



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 **Влияние глубин и формы**  
**сечения на гидравлическое со-**  
**противление речных русел.**

Исполнитель \_\_\_\_\_ Фатхетдинова Наиля Фоатовна  
(фамилия, имя, отчество)

Руководитель \_\_\_\_\_ Доктор географических наук, профессор  
(ученая степень, ученое звание)  
Барышников Николай Борисович  
(фамилия, имя, отчество)

«К защите допускаю»  
Заведующий кафедрой

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

*«27» сентября 2017г.*

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 **Влияние глубин и формы  
сечения на гидравлическое со-  
противление речных русел.**

Исполнитель Фатхетдинова Наиля Фоатовна  
(фамилия, имя, отчество)  
Руководитель Доктор географических наук, профессор  
(ученая степень, ученое звание)  
Барышников Николай Борисович  
(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

## Содержание

Введение.....	3
1. Гидравлические сопротивления русел простых форм сечения.....	6
1.1 Общие положения. ....	7
1.2 Методы оценки гидравлических сопротивлений .....	11
1.3 Формулы для расчётов коэффициента Шези. ....	16
1.4 Влияние формы сечения на гидравлические сопротивления речных русел .....	23
2 Гидравлические сопротивления речных русел сложных форм сечения.....	31
2.1 Взаимодействие руслового и пойменного потоков. ....	31
2.2 Методы расчёта пропускной способности и гидравлических..... сопротивлений пойменных русел (при взаимодействии потоков в них .....	33
с пойменными).....	33
3. Оценка точности и надёжности исходной информации .....	38
3.1 Оценка точности максимальных расходов воды при экстраполяции кривых $Q = F(H)$ .....	38
3.2 Оценка точности и надёжности таблиц для определения .....	39
коэффициента шероховатости .....	39
3.3. Анализ расчётных зависимостей .....	45
Заключение .....	50

## Введение

В технической гидравлике проблема гидравлических сопротивлений практически решена на основе методики предложенной Зегждой-Никурадзе, позволяющей производить расчёты с достаточной для практики точностью. Однако попытки, применения этой методики к речным руслам приводят к очень большим погрешностям расчётов. Поэтому был необходим поиск новых, нетрадиционных, путей решения данной проблемы, на что обращали внимание ряд исследователей, как в нашей стране, так и за рубежом [1].

В последние годы начало успешно развиваться новое направление в разработке методике расчётов сопротивлений речных русел. Оно основано на системном подходе, представляющем речную систему, названную саморегулирующейся системой «бассейн – речной поток – русло», как единое целое. Данная система состоит из двух взаимосвязанных и взаимодействующих между собой подсистем: бассейн и речной поток – русло. В последней подсистеме процесс саморегулирования осуществляется с помощью гидравлических сопротивлений, которые как бы передают необходимые команды на изменения работы отдельных блоков системы. Данное направление интенсивно развивается не только в нашей стране, но и за рубежом, особенно в США [1].

Изучение и создание математической модели природной системы в целом очень сложная задача, решение которой дело ближайшего будущего. В процессе саморегулирования этой системы принимают участие очень большое количество параметров, находящихся в сложной взаимосвязи и взаимодействии и часто подверженных влиянию различных, случайных факторов. Рассмотрим процесс саморегулирования в этой системе, выделив предварительно из неё несколько тесно взаимосвязанных и взаимодействующих блоков: жидкий сток, сток наносов и русловые процессы и их производная форма сечения русла, гидравлические сопротивления, ограничивающие и биотические факторы, и ряд блоков в основном определяющих качество воды. Самостоятельным, приобретающим в последние годы исключительно большое значение, является блок антропогенных факторов.

К сожалению, несмотря на очень длительный период и большое количество исследований по проблеме гидравлических сопротивлений, до сих пор отсутствует методика расчётов гидравлических сопротивлений речных русел. Основной причиной этого, по мнению Н.Б.Барышникова[2], является попытка решения проблемы в отрыве от системы, то есть внесистемный, односторонний подход заранее обречён на неудачу. Если в технической гидравлике достижения вполне ощутимые, то в речной гидравлике положение с проблемой сопротивлений остаётся крайне сложным и часто неопределённым. Поэтому её решение возможно только в переходе к системному подходу оценки гидравлических сопротивлений в сложном комплексе многочисленных взаимодействующих блоков.

Отрыв какого-либо блока из этой подсистемы при рассмотрении проблемы не может дать положительных результатов. Расчёт пропускной способности русел и оценка гидравлических сопротивлений осуществляются в практике на основе формулы Шези, то есть при допущении, что движение русловых потоков равномерное. В этой формуле переход от коэффициента Шези к коэффициенту шероховатости осуществляется с помощью эмпирических формул Маннинга, Павловского и других. Однако, общее гидравлическое сопротивление речных русел является интегральной характеристикой различных видов составляющих его сопротивлений: зернистой шероховатости, донных гряд, формы сечения и других видов гидравлических сопротивлений. Одновременно и сами эти характеристики изменяются во времени и зависят от ряда факторов: расхода воды и наносов, транспортирующей способности потока и ряда других.

Именно по этому для характеристики гидравлических сопротивлений и применяется коэффициент шероховатости, являющийся интегральной характеристикой всех составляющих сопротивлений, величины которых рекомендуется определять по описательным характеристикам русел и пойму. Наиболее часто для этих целей применяются таблицы Срибного, Чоу, Бредли, Карасева и других.

Анализ этих таблиц, проведённый рядом авторов [3 и др.], показал близкую погрешность расчётов значений коэффициентов шероховатости по всем таблицам, в среднем составляющую 35-40 %. Таким образом, все таблицы имеют ограниченное применение и допускают при определении коэффициента шероховатости большие погрешности. Не останавливаясь на детальном анализе возможности применения формулы Шези к расчётам пропускной способности речных русел, отметим, что все погрешности в основном связаны с недоучётом нестационарности и неравномерности движения воды. По мнению авторов таблиц, эти факторы должны быть учтены при определении коэффициента шероховатости [3].

Исходя из этого, была поставлена задача: по данным натурных наблюдений рассчитать значения коэффициентов шероховатости для различных типов рек. На их основе установить достоверность наиболее распространённых таблиц и надёжность учёта в расчётных формулах влияния глубин на коэффициенты шероховатости.

## 1. Гидравлические сопротивления русел простых форм сечения.

## 1.1 Общие положения.

Учитывая, что применение методики Зегжды-Никурадзе к речным руслам приводит к очень большим погрешностям расчётов, в частности, из-за сложности учёта гидравлических сопротивлений различных форм русел, разработано большое количество различных методов, которые могут быть подразделены на четыре группы.

К первой – относятся методы расчётов коэффициентов Шези, основанные на учёте коэффициентов шероховатости. Последние определяются по соответствующим таблицам.

Ко второй – методы расчётов коэффициентов Шези на основе уклонов водной поверхности и глубины потока, то есть не содержащие коэффициентов шероховатости.

К третьей – гидроморфологические зависимости.

К четвёртой - формулы для определения гидравлических сопротивлений донных гряд [4].

В то же время ни одна из этих групп формул не учитывает достаточно полно все составляющие гидравлических сопротивлений: шероховатость русла, донных гряд, формы сечения, эффекта взаимодействия руслового и пойменного потоков, местных сопротивлений, растительности в русле и на берегах рек и нижней поверхности льда [5].

В связи с этим рассмотрим более детально механизм сопротивлений речных русел.

Сопротивление движению потока, вызываемое молярной и молекулярной вязкостью на участке динамической длины  $L$ , без учёта влияния местных сопротивлений называют гидравлическим сопротивлением по длине [5]. В естественных условиях молекулярная вязкость мала и ею обычно пренебрегают, а шероховатость русла выступает в трёх видах.

Первый из них – это сопротивление зернистой шероховатости дна и берегов русла с относительной высотой выступов  $\Delta/h$ .

Второй – это шероховатость, создаваемая валунами, то есть объектами, поперечный размер которых имеет порядок глубины потока.

Третий вид – шероховатость русловых микроформ и мезоформ.

На затопленной пойме движению воды значительное сопротивление оказывает растительность (трава, кусты, деревья), а в межень на малых реках – водная растительность. Наконец, зимой большое значение имеет сопротивление нижней поверхности льда, скоплений шуги и внутриводного льда. Каждый из названных факторов может претерпевать существенные изменения при колебании уровней и расходов воды, изменения соотношения расходов донных наносов и транспортирующей способности потоков, крупности донных - частиц, форма перемещения наносов и другие [4].

Так, например, гидравлическое сопротивление за счёт зернистой шероховатости и донных гряд может изменяться в несколько раз за время весеннего половодья.

Поток в зависимости от конкретных условий сам изменяет сопротивление своему движению, переводя наносы из режима сальтации или влечения в донногрядовую форму, изменяя параметры гряд, форму сечения русла и высоту выступов шероховатости [3].

Расчётный коэффициент шероховатости для потоков при их равномерном движении можно представить в виде суммы его составляющих:

$$n = n_{ш} + n_{г} + n_{ф} + n_{д}$$

Где  $n_{ш}$  – характеризует сопротивление зернистой шероховатости;  $n_{г}$  – донных гряд;  $n_{ф}$  – формы сечения;  $n_{д}$  – дополнительное сопротивление.

Кроме коэффициента шероховатости и уклона водной поверхности, в качестве характеристик гидравлических сопротивлений применяются коэффициент гидравлического трения и коэффициент Шези. Все эти параметры взаимосвязаны между собой, по этому от величины одного из них можно с помощью простейших формул перейти к значениям других.



