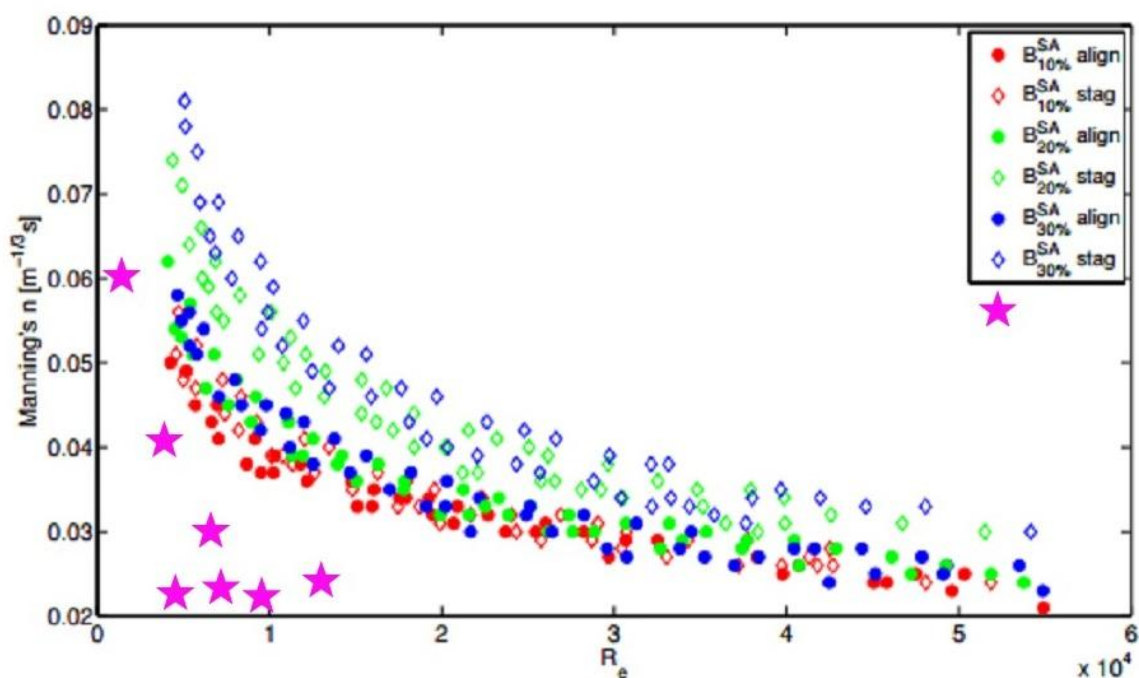


Рисунок 3.5 $n = F(Re)$

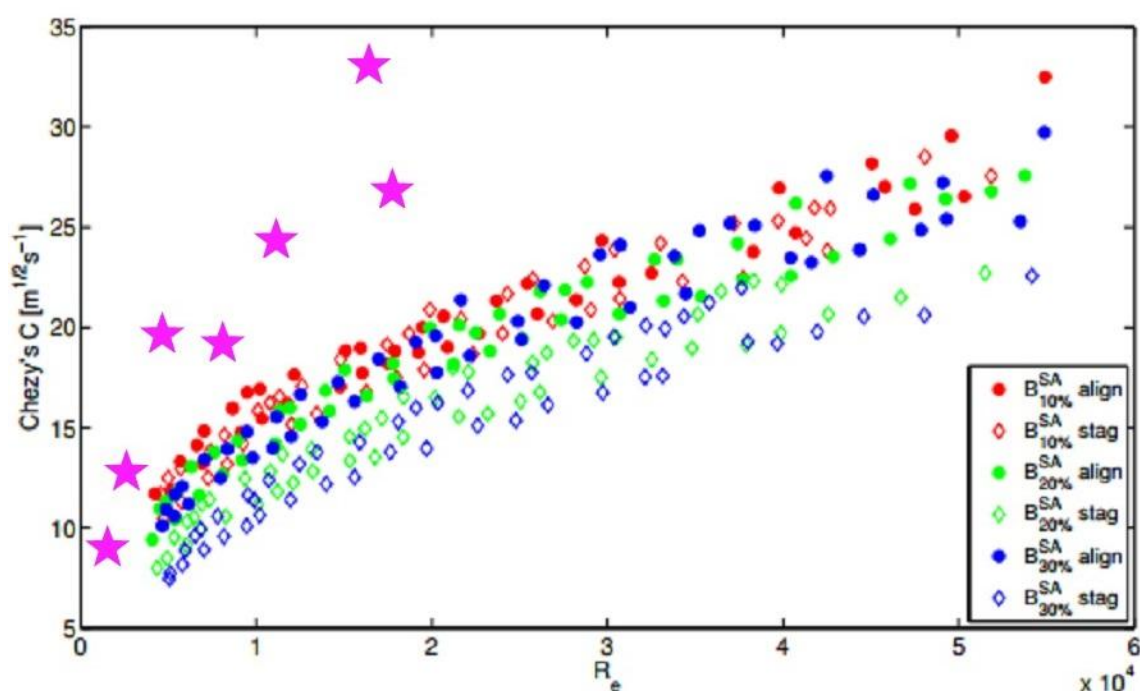


Рисунок 3.5 $C = F(Re)$

Инжир. 43 показаны зависимости $f = F(Re)$, найденные в предварительных экспериментах с гладким слоем и с крепежным слоем. Сводная таблица параметров усредненного сопротивления течению в случае слоя плавного слоя и слоя застежки приведена в таблице 9.

Таблица 9: Усредненные значения гидравлических параметров с гладким слоем и слоем крепежа на слое.

Сравнивая коэффициент трения, связанный с растительностью с той, которая связана с крепежным слоем, рис. 43 показывает, что первый много больше другого. Инжир. 43 показывает также, что коэффициенты трения, обусловленные наличием слоя застежки и коллапса плавного слоя в той же тенденции. Таким образом, грибная застежка, которая использовалась для прикрепления пятен растительности на дне, можно рассматривать как гладкую поверхность.

4 Наблюдения за водным режимом на р. Оредеж

4.1 Физико-географическое положение р. Оредеж

4.1.1 Рельеф и геологическое строение

Река Оредеж является правым притоком реки Луги, которая относится к бассейну Балтийского моря. Бассейн Балтийского моря расположен между $67^{\circ}40' - 55^{\circ} 36' \text{ с. ш}$ и $27^{\circ}20' - 37^{\circ}57' \text{ в. д.}$ и занимает площадь 396 тыс. км².