Так, для условий равномерного движения эти два параметра связаны между собой однозначной зависимостью следующего вида:

$$C = \sqrt{\left(\frac{2g}{\lambda}\right)}$$

где  $g$  – ускорение свободного падения;  $\lambda$  – коэффициент гидравлического трения.

Однако использование в настоящее время этих коэффициентов для расчетов гидравлических сопротивлений речных русел и пойм движению потоков по ним крайне затруднено из-за отсутствия для их определения соответствующих методик.

Фундаментальные экспериментальные исследования по изучению коэффициента гидравлического трения были выполнены И.Никурадзе и А.П.Зегжда [10].

В полученную зависимость для определения коэффициента гидравлического трения  $\lambda=f(Re, R/\Delta)$  входит величина  $\Delta$ , называемая расчётной высотой выступов шероховатости. Объективная методика её определения, как уже указывалось, до настоящего времени отсутствует.

А.П.Зегжда [10] определял величину выступов шероховатости как разность ординат кривых расходов воды от глубин русла при ламинарном режиме, гладких и шероховатых русел, при постоянных значениях расходах воды [5].

Так Н.С.Знаменская [6] отмечает, что методика Зегжды применима для оценки гидравлических сопротивлений рек и каналов с большими ограничениями, так как не учитывает ряда факторов, в частности, влияния масштабного эффекта и режима перемещения наносов. Поэтому в настоящее время при оценке гидравлических сопротивлений речных русел рекомендуется учитывать, как сопротивления зернистой шероховатости (по А.П.Зегжда), так и грядового рельефа дна. При этом расчётные зависимости для оценки сопротивле-

ний грядового рельефа дна не учитывают масштабный эффект [2].

Такое положение с методикой расчётов гидравлических сопротивлений речных русел привело к необходимости использования в качестве основных расчётных характеристик коэффициентов шероховатости и Шези.

Наиболее полный анализ формул раннего периода для расчётов коэффициента Шези выполнен П.Ю.Горбачёвым [11] в 1936 году. Им приведено свыше 200 формул различных авторов, хотя из этих формул в настоящее время используется незначительное количество.

Однако и коэффициенты шероховатости, несмотря на их широкое распространение, имеют ряд существенных недостатков. Одним из них является их недостаточная физическая обоснованность. В частности, неопределённость их размерности. Например, при определении величины коэффициентов шероховатости по данным натурных измерений по формулу Шези-Павловского:

$$n = h^y / C$$

размерность коэффициента шероховатости переменная, так как  $y = f(n)$ . В частности, при  $h < 1$ ,  $y \approx 1,5 \sqrt{n}$ , а при  $h > 1$ ,  $y \approx 1,3 \sqrt{n}$ .

Вторым существенным недостатком является неопределённость описательной характеристики сопротивлений русел и пойм, на основе которой по соответствующим таблицам определяются значения коэффициентов шероховатости [5].

Вопрос о расчётах гидравлических сопротивлений с помощью коэффициентов Шези, содержащих коэффициенты шероховатости, пока ещё окончательно не решен. Анализ формул для расчётов коэффициента Шези и их проверка на материале натурных наблюдений весьма трудоёмки. К тому же отсутствуют критерии их оценки.

Общепризнанным является влияние донных гряд на гидравлические сопротивления. Однако, методика расчёта последних разработана ещё недостаточно, хотя этому вопросу и посвящено большое количество исследований. Наиболее часто встречающейся формой перемещения наносов в руслах,

сложенных песчаным аллювием, является грядовая форма. Сложность её изучения обусловлена тем, что как отмечает Н.Б.Барышников [3], она является разновидностью волновой формы движения, возникающей на границе двух сред – твёрдой и водной.

Вопрос о механизме грядового сопротивления до конца остаётся нерешённым. Его практически невозможно представить только по данным натурных измерений, так как они единичны и не отражают непрерывного процесса перестройки полей скоростей и русловых деформаций. К сожалению, даже при наличии натурных данных о параметрах гряд практически отсутствуют сведения о скоростном поле, характеризующим поток в момент измерения параметров гряд, как правило, отсутствуют данные об уклонах водной поверхности на участке измерений и т.д. Более детальная организация измерений не только параметров потока, но и наблюдений за процессами, происходящими в бассейне реки, сделает возможным решение проблемы разработки методики расчётов гидравлических сопротивлений в системе «бассейн – речной поток – русло».

## 1.2 Методы оценки гидравлических сопротивлений

Под термином «гидравлические сопротивления» следует понимать силы трения, возникающие в движущейся жидкости и обусловленные её вязкостью, шероховатостью русла и другими факторами, в частности, изменением форм сечения по длине потока. Гидравлические сопротивления в жидкости вызывают потери напора (удельной энергии) в потоке. При этом, потери напора есть мера той механической энергии жидкости, несомой единицы её массы, которая благодаря работе сил трения, распределённых равномерно по длине потока (потери напора по длине), а также сосредоточенных в отдельных его узлах (местные потери напора), переходит в тепло.

Чем больше силы трения в жидкости, тем больше, при прочих равных

условиях, потери напора. Между силами трения в движущейся жидкости и потерями напора существует определённая зависимость. Зная распределения в потоке касательных напряжений и скоростей, можно рассчитать потери напора. Однако в случае турбулентного движения жидкости, такая задача осложняется тем, что поле скоростей бывает неизвестно, поэтому приходится использовать приближённые методы расчёта.

Установить расчётную зависимость для потерь напора по длине позволяет основное уравнение равномерного движения:

$$\frac{\tau}{\rho} = gRI = kv^2 \quad (1.1)$$

где  $\tau$  – касательное напряжение;  $\rho$  – плотность жидкости;  $g$  – ускорение свободного падения;  $R$  – гидравлический радиус;  $I$  – гидравлический уклон, характеризующий потерю на единицу длины;  $k = \lambda/2$  – коэффициент пропорциональности, определяемый опытным путём;  $\lambda$  – коэффициент гидравлического трения;  $V$  – средняя скорость потока;

Уравнение (1.1) выведено из предположения о равенстве между собой гидравлического уклона, пьезометрического уклона (уклона свободной поверхности) и уклона дна потока. Как показали опыты О. Рейнольдса, при развитии турбулентном движении потери напора, обусловленные силами сопротивления, пропорциональны квадрату средней скорости потока (положение, выдвинутое самим Шези). Обозначив  $\sqrt{\frac{g}{k}} = C$ , получим окончательное выражение для средней скорости течения при равномерном движении:

$$V = C\sqrt{RI} \quad (1.2)$$

где  $C$  – коэффициент Шези;  $R$  – гидравлический радиус.

Коэффициент Шези имеет размерность  $m^{0.5}/c$  и связан с коэффициентом гидравлического трения формулой:

$$\lambda = \frac{2g}{C^2} \quad (1.3)$$

Формула Шези (1.2) получена для квадратичной области сопротивления в случае установившегося равномерного движения жидкости в руслах

«правильного» поперечного сечения. Так как  $\chi$  для квадратичной области сопротивлений зависит только от относительной шероховатости дна и стенок русла и не зависит от числа Рейнольдса, то  $C$  также зависит от относительной шероховатости, гидравлического радиуса и не зависит от скорости движения  $V$  и вязкости жидкости. Расчёты по формуле (1.2) предполагают однозначность связи расхода с уровнем. Ее применяют для решения задач, в которых параметры потока не меняются во времени и по продольной координате.

Равномерное движение может наблюдаться только в канале или лотке с постоянной формой живого сечения и постоянной глубиной, или в цилиндрической трубе. В естественных водотоках при наличии движения наносов, формы и размеры сечений различны даже на прямолинейных участках, то есть движение воды в реках всегда является неравномерным. Движение потоков в каналах, и особенно в реках, может считаться равномерным только в первом приближении. Это обусловлено наличием в речном потоке участков с возрастанием и убыванием глубин, с ускорением и замедлением течения. Поэтому потери энергии на трение при реальном неравномерном движении должны отличаться от потерь энергии при условии равномерного движения.

А.В.Караушев детально рассмотрел условия допустимости принятия движения руслового потока за равномерное. Течение воды на участке значительного протяжения может рассматриваться как равномерное, если имеется чередование областей местного уменьшения средней скорости течения, площади поперечного сечения и уклона с областями увеличения этих величин, но если в среднем нет тенденции только к их увеличению или только к уменьшению. В некоторых случаях на отдельных малых участках естественных русел движение потока может рассматриваться, с достаточной степенью точности, как равномерное, если размер и форма поперечных сечений, шероховатость, а так же уклон дна и уклон свободной поверхности по длине потока при постоянном расходе изменяются незначительно.

Кроме того, плавно изменяющееся движение, как промежуточная форма между равномерным и неравномерным движениями часто рассчитывается

как равномерное. В практических расчётах, потери энергии вычисляют всё - таки на основе формулы (1.2), относя её осреднённым по длине характеристикам потока. Ширина естественных потоков всегда практически превышает глубину, при этом смоченный периметр русла  $\chi$  не намного отличается от ширины  $B$ , поэтому в расчётах речных русел гидравлический радиус  $R$  заменяют средней глубиной  $h$ .

Наиболее важным требованием к расчётным формулам для коэффициента Шези остаётся, возможно, полный учёт конкретных (локальных) условий движения потока. При этом неприемлемы зависимости, полученные методом статической обработки данных. Гидравлические сопротивления потоков пространственного режима, испытывающих существенное тормозящее влияние берегов, исследованы недостаточно. Хотя установлено определяющее влияние глубины на режим движения потока, но сама связь гидравлических сопротивлений и глубины имеет неоднозначный характер. Поэтому для устранения этой неопределённости возникла необходимость учёта дополнительных факторов, к которым прежде всего принадлежит относительная ширина русла.

Рассмотрим методы расчёта пропускной способности речных русел. Подпоследней, обычно понимают расход воды  $Q$ , который может пропустить русло при заданном наполнении (глубине). В качестве параметров пропускной способности русла применяют и другие величины, например расходную характеристику:

$$K = Q/\sqrt{I}, \quad (1.4)$$

где  $Q$  – расход воды.

Необходимо учесть, что понятие пропускной способности широко используется в практике расчётов гидротехнических сооружений.

Учитывая, что:

$$Q = F \cdot V, \quad (1.5)$$

где  $F$  - площадь поперечного сечения потока, представляет интерес оп-

ределения расчетного значения  $V$ . В общем виде выражение для расчета средней скорости турбулентного не равномерного, не установившегося потока имеет вид:

$$V = C \sqrt{RI \left(1 - \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3}{I}\right)} \quad (1.6)$$

Где

$\varepsilon_1 = \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\alpha_K V^2}{2g} \right)$  – инерционный член, учитывающий неравномерность

движения;

$\varepsilon_2 = \frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{\alpha_B V}{g} \right)$  – инерционный член, учитывающий не стационарность

движения;

$\varepsilon_3 = \frac{qV^1}{gF}$  – инерционный член, характеризующий изменения уклона

водной поверхности за счёт массообмена между русловыми и пойменными потоками и склоновым стоком;  $a_K$  – коэффициент Кориолиса;  $a_B$  – коэффициент Буссинеска;  $q$  – расход воды на единицу длины потока, учитывающий как массообмен между русловым и пойменным потокам, так и склоновый сток;

Инерционные члены  $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$  – характеризуют неравномерность и нестационарность потока, а при наличии поймы, массообмен между русловым и пойменным потоками. Учёт инерционных членов целесообразен при расчёте волн попусков и паводков, а также пропускной способности русла с поймами. В этом случае движение воды становится явно выраженным неравномерным и неустановившимся. Проведённые оценочные расчёты влияния инерционных членов, выполненные Д.Е. Скородумовым, Н.Б. Барышниковым и другими, показали, что вес членов  $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ , учитывающих неравномерность и нестационарность процесса мал и находится в пределах точности измерений и расчётов. Однако в руслах с поймами влияние инерционных членов, характеризующих массообмен между русловым и пойменным потоков, и неравномерность движения может достигать 50 % и более. В то же время, в практике гидравлических расчётов беспойменных рек, инерционным членом, учитывающим нестационарность процесса, можно пренебречь, так как его

величина в среднем составляет доли процента - при наибольшем значении в 5%. В этом случае движение принимается квазиустановившимся и расчёты средней скорости проводят по известной формуле Шези для равномерного движения (1.2).

### 1.3 Формулы для расчётов коэффициента Шези.

Коэффициент  $C$ , входящий в формулу Шези, играет важную роль в практических расчётах. В конце XVIII века, Антуан Шези предложил формулу для расчёта средних скоростей руслового потока в виде  $V = 50\sqrt{RI}$ . Таким образом он принимал  $C = 50$ , где  $C = \text{const}$ , и считал, что учёт влияния формы сечения на пропускную способность отражается гидравлическим радиусом. Однако в последствии было установлено, что коэффициент  $C$  не постоянен, а может изменяться в широком диапазоне.

Фундаментальные исследования закономерностей изменения коэффициента Шези в речных руслах на основе данных обычных гидрометрических наблюдений принадлежат М.Ф.Срибному, а в пойменных Д.Е.Скородумову. В частности, Скородумов, занимаясь вопросами экстраполяции кривых расходов воды, пришёл к следующим выводам:

- использования формулы Шези для экстраполяции кривых расходов, при наличии надёжных данных об уклоне водной поверхности, в ограниченных условиях - целесообразно.
- при высоких наполнениях русла, коэффициент Шези в общем случае стремится к постоянному значению. Отдельные случаи, когда указанная тенденция нарушается, связаны с аномальным видом поперечного сечения русла.
- наиболее целесообразным способом экстраполяции кривых расходов (при наличии данных об уклонах свободной поверхности) является



применения формулы Шези ко всему поперечному сечению потока в целом с введением поправочного коэффициента в неё, учитывающего влияния формы сечения.

В дальнейшем, многими исследователями была выявлена большая неоднозначность и не монотонность зависимости  $C=f(h)$ , приведенная на рисунке 1.1

В этой связи особый интерес приобретает исследования влияния глубины на изменения коэффициента Шези.

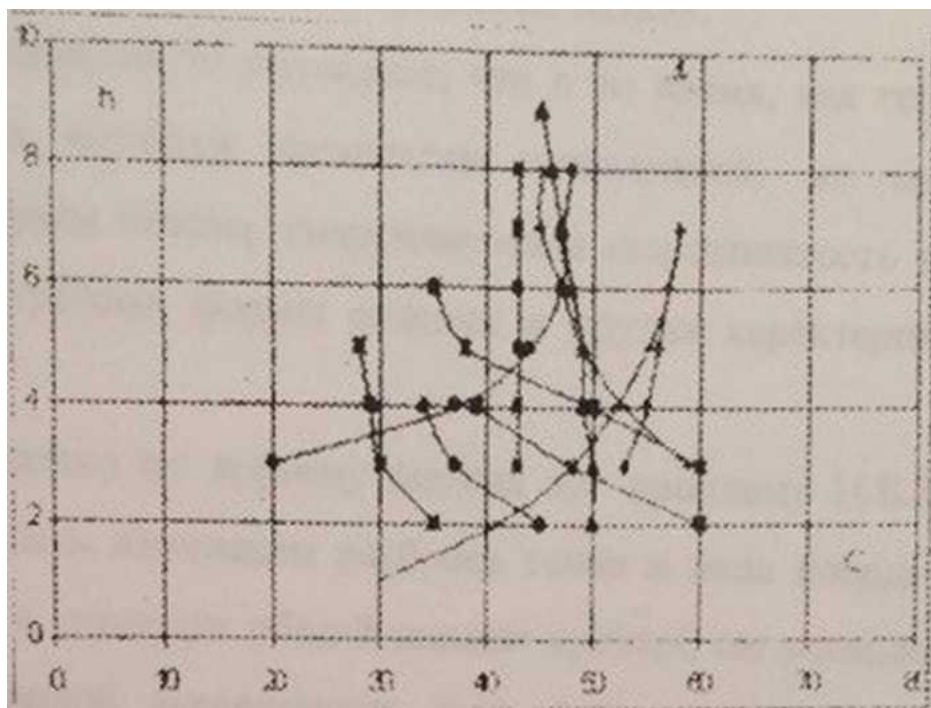


Рисунок 1.1. Зависимость  $C=f(h)$  по натурным данным.

В.Е.Сергутин и А.Л.Радюк исследуя зависимость  $n=f(h)$  выявили 12 зон изменения коэффициента шероховатости при изменении глубины (рисунок 1.2)

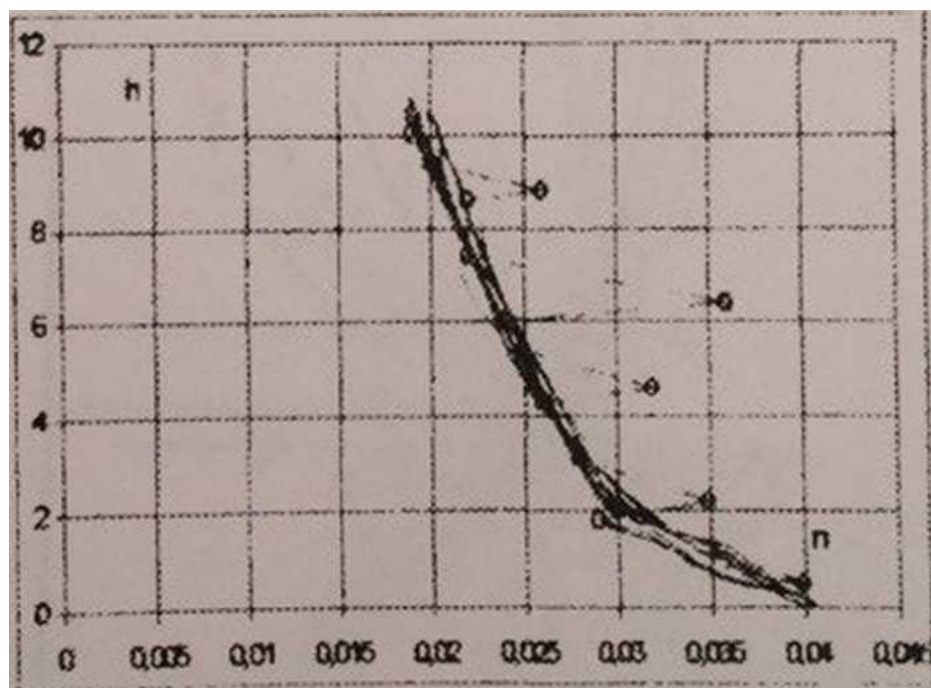


Рисунок 1.2. Зависимость  $n=f(h)$  по В.Е.Сергутину и А.Л.Радюку.

Наличию и характеру каждой зоны, они дают только качественное описание, ссылаясь на влияние донных наносов, мутности и других факторам. Совершенно очевидно, что одним из факторов в отклонение точек от некоторой средней линии является погрешность определения составляющих формулы Шези (1.6), особенно уклона свободной поверхности. К тому же появление любой классификации подразумевает отвлечённость от решения задачи.