По характеру геологического и геоморфологического строения территория разделяется на две области: Карелия и Северо-Запад. Нас будет интересовать Северо-западная часть этой территории, которая в свою очередь разделяется на:

- северо-западную – низменную,
- восточную, юго-восточную и южную – возвышенную.

Северо-западная часть расположена в основном в пределах Прибалтийской низменности, уходящей на западе на территорию Эстонии и Латвии, а на севере и северо-востоке – в Карелию.

Прибалтийская низменность – довольно однообразная слабоволнистая равнина, на которой отчетливо выделяется ряд возвышенностей и понижений.

Возвышенная часть территории Северо-Запада расположена в пределах Валдайской возвышенности, которая широкой дугой окаймляет Прибалтийскую низменность и тянется от восточного побережья Онежского озера до г. Великие Луки, переходя далее на территорию Белоруссии и Литвы.

Территория Северо-Запада расположена почти целиком в пределах Русской платформы и сложена комплексом осадочных дочетвертичных отложений, залегающих под четвертичными на архейском или протерозойском кристаллическом основании. Лишь самая северная окраина территории - север Карельского перешейка- относится к южной оконечности Балтийского щита и сложена древнейшими кристаллическими породами

архейско-протерозойского комплекса, представленного различного рода гнейсами и сланцами[27].