В.Н.Гончаров [8] указывает, что в то время, как геометрическая шероховатость остаётся физически неизменной, не зависящей от глубины и формы потока, гидравлическая шероховатость изменяется с изменением глубины, формы сечения и других характерных размеров потока.

Совершенно по-другому оценил эту проблему Н.Б.Барышников [5]. Не занимаясь изучением разброса точек в поле координат  $C=f(h)$  или  $n = f(h)$ , а исследуя общий наклон кривых, он установил наличие пяти типов данной зависимости, (рисунок 1.3 и 1.4) и привёл качественное обоснование каждому типу

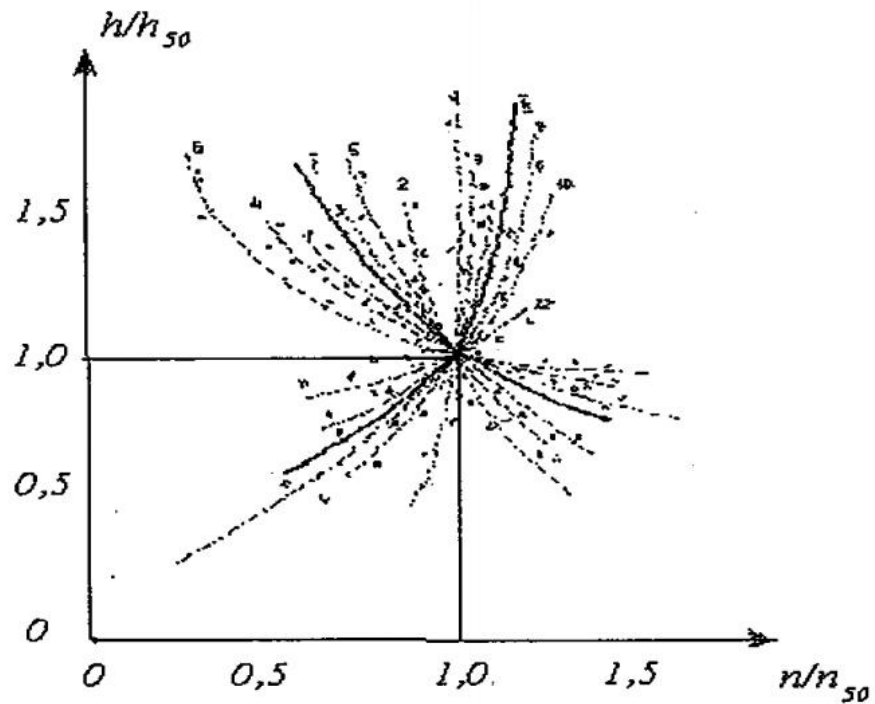


Рисунок 1.3. Графики зависимостей  $n/n_{50}=f(h/h_{50})$  для равнинных рек I-II – осредненные для групп рек кривые; I-I2 – полученные по данным наблюдений на конкретных реках

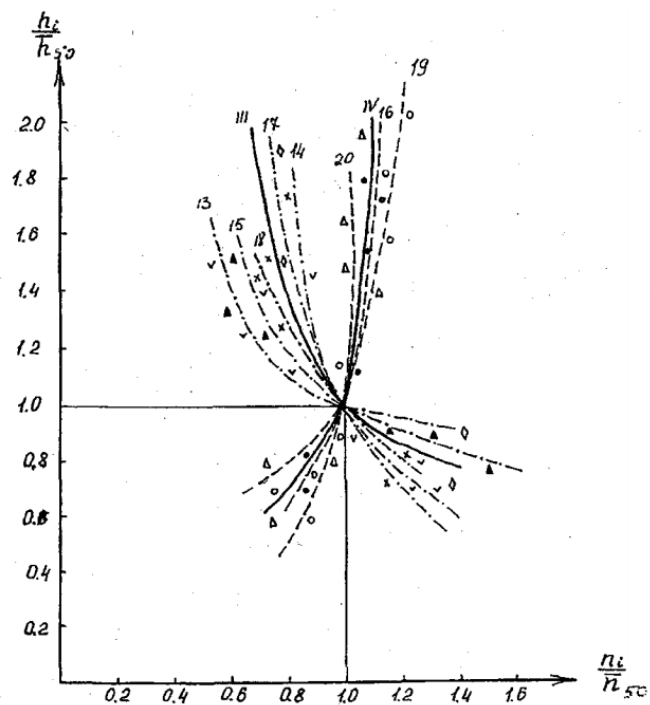


Рисунок 1.4. Графики зависимостей  $n/n_{50}=f(h/h_{50})$  для горных и полугорных рек

III– IV – кривые, осредненные для групп рек; 13-19 – кривые, полученные по данным наблюдений на конкретных реках.

Так, например, первый тип характеризуется увеличением  $C/C$  при увеличении  $h/h_{\text{ср}}$ . Реки с данным типом, как правило, равнинные с малым уклоном, широкие, и имеют хорошо разработанные не зарастающие берега. Второй тип, характеризующий уменьшение  $C$  с увеличением  $h$  соответствует в какой-то мере, горным рекам, с плохо разработанными берегами, заваленными камнями или заросшими растительностью и с большими уклонами водной поверхности. Остальные типы характеризуются более сложными зависимостями и их анализ возможен только с привлечением дополнительного материала.

Таким образом, для того, чтобы уточнить зависимость  $Cf(h)$  необходимо привлечь дополнительные факторы, к которым в первую очередь следует отнести относительную ширину русел.

Для аналитического описания коэффициента Шези предложено большое количество формул, многие из которых носят частный характер, так как получены на ограниченном лабораторном или натурном материале. К настоящему времени известно более двухсот формул для определения коэффициента  $C$ , обзор формул раннего периода выполнены Ф.Форхгеймером, Ф.П.Горбачёвым и другими авторами. Этой проблемой занимались И.И.Агроскин, А.Д.Альтшуль, В.Н.Г'ончаров, В.М.Маккавеев, О.М.Айвазян, К.В.Гришанин, М.А.Мостков, М.Ф.Срибный, И.Ф.Карасев и другие.

Одной из главных задач речной гидравлики является установление надёжных зависимостей для коэффициента Шези от определяющих факторов. Расчёты пропускной способности русел основаны на постулате, что для русел любой формы существует равнозначный по сопротивлению, средней скорости и пропускной способности плоский поток такого же сечения, с шириной равной длине смоченного периметра действительного русла и глубиной равной гидравлическому радиусу. Для которого параметр Шези имеет общее выражение:

$$C = \frac{R^Y}{n} \quad (1.7)$$

где  $n$  – коэффициент шероховатости русла;  $y$  – показатель степени.

Все формулы для расчёта коэффициента Шези можно подразделить на три группы: содержащие коэффициент шероховатости  $C = f(n, h)$ ; не содержащие коэффициент шероховатости  $C = f(d, \Delta, h_\Gamma/L_\Gamma)$ ; основанные на концепции саморегулирования потока и русла  $C = f(h, I)$ .

К формулам, основанным на применении коэффициента шероховатости, относятся формулы:

Гангилье-Гунтера

$$C = \frac{23 + \frac{1}{n}}{1 + 23 \frac{n}{\sqrt{R}}} \quad (1.8)$$

Р. Миннинга

$$C = \frac{R^{\frac{1}{6}}}{n} \quad (1.9)$$

Н.Н. Павловского

$$C = \frac{R^Y}{n} \quad (1.10)$$

Ф. Форхгеймера

$$C = \frac{R^{\frac{1}{6}}}{n} \quad (1.11)$$

И.И. Агроскина

$$C = \frac{1}{n} + (27,5 - 300n) \lg R; \quad (1.12)$$

В.Ф. Галмазы

$$C = \frac{1}{n} + (21 - 100n) \lg h; \quad (1.13)$$

Г.В. Железнякова

$$C = \frac{1}{n} \left[ \frac{1}{n} - \frac{\sqrt{g}}{0.13} (1 - \lg R) \right] + \sqrt{\frac{1}{4} \left[ \frac{1}{n} - \frac{\sqrt{g}}{0.13} (1 - \lg R) \right]^2 + \frac{\sqrt{g}}{0.13} \left( \frac{1}{n} + \sqrt{g} \lg R \right)} \quad (1.14)$$

и другие.

К формулам не содержащим коэффициент шероховатости относятся формулы:

А.Л.Радюкова

$$C = (12 + 35) \left( \frac{h}{\Delta} \right)^{\frac{0.1}{0.5}}; \quad (1.15)$$

В.С.Кнороза

$$C = 3.16 \sqrt{g} \left( \frac{R}{h_r} \right)^{\frac{1}{8}} \left( \frac{L_r}{h_r} \right)^{\frac{1}{2}}; \quad (1.16)$$

В.Ф.Талмазы

$$C = \sqrt{g} \left( 6lg \frac{h}{d} + 3.7 \right); \quad (1.17)$$

В.Н.Гончарова

$$C = 4 \sqrt{2glg} \frac{6.15R}{\Delta}; \quad (1.18)$$

Штриклера-Маккавеева

$$C = 33 \left( \frac{h}{d} \right)^{\frac{1}{6}} \quad (1.19)$$

и другие.

К формулам основанным на концепции саморегулирования относятся:

Р.А. Шестакова и А.А.Труфанова

$$C = (7/22) I^{-\left(\frac{0.07}{0.25}\right)}; \quad (1.20)$$

О.М.Айвазян

$$C = \sqrt{\frac{8g}{\left( 0.16 + 0.26 \left( \frac{1}{R} \right) \right)}}; \quad (1.21)$$

К.В.Гришанина

$$C = \left(\frac{1}{M}\right) * \left(\frac{gh}{BI}\right)^{\frac{1}{2}}; \quad (1.22)$$

М.Маткевича

$$C = 35.5h^{0.2} * I^{(10I+0.007)}; \quad (1.23)$$

А.Д.Альтшуля

$$C = \left(\frac{14.8}{I^{\frac{1}{6}}}\right) - 26; \quad (1.24)$$

Р.Винкеля

$$C = R^{\frac{3}{14}} * I^{\frac{1}{14}} * \left(185 - 210 * I^{\frac{1}{14}}\right); \quad (1.25)$$

и другие.

Где  $h$  – средняя глубина потока;  $\Delta$  – высота выступов шероховатости;  $h_r$  – высота выступов шероховатости;  $B$  – ширина русла;  $M$  – инвариант подобия ( $M=0.75-1;-1.05$ ).

#### 1.4 Влияние формы сечения на гидравлические сопротивления речных русел

Влияния формы сечения русла на гидравлические сопротивления речных русел – очевидный факт. Однако его количественная оценка представляет значительные трудности. По этой причине в речной гидравлике, по-

прежнему, оценку гидравлических сопротивлений сводят к определению коэффициента Шези  $C$  для плоского потока.

В проблеме влияния формы сечения на гидравлические сопротивления сформировалось два направления. Первое основано на учёте неравномерного распределения глубин по ширине потока (С.Х.Абальянс, В.Н.Гончаров, М.А.Мостков, Г.В.Желязняков и другие). Второе направление рассматривает непосредственное влияние шероховатых стенок (через учёт относительной ширины  $B/h$ ) на гидравлические сопротивления, первоначально рассчитываемые, исходя из условий плоского потока. Иными словами, в качестве относительной предпосылки принимается пространственный режим течения (В.Н.Гончаров, И.Ф. Карасёв, И.И. Мечитов, Х.Вагнер, К.Ших, Н.Григг, Г.Гербрехт и другие).

Так, В.Н.Гончаров [8] предложил представлять любую форму сечения в виде симметричной кривой глубин, математическим описанием которой служит формула:

$$\frac{h}{h_{max}} = \left(\frac{b}{B}\right)^r ; \quad (1.26)$$

где  $b$ – полуширина русла при любом расчётном уровне;  $h_{max}$  и  $B$ – наибольшая глубина и полуширина русла при наивысшем из расчётного уровне;  $r$ – показатель формы сечения, определяется по формуле:

$$r = \frac{h_{max}}{h} - 1; \quad (1.27)$$

Тогда пропускная способность русла любой формы сечения может быть определена по формуле:

$$Q = \beta Q_{\Pi} \quad (1.28)$$

$Q_{\Pi}$ – пропускная способность русел прямоугольной формы сечения;  $Q$ – пропускная способность русел расчётной формы сечений;  $\beta$  – коэффициент, учитывающий влияния формы сечения на его пропускную способность, может быть больше или равен единице (для русел прямоугольной формы сечения), и определяется из соотношения:



$$\beta = \frac{(1+r)^{1.67}}{1+1.67r} \quad (1.29)$$

По мнению Гончарова, увеличение скорости (расхода) тем больше, чем больше значение параметра  $r$ , величина этого увеличения по сравнению с потоком прямоугольного сечения характеризуется параметром  $\beta$ . В тоже время, рассматривая узкие потоки прямоугольного сечения, Гончаров справедливо указывал, что поля скоростей (а следовательно и расхода воды), потоков с соотношением  $B/h < 10$ , существенно отличны от аналогичных, режим которых близок к плоскому. И далее элементарные расчёты, выполненные с учётом критерия  $p$ , показывают, что русла треугольной формы сечения должны иметь большую пропускную способность, чем полукруглые, что не соответствует экспериментальным данным П.Д.Базена и Куттера. Таким образом, критерий Гончарова не может быть признан универсальным.

Более приемлемым является критерий Г.В.Железнякова:

$$\beta^* = \frac{1}{\omega\sqrt{h}} \int_0^B h^{\frac{3}{2}} db; \quad (1.30)$$

Критерий  $\beta^*$ , назван параметром формы живого сечения, учитывающий неравномерность распределения глубин по его ширине, так же нельзя признать универсальным. Действительно, подсчитанные с учётом этого критерия расходы воды в руслах прямоугольного ( $\beta^*=1.0$ ) и треугольного ( $\beta^*=1.13$ ) сечений отличаются на 13 %, что так же не соответствует экспериментальным данным. Существенные отличия получаются и для русел других форм сечений. Так, оказалось, что по расчётам пропускать треугольное сечение расход на 5 % больше, чем параболическое  $\beta^* = 1.08$ .

Проводя лабораторные исследования в различных лотках А.А.Маастик пришёл к выводу, что «...форма поперечного сечения русла сказывается на сопротивлении. При гидравлических гладких руслах это влияние мало и им можно пренебречь, с увеличением же шероховатости русел влияние формы поперечного сечения возрастает. При одной и той же шероховатости разница в коэффициентах сопротивления для разных форм поперечного сечения

уменьшается с увеличением глубины (гидравлического радиуса) потока. При одинаковом гидравлическом радиусе наименьший коэффициент сопротивления имеет русло параболического сечения, наибольший трапецеидального сечения».

М.А.Мостков предложил производить учёт формы сечения при помощи параметра, который близок к параметру С.Х.Абальянца:

$$\delta = \frac{R}{\sqrt{\omega}} = \frac{\sqrt{\omega}}{\chi} \quad (1.31)$$

По данным Мосткова, только за счет изменения угла откоса канала трапецеидальной формы, возможно увеличения его пропускной способности на 10-11 %, что так же не соответствует приведенным в литературе данным.

Как показывают расчёты по этим формулам, русла треугольной формы сечения должны иметь большую пропускную способность, чем округлые, что не соответствует действительности. Поэтому, коэффициенты  $\delta$ , по Мосткову и  $\beta V$  по Гончарову, имеют ограниченное применение и расчёты по ним не всегда соответствуют экспериментальным данным.

Ю.А. Ибад-Заде обобщил в своей монографии критерии формы русел различных авторов и пришёл к выводу, что все они не являются универсальными, основаны на большом количестве допущений и не дают однозначного решения для формы русла. Поэтому, внимания заслуживают критериальные значения, учитывающие пространственный режим течения.

В расчётах в речной гидравлике равномерный поток любой формы сечения стремятся привести к прямоугольному, плоскому потоку без тормозящих боковых стенок и с глубиной, равной гидравлическому радиусу действительного сечения. В этом случае учёт формы сечения производится с помощью параметра  $B/h$ , то есть отношение ширины к средней глубине потока.

Переход от потоков пространственного режима к плоским потокам Гончаров представил в виде условия:

$$\frac{\beta}{h} > 0.7 \sqrt{\frac{h}{\Delta}} \approx \left(\frac{C}{2.5}\right)^3$$

Условие (1.36) выведено эмпирическим путём, на основании данных лабораторных опытов, проведённых в диапазонах  $(B/h)=0.9/6.5$  и  $h/\Delta=4/7$ ч/460. Гончаров [8] указывает, что поток прямоугольного сечения будет плоским, если отношение его ширины к глубине будет для различных  $C$  и  $h/\Delta$  приближён значений, представленных в таблице 1.

Таблица 1.1 Относительные характеристики потока

$h/\Delta$	30	107	400	1500
$C$	40	50	60	70
$B/h$	4	8	14	22

Учитывая, что отношения  $B/h$  всегда (зачастыми исключениям) превышают условия (1.36), Гончаров делает вывод о том, что по структуре скоростного поля, распределению касательных напряжений и по сопротивлениям все естественные потоки можно рассматривать как потоки непространственного, плоского режима. Это позволяет полностью использовать для анализа их состояния аппарат теории плоского потока, на который опираются решения основных вопросов движения потоков не пространственного режима.

На основании анализа большого количества натурального материала С.Х. Абальянц установил увеличение коэффициентов гидравлического трения  $\lambda$  с уменьшением размеров земляных каналов, объясняя это влиянием местных сопротивлений и неравномерной шероховатости русла. Отсюда вытекает зависимость коэффициента сопротивлений от гидравлического радиуса, которое косвенно выражает его связь с числом Рейнольдса.

Проводя специальные исследования, К.Ших и М.Григг показали, что при одних и тех же гидравлических радиусах  $R_h$  шероховатости поверхности лотка  $n$ , средние скорости течения в нём отличались более чем на 10%.

С.Д.Апельт и А.К.Казимипур, проводя экспериментальные измерения по определению коэффициентов сопротивления, пришли к выводу, о необходимости особого учёта формы сечения русла. В более поздних опытах различными исследователями (К.Наллури и Б.А.Адероджи) подтвердилась необходимость особого учёта формы русла при определении коэффициентов сопротивлений. Сам по себе этот факт не нов, но его количественные оценки весьма противоречивы. Считают, что в русле ограниченной ширины сопротивления больше, чем в широком (Г.Г'арбрехт). Х.Вагнер установил не однозначное изменение коэффициента сопротивления от относительной ширины.

В.С. Алтунин и Л.В. Ларионова приводят формулы для количественной оценки этого эффекта:

$$C = f \left[ a * \left( \frac{B}{h} \right)^m \right]; \quad (1.33)$$

где  $a$  и  $m$  – соответственно коэффициент и показатель степени.