4.1.2 Почвенный покров

Основными процессами почвообразования являются подзолообразование и заболачивание, что обусловлено положением территории в зоне с холодным, влажным климатом, а также преобладанием лесной, преимущественно хвойной растительности.

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

Оттаивание почвы, как правило, происходит сверху и идет сначала медленно, до схода снежного покрова, а затем быстро под влиянием солнечных лучей, на болотах почва может быть промерзаний и летом[9].

4.1.3 Растительность

Рассматриваемая территория расположена преимущественно в пределах таежной зоны.

Таежные полосы представлены следующими типами растительности:

- еловые леса;
- сосновые леса;
- сфагновые торфяно-осоковые и кустарниковые болота совершенно не облесённые или с редкостной сосной.

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

4.1.4 Климат

Средняя годовая температура воздуха на территории Северо-Запада колеблется от 2 °С в северо-восточной части до 4,5 °С в южной.

Самыми холодными месяцами в году являются январь и февраль, самым же теплым месяцам – июль.

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

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

Ветровой режим зависит от общей циркуляции атмосферы и тесно связан с особенностями распределения барических центров, находящихся вокруг районов. На рассматриваемой территории в течении года преобладают ветры южного, юго-западного и западного направления.

Величина испарения является одним из основных расходных элементов водного баланса, на который в условиях Северо-Запада затрачивается 50-70% атмосферных осадков, поступающих на поверхность водосбора[27].

4.1.5 Описание реки Оредеж и участка наблюдений

Река Оредеж берет начало из Кикеренских болот и протекает в северо-восточном направлении, сильно меандрирует. Впадение реки Оредеж в реку Лугу происходит на 194 км от устья последней. Длина реки 201 км, общая площадь водосбора 3400 км². Площадь водосбора в районе наблюдений составляет 192 км².

Отметка истока – 112,6 м БС, устья – 31,6 м БС, в результате общее падение реки составляет 81 м.

Прилегающая местность – слабо холмистая на юго-восточном склоне Ижорской возвышенности, покрытая сельскохозяйственными угодьями и смешанными лесами.

Долина реки неясно выражена. В районе проведения работ долину реки можно отнести к V-образной форме. Преобладающая ширина долины

сто пятьдесят – двести метров, наибольшая – полтора километра у с. Рыбицы и наименьшая – десять метров у деревни Даймище.

Русло на всем протяжении зарастает. Дно песчаное с отдельными валунами, подвержено незначительной деформации за счет перемещения песчаных гряд. Имеются небольшие острова. Пойменная терраса местами заболочена. Коренные берега в основном пологие, но местами крутые обрывистые. Ширина реки меняется от 15 до 30 м. Средняя глубина 1,0-1,5 м. Преобладающие скорости течения на плесах 0,2-0,3 м/с, на перекатах до 1 м/с.

Река Оредеж зарегулирована плотинами, которые в настоящее время не эксплуатируются.

Питание происходит за счет притока грунтовых вод и инфильтрации атмосферных осадков.

В течение суток колебания уровня воды незначительны, но во время обильных дождей уровень резко повышается, что вызывает затопление поймы. Уровни весеннего половодья выше меженных на один – два метра в верхнем и среднем течении.

В осенний период с началом ледостава на реке Оредеж наблюдается сало, на мелководных участках образуется донный лед. Температурный режим воды нарушен вследствие карстового питания и истока из озера.

Зимняя межень начинается обычно в начале декабря и отличается тем, что весь сток осуществляется за счет запасов грунтовых вод. Но возможные паводки, вызванные таянием снега, при оттепелях нарушают порядок питания в зимнюю межень. Зимние минимальные расходы воды, как правило, являются наименьшими в году.