В частности, Алтунин вывел формулу для коэффициента Шези, учитывающую только относительную ширину русла:

$$C = \left[ g \left( 0.2 \left( \frac{B}{h} \right)^2 + 43 \right) \right]^{0.5} \quad (1.34)$$

В.С. Боровков предложил формулу для расчёта коэффициента гидравлического трения, учитывающую как крупность частиц  $k_s$ , так и относительную ширину ( $B/R$ ) в явном виде:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 2 * \lg \frac{R}{k_s} + 3 * \lg \frac{B}{R} - 1.85 \quad (1.35)$$

С.Х. Абальянц, основываясь на результатах исследований И.Ф. Карасёва, предложил учитывать форму сечения с помощью введения параметра  $(R/B)$  к коэффициенту шероховатости плоского потока  $n_0$  в виде:

$$n = n_0 \left[ 1.3 \left( \frac{R}{B} \right)^{\frac{1}{12}} \right] \quad (1.36)$$

А.В. Симанович, в своей работе показал неоднозначность связей

$Z=f(B/h)h$ , то есть зависимость коэффициента Шези от относительной ширины, при фиксированной средней глубины в каждом створе. Так, зависимость  $C=f(B/h)_h$  является прямой до значений  $B/h=20-25$ , после чего зависимость сменяется на обратную, вплоть до значений  $B/h=35-40$ , далее зависимость снова переходит в прямую и асимптотически приближается к прямой параллельной оси  $B/h$ . Им предложена формула для расчёта коэффициента Шези речных русел, учитывающая относительную ширину русла:

$$C = 0.78C_0 + 0.000464 \frac{C_0^3}{g(b-2\bar{a})P}; \quad (1.37)$$

Поперечный профиль реки является профилем относительного равновесия при руслоформирующих расходах. Аналитическая оценка зависимости  $C=f(B/h)$  представляет значительные трудности. Имеющиеся прецеденты носят противоречивый характер. А.В. Симанович для получения аналитической структуры зависимости  $C=f(B/h)$  использовал данные натурных наблюдений (рисунок 1.5).

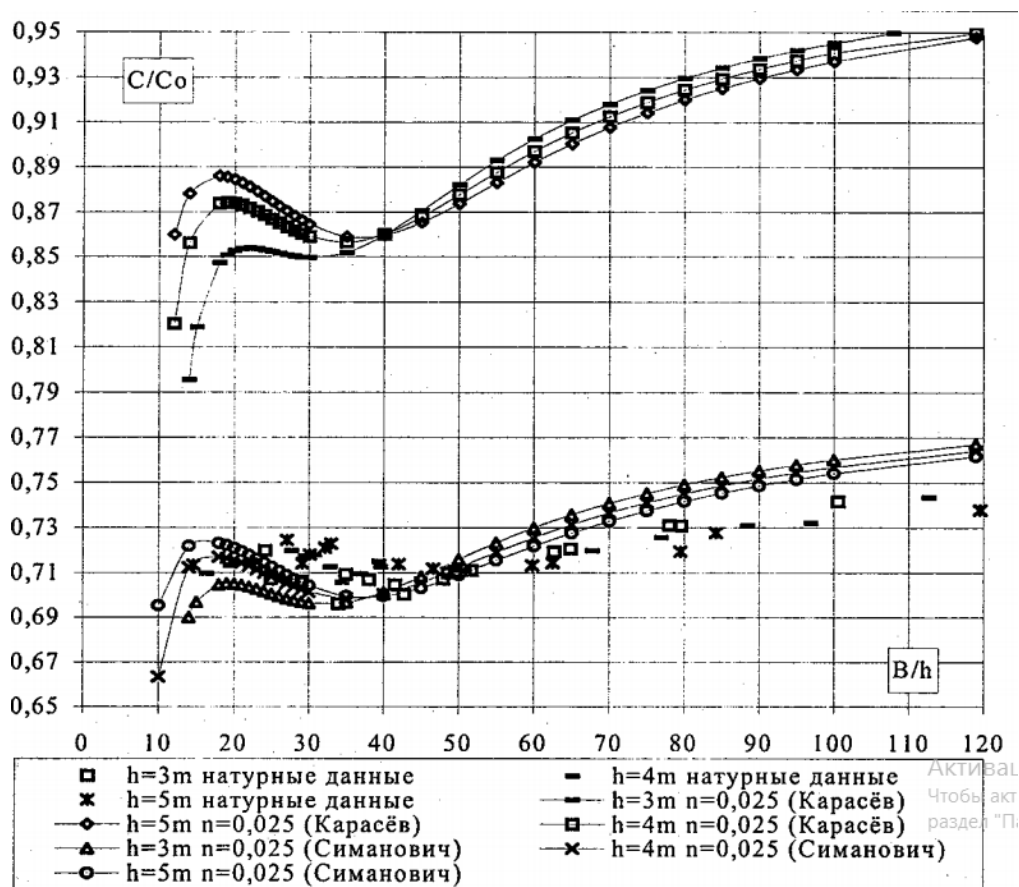


Рисунок 1.5. Зависимость  $C/C_0=f(B/h, h)$

Проводя сравнительный анализ влияния относительной ширины наряду с шероховатостью, И.Ф. Карасёв показал, что в диапазоне реальных размеров каналов  $B/h < 30$ , с ростом их относительного наполнения критические числа Рейнольдса больше зависят от относительной ширины русла, чем от гидравлического радиуса. Карасёвым так же предложен критерий квазиоднородности кинематической структуры в поперечном сечении потока:

$$\theta = \sqrt[3]{\lambda = \frac{B\sqrt{2g}}{hC_0}} > 1. \quad (1.38)$$

У естественных русел, ширина всегда превосходит глубину, этим обеспечивается квазиоднородность внутренней структуры турбулентного потока, при которой  $\theta > 1$ . Если влияние пульсационных составляющих и пристенных градиентов скоростей на кинематическую структуру потока соизмеримы, что характерно для лотков, каналов, и относительно узких речных русел при прохождении паводков, значения критерия уменьшаются и находятся в диапазоне  $\theta = 0.30-0.50$ . Адаптируя к натурным данным критерий квазиоднородности, Карасёв пришёл к следующему выводу. Величина  $\theta = 4.5$  является разграничительным критерием. При  $\theta < 4.5$  поток сохраняет форму компактной струи, имеющей размеры всего русла. С ростом  $\theta > 4.5$ , начинается внутреннее разветвление потока, при  $\theta = 9.5$ , в потоке образуются две обособленные ветви течения. В природе при этих условиях формируются двухрукавное русло. Критерий квазиоднородности  $\theta$  наиболее полно отражает влияние берегов на динамическую структуру турбулентного потока. В отличие от критерия Гончарова (1.32), полученного на основе лабораторных данных, критерий квазиоднородности Карасёва (1.39) установлен на основе натуральных данных (более 500 измерений на 60 постах).

Несмотря на то, что, давно установлено влияние формы русла на пропускную способность и обоснована необходимость принимать это во внимание, тем не менее, в речной гидравлике, по прежнему, оценка гидравлических

сопротивлений сводится к определению коэффициента Шези  $C$  для плоского потока, например по формуле Маннинга (1.40). Большое количество исследований в этом направлении свидетельствует не только о стремлении оценить влияние формы сечения, но и о сложности решения этой задачи.

## 2 Гидравлические сопротивления речных русел сложных форм сечения

### 2.1 Взаимодействие руслового и пойменного потоков.

Значительно сложнее механизм гидравлических сопротивлений русел сложных форм поперечного сечения, к которым относят русла с поймами, русла при наличии в них затопленных побочней, русла с резко отличающейся шероховатостью по их ширине и другие. Особенностью таких русел является изменение гидравлических сопротивлений за счет эффекта взаимодействия потоков, движущихся с резко отличными скоростями.

Исследованию этой проблемы посвящена обширная отечественная и зарубежная литература [3,4,5,6]. Интерес представляет классификация процессов взаимодействия руслового и пойменного потоков, разработанная для условий установившегося движения, и методика расчетов петель на кривых

расходов воды на пойменных гидростворах, учитывая нестационарность движения.

В основу классификации положено взаимное расположение динамических осей руслового и пойменного потоков на участке, находящемся ниже расчётного створа. В зависимости от этого выделено пять типов взаимодействия потоков:

первый тип – параллельное расположение динамических осей потоков;

второй тип – взаимодействие потоков, характеризующиеся расширением поймы ниже расчётного створа;

третий тип – взаимодействие потоков, когда оси руслового и пойменного потоков сходятся.

Более сложен и менее изучен процесс при пересечении динамических осей при четвёртом и пятом типах взаимодействия потоков, которые отличаются друг от друга только отметками двухсторонних пойм. При четвёртом типе отметки левой и правой пойм примерно одинаковые, а при пятом – они значительно отличаются друг от друга [3, 5]

По длине реки обычно наблюдаются сужения и расширения русла и поймы и гидравлические сопротивления движению потока по его длине существенно изменяются. Именно в этом и сказывается роль формы в процессе саморегулирования.

В работах Н.Б. Барышникова [2, 3] и других авторов [4 и др.] вскрыты причины образования петель на кривых расходов воды и средних скоростей потока на пойменных гидростворах на основе перехода от установившегося движения к неустановившемуся. Но эта проблема значительно шире, так как в ней взаимосвязаны вопросы особенностей затопления пойм, их регулирующей способности и взаимодействия руслового и пойменного потоков при неустановившемся движении.

Роль пойменного регулирования и его влияние на гидравлические сопротивления пока ещё полностью не оценены. Однако можно сделать вывод, что в период подъёма уровней рассматриваемая система стремится умень-



шить сопротивление русла движению паводков и половодий. В период же спада уровней это сопротивление наоборот увеличивается.

Кратко рассмотрев отдельные составляющие сопротивлений, отметим, что точность их расчётов низкая. Таким образом попытки определения интегральных значений коэффициента шероховатости как суммы его составляющих на данном этапе следует признать мало эффективными. В то же время результаты, хотя бы приближённой оценки этих коэффициентов шероховатости, характеризующих общее сопротивление русла движению потоков, представляют не только научный, но и практический интерес [5].

## 2.2 Методы расчёта пропускной способности и гидравлических сопротивлений пойменных русел (при взаимодействии потоков в них с пойменными).

Кратко рассмотрим основные методы расчётов гидравлических сопротивлений и пропускной способности, пойменных русел, а затем и самих пойм при взаимодействии потоков в них.

Наставление, опубликованное в 1972 году, и до сих пор не отменённое, рекомендует выполнять расчет пропускной способности по формуле Шези отдельно для русла и пойм, то есть:

$$Q = Q_R + Q_{\Pi} = F_R V_R + F_{\Pi} V_{\Pi} = (FC\sqrt{RI})_R + (FC\sqrt{RI})_{\Pi}; \quad (2.1)$$

Анализ оценки точности расчётов по этой формуле показывает, что средняя погрешность расчётов составляет величину близкую к 30-40 %.

При наибольшей величине погрешности значительно превышающей 100%.

После 1948 года, когда Г.В. Железняков экспериментальным методом выявил эффект взаимодействия потоков, и блестящих исследований В.Н. Гончарова, теоретически обосновавшего эффект взаимодействия руслового и пойменного потоков, было рекомендовано ввести в формулу (2.1) корректирующие множители:

$$Q = k_R Q_R + k_{\Pi} Q_{\Pi} = k(Q_P + Q_{\Pi});$$

При этом принимается

$$k_p < 1; k_{\Pi} > 1; k < 1. \quad (2.3)$$

В пятидесятые - семидесятые годы было разработано большое количество формул для определения этих коэффициентов. Большинство их было основано только на лабораторных данных и не могло быть использовано для расчетов пропускной способности и гидравлических сопротивлений речных русел с поймами. Исключением является методика И.Ф. Карасёва, [12] предложившего формулы для расчёта этих коэффициентов основанных на натуральных данных:

$$k_p = \sqrt{\frac{gB_p}{gB_p + 2\varphi C_p^2 k_V h_{PB}}} \quad (2.4)$$

или

$$k_{\Pi} = \sqrt{\frac{gB_{\Pi}}{gB_{\Pi} + 2\varphi C_{\Pi}^2 k_V h_{PB}}}$$

где  $\varphi$  – коэффициент, учитывающий отношение сохранившейся продольной скорости, взаимодействующих масс к средней скорости потока;

$$k_V = (v_p - V_{\Pi})/V_p;$$

$h_{P.B}$  – средняя глубина русловой части потока при уровне затопления бровок прирусловых валов.

В формулу (2.4) входят параметры  $\varphi$  и  $k_V$  которые можно определить имея лишь данные натуральных наблюдений. К тому же оценка надёжности этих формул не проводилась. По этому в последние годы на кафедре гидрометрии РГГМУ были выполнены исследования, направленные на получения зависимостей вида  $k_p = f(\alpha, \frac{h_p}{h_{PB}}, \beta)$  где  $\alpha$  – угол между динамическими осями руслового и пойменного потоков;  $p$  – параметр, характеризующий тип взаимо-

действия потоков. В частности, Е.В. Польдиной и Н.В. Паршиной по натурным данным получены графические зависимости вида:

$$k_p = \frac{Q_\Phi}{Q_M} = \left( \alpha, \frac{h_p}{h_{PB}}, \beta \right),$$

Где  $Q_\Phi$  и  $Q_M$  – расходы воды, измеренные и определённые на основе формулы Шези-Маннинга. Аппроксимация этой зависимости имеет вид:

$$k_p = AL^{-\alpha\beta} \quad (2.6)$$

где  $A$  и  $B$  - постоянные при переменных значениях  $h_p/h_{PB}$ . Поверочные расчёты, выполненные на основе независимой натурной информации, подтвердили высокую эффективность методики.

Н.Б. Барышниковым [3, 5] были получены графические зависимости приведённые на рисунках 2.1 вида:

$$\begin{aligned} \frac{V_p}{V_{PB}} &= f\left(\alpha, \frac{h_p}{h_{PB}}\right) \\ \frac{I_p}{I_{PB}} &= f\left(\alpha, \frac{h_p}{h_{PB}}\right) \end{aligned} \quad (2.6)$$

$$\frac{n_p}{n_{PB}} = f\left(\alpha, \frac{h_p}{h_{PB}}\right)$$

Если для зависимостей  $\frac{V_p}{V_{PB}} = f\left(\alpha, \frac{h_p}{h_{PB}}\right)$  корреляционные отношения  $\div$  0.85-0.95, то для зависимостей  $\frac{n_p}{n_{PB}} = f\left(\alpha, \frac{h_p}{h_{PB}}\right)$  корреляционные отношения значительно меньше. Особенно сложно было определить положение кривой  $n_p/n_{PB} = f(a)$  для  $h_p/h_{PB} = 1.5$  из-за малого объёма натурной информации (рисунок 2.1).

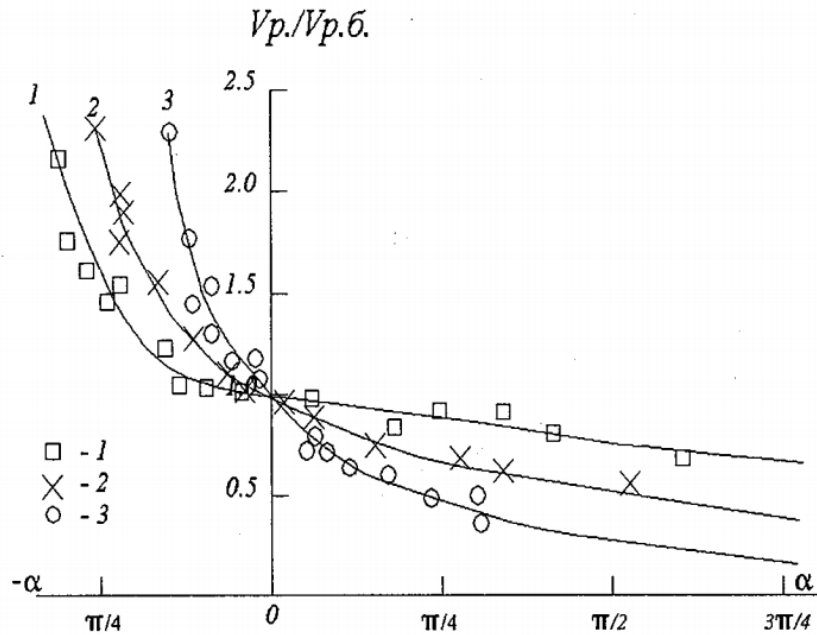


Рис. 1.4. Кривые  $V_p/V_{p.б.} = f(h_p/h_{p.б.}, \alpha)$ :  
 1 -  $h_p/h_{p.б.} = 1.10$ ; 2 -  $h_p/h_{p.б.} = 1.25$ ; 3 -  $h_p/h_{p.б.} = 1.50$

Рисунок 2.1. Кривые  $V_p/V_{p.б.} = f(h_p/h_{p.б.}, \alpha)$

Дальнейшие исследования по этой проблеме были направлены на анализ системы уравнений движения и неразрывности потока с переменной по длине массой. Д.Е.Скородумовым и Н.Б.Барышниковым[3] предложена система уравнений для расчёта параметров потока в русле с односторонней поймой в виде:

$$I_P = \left( \frac{V^2}{C^2 h} \right)_P + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\alpha_K V^2}{2g} \right)_P + \frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{\alpha_B V}{g} \right)_P + \left( \frac{qV^1}{gF} \right)_P$$

$$I_{ПП} = \left( \frac{V^2}{C^2 h} \right)_П + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\alpha_K V^2}{2g} \right)_П + \frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{\alpha_B V}{g} \right)_П + \left( \frac{qV^1}{gF} \right)_П \quad (2.7)$$

$$\frac{\partial(Q_P + Q_{П})}{\partial x} + \frac{\partial(F_P + F_{П})}{\partial t} = q_c$$

где  $a_K$  и  $a_B$  - коэффициенты Кориолиса и Буссинеска;  $q = q_B + q_c$  - расход воды на единицу длины потока за счёт эффекта взаимодействия потоков ( $q_B$ ) и склоного стока ( $q_c$ );  $V^1$  - скорость массообмена между русловым и пойменным потоками.

Решение системы уравнений (2.7) коэффициента Шези в виде:

$$C = \frac{V}{\sqrt{hI(1 - \frac{\sum \varepsilon_1}{I})}} \quad (2.8)$$

которое отличается от аналогичного определяемого по формуле Шеши на величину  $\sqrt{(1 - \frac{\sum \varepsilon_1}{I})}$ , где  $\varepsilon_i$  – инерционные члены:

$$\varepsilon_1 = \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\alpha_K V^2}{2g} \right); \varepsilon_2 = \frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{\alpha_B V}{g} \right); \varepsilon_3 = \frac{q' V^1}{g F'} \quad (2.9)$$

Оценка веса членов  $\frac{\varepsilon_1}{I}, \frac{\varepsilon_2}{I}, \frac{\varepsilon_3}{I}$ , по данным только нескольких специальных измерений показала, что максимальная величина  $\frac{\varepsilon_1}{I}$ , достигает 55 %, а  $\frac{\varepsilon_2}{I} = 19$  %. В тоже время величина  $\frac{\varepsilon_3}{I}$ , по данным расчётов примерно по ста рекам в среднем составила доли процента при максимальном значении 5%.