Средняя толщина льда на реке в конце зимы составляет 20-25 см, максимальная 50 см. В особо холодные зимы река промерзает, в теплый устойчивый ледостав на реке не бывает. Вскрытию предшествует подвижка льда.

Испарение с поверхности суши годовое – 435 мм; с водной поверхности – 552 мм.

Высота снега в поле средняя за зиму около 45 см, максимальная— 71 см, минимальная— 19 см. В леса средняя— 36 см, максимальная— 63 см, минимальная — 14 см, но бывают зимы, когда снега практически нет. Годовые осадки могут достигать 708 мм.

Водомерный пост и гидрологические створы были оборудованы на прямолинейном участке р.Оредеж. Правый берег представляет собой широкую плоскую пойму шириной до 200 м, поросшую кустарником и луговой растительностью. Коренной берег обрывистый. Левый берег более крутой, густо заросший кустарником и лесом. Река на участке наблюдений имеет ширину 20-25 м, средняя глубина 1,0-1,2 м.

4.1.6 Характеристика высшей водной флоры реки Оредеж

Высшие водные растения верховий реки Оредеж составляют двадцать девять видов, относящихся к двадцати трем родам, распределенным между восемнадцать семействами. Они являются представителями трех классов и двух отделов высших сосудистых растений.

Представителем класса хвощевидных наиболее древнего отдела папоротникообразных является один вид - хвощ речной. Отдел Голосеменных, виды которого играют решающую роль в сложении растительного покрова таежной зоны (ель и сосна) полностью отсутствует среди водных растений.

Отдел покрытосеменных представлен в водной флоре видами двух классов: класс Однодольных насчитывает девятнадцать видов, а класс Двудольных - девять видов. Наиболее крупным родом является Рдест, который содержит пять видов, произрастающих в районе исследования.

Род Осока представлена тремя видами прибрежно-водных растений (несомненно, количество видов этого рода, произрастающих по берегам Оредежа. 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. Остальные

семейства содержат по одному виду. Подавляющее большинство семейств содержит по роду, а по два рода содержится в семействах Водокрасовые, Злаковые, Осоковые и Лютиковые. Почти все представители водной флоры являются многолетними растениями, исключение составляет лишь один вид - болотник болотный, который является однолетним растением.

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, шелковникнеукореняющийся, вероника ключевая. Эти виды в Оредеже не являются редкими, что, по-видимому, связано с особым химическим составом его воды.

Как лекарственные растения в народной медицине используются хвощ речной (мочегонное), 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.

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.

Декоративными растениями являются сусак зонтичный, водокрас лягушачий, лютик длиннолистный, 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 длиннолистный.

4.1.7 Причины интенсивного зарастания русла реки Оредеж

Оредеж имеет затопленную, из-заподпора, вызванного плотинами, пойму. На ней созданы хорошие условия для развития растений, так как пойма является достаточно эвтрофным участком речной долины из-за большого количества органики за счет отложения речных илов на ней. При затоплении поймы, растительностям произрастающая (двукисточник тростниковый, незабудка болотная, вероника ключевая, лютик длиннолистный) образует водные формы, а хорошо удобренный грунт способствует бурному развитию рдестов и кубышек (истинно водных растений), что приводит к еще большей эвтрофикации.

На процесс зарастания также влияет сброс сточных вод, а, так же, попадание минеральных удобрений в реку в связи с их использованием на полях.

Бурное развитие высших водных растений сопровождается развитием водорослей (в частности нитчаток), поселяющихся на подводных стеблях высших водных растений. 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 данной зоне является односторонне направленным процессом, поэтому развитие водной растительности Оредежа будет продолжаться (если не будет антропогенного воздействия). 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 воду кислородом и очищая ее от избытка солей, которые откладываются на их стеблях.

4.2 Наблюдения за водной растительностью

На реке Оредеж несколько лет ведутся наблюдения за водной растительностью с помощью различной фото и видео техники (квадрокоптеры...).

Участком съемки является ...

Заклучение