Следовательно, в расчётах по уравнениям (2.7) величиной  $\frac{\varepsilon_2}{I}$ , можно пренебречь. Величины  $\frac{\varepsilon_1}{I}$  и  $\frac{\varepsilon_3}{I}$ , являются значимыми и пренебрегать ими нельзя. К сожалению, использовать эти уравнения для практических расчётов не представляется возможным. Это обусловлено отсутствием методики расчётов ряда входящих в них параметров ( $V^l$  и других).

Следует также отметить работу М.Ю.Захарченко. Разработавшую методику расчёта средней скорости всего руслопойменного потока. Данная методика основана на одном из законов физики о равенстве импульса силы изменению количества движения. Полученная ею формула имеет вид:

$$V = (V_P + V_n \cos \alpha) + \frac{\sqrt{A - (Q_P + Q_{\Pi})(B - C)}}{(Q_P + Q_{\Pi})} \quad (2.10)$$

Где:

$$\begin{aligned} A &= (Q_P + Q_{\Pi})^2 (V_{\Pi} - V_P \cos \alpha)^2; \\ B &= (Q_P V_P^2 - 2V_P V_{\Pi} (Q_P - Q_{\Pi}) \cos \alpha); \\ C &= Q_{\Pi} V_{\Pi}^2 (2 \cos \alpha + 1); \end{aligned}$$

Известны так же исследования по применению системы уравнений, используемых при решении плановой задачи, к расчёту пропускной способности пойменных русел. Не останавливаясь на детальном анализе этой методи-

ки, отметим лишь, что имеющиеся ограничения применению этой системы не дают возможности использовать эту методику в практических расчётах. Широкого распространения эта методика не получила. И её эффективность оценивалась только её автором.

Как вытекает из анализа приведённых методик, они позволяют с достаточной для практики точностью рассчитывать гидравлические сопротивления и пропускную способность пойменного русла при взаимодействии потока в нём с пойменным. В то же время необходимы дальнейшие исследования на основе качественной натурной информации для обоснованного внесения изменений в таблицы коэффициентов шероховатости, учитывающих влияния эффекта взаимодействия потоков на значения последних.

### 3. Оценка точности и надёжности исходной информации

#### 3.1 Оценка точности максимальных расходов воды при экстраполяции кривых $Q = F(H)$

Однозначно ответить на вопрос о точности экстраполяции кривых расходов воды не представляется возможным, особенно при пропуске паводков по затопленным поймам. Поэтому принята методика построения единой кривой расходов воды. При этом экстраполяция любым способом допускается только, если неосвещённая измерениями часть амплитуды уровней не превышает 20 % и при этих уровнях отсутствуют резкие переломы поперечного профиля, то есть, при наличии затопленной поймы должно быть не менее 2-3

измерения расходов воды русловых и пойменных потоков.

В последние десятилетие в связи с общим состоянием экономики из-за сокращения финансирования стало резко снижаться качество исходной информации, и сейчас надёжность информации невелика.

Как уже указывалось, максимальные за год расходы получают методом экстраполяции кривых расходов воды. Точность экстраполяции зависит не только от качества исходной информации, но и степени освещённости верхней части кривой расходов воды. Точность полученных таким образом величин максимальных расходов воды не превышают 30-40 %. Ещё ниже точность исходной информации, полученной на основе полевых обследований водотоков и меток высоких вод.

В этом случае расчёт пропускной способности речных русел основан на теории равномерного движения, то есть, на применении формулы Шези:

$$Q = Q_p + Q_n = F_p V_p + F_n V_n$$

Оценка точности расчётов параметров этого уравнения определяется следующим образом:

- средняя скорость потока ( $V$ ) определяется с точностью 2-10%;
- морфометрические характеристики русла и поймы ( $h$  и  $F$ ) определяются с точностью до 3-5 % с помощью нивелировки и промеров;
- значительно сложнее определение и расчёт уклонов водной поверхности и коэффициентов Шези ( $I$  и  $C$ ). Обычно уклон водной поверхности принимают равным уклону дна водотока, а последний определяют нивелировкой. Точность такого определения значительно меньше 20 - 25 %

### 3.2 Оценка точности и надёжности таблиц для определения коэффициента шероховатости

В практике существует большое количество формул для расчётов коэффициентов Шези, основанных на коэффициенте шероховатости  $n$ , величина

на которого устанавливается по специальным таблицам.

Одной из широко используемых при расчётах и простейшей в настоящее время считается формула Маннинга:

$$C = h^{1/6}/n, \quad (3.1)$$

где  $n$  – коэффициент шероховатости.

Н.Н. Павловским была предложена зависимость, рекомендованная для значений  $h$  от 0,10 до 3,0 м и  $n$  от 0,011 до 0,04 в виде:

$$C = h^y/n, \quad (3.2)$$

где  $y = 2,5 n + 0,13 - 0,75 \sqrt{h}(\sqrt{n} - 0,1)$

$y$  – является функцией коэффициента шероховатости и гидравлического радиуса  $R$ , дающая следующие приближённые значения определяются по формулам:

при  $R \leq 1,0$  м  $y \approx 1,5\sqrt{n}$

$R > 1,0$  м  $y \approx 1,3\sqrt{n}$

Действие формулы Н.Н.Павловского ограничивается радиусом  $R \leq 3$  м и  $n < 0,04$ , но позднее на основе анализа данных, он пришёл к выводу об использовании формулы до  $R = 5$  м.

Из других формул следует отметить полуэмпирическую формулу логарифмического типа И.И.Агроскина [7]

$$C = \frac{l}{n} = 17.72 l g R. \quad (3.3)$$

На основе выявления изменчивости «универсальной постоянной Кармана» В.Т.Талмаза [7] усовершенствовал формулу И.И.Агроскина и предложил для расчётов коэффициента Шези следующее выражение:

$$C = \frac{l}{n} (21 - 100n) l g h,$$

где  $h$  – глубина потока (равная  $R$ ).

Все эти формулы получены на основе различных, часто несопостави-



мых по  $R$  или  $h$  натурных данных, что приводит к некоторым расхождениям расчётных значений  $C$ .

Например, формула Гангиле-Куттера, в которой кроме отмеченных  $R$  и  $h$ , используются значения уклона водной поверхности [4]:

$$C = (23 + 1/n + 0.0015/l) / (l + (23 + 0.00155 / l) n / R).$$

В ней много общего с формулой Маннинга.

Наиболее известными таблицами для определения коэффициентов шероховатости являются таблицы М.Ф.Срибного, В.Т.Чоу, Дж.Бредли, И.Ф.Карасева, в основе построения которых лежит описание сопротивлений русла и поймы. Практически во всех таблицах для определения  $n$  приведены их интегральные значения. Оценка этих таблиц впервые была выполнена Н.Б.Барышниковым, и является единственной, хотя в ряде работ указывалось на необходимость дополнительного учёта влияния глубин на величины коэффициентов шероховатости. Прежде, чем перейти к оценке таблиц для определения коэффициентов шероховатости, рассмотрим, как эти коэффициенты определяются по натурным данным, и оценим, какие при этом делаются допущения. Во всех известных формулах в качестве основного параметра используют коэффициент Шези, который определяют по натурным данным на основе формулы равномерного движения то есть формулы Шези:

$$C = V / \sqrt{hI}$$

Таким образом, первым является допущение о равномерности движения воды в реках, что особенно для пойменных русел может привести к большим погрешностям расчётов. Недоучитывается влияние массообмена, неравномерности и нестационарного<sup>TM</sup> движения. Данные факторы должны быть дополнительно учтены в таблицах. Влияние нестационарного<sup>TM</sup> движения на незарегулированных реках мало и им вполне можно пренебречь [9]. Неравномерность, движения и массообмен значительно влияют только на пойменные участки, где на эффект взаимодействия между русловым и пойменным потоком, зависящей от особенностей морфологического строения

расчётного участка, затрачивается значительное количество энергии потока.

Коэффициент шероховатости изменяется в значительном диапазоне при изменении уровней воды. Поэтому в качестве расчётного принимались три его значения – при минимальном, среднем и максимальном уровнях воды.

Для каждого из них были определены отклонения табличных величин от расчётных:

$$n = n_p - n_{\text{таб.}}$$

Далее были вычислены величины среднеквадратических отклонений для всех рек и их отдельных групп. Однако анализ таблиц показал, что надёжность табличных величин недостаточна, а средняя погрешность определения коэффициентов шероховатости составляет 30 -35%.

Оценка доли каждой из составляющих правой части уравнения (3.1) выполнена Н.Б.Барышниковым в монографии [5] на основе анализа общеизвестных таблиц М.Ф.Срибного, В.Т.Чоу, Дж.Бредли. При этом получены довольно интересные результаты, характеризующие вес отдельных видов сопротивлений русел движению потоков. Однако, в этих таблицах имеются существенные расхождения в оценке влияния различных факторов, что в какой-то степени объясняется недостаточностью описательной характеристики гидравлических сопротивлений и значительным различием в объёме используемой исходной информации.

К наиболее распространённым в нашей стране таблицам коэффициентов шероховатости относится в первую очередь таблица М.Ф.Срибного, опубликованная её автором в 1932 году и усовершенствованная им же в 1962 году. К более современным относится таблица, составленная И.Ф.Карасёвым в 1980 году и основанная на анализе обширных данных натуральных наблюдений и табличных значений коэффициентов шероховатости других авторов. Из зарубежных - наиболее распространёнными являются таблицы В.Т.Чоу и Дж.Бредли.

Таблицы Срибного в сокращённом варианте содержат средние значе-

ния коэффициентов  $n$  для девяти категорий естественных русел. Значение  $n$  изменяется в ней в пределах от 0.025 до 0.20. полные таблицы Срибного составлены отдельно для равнинных и горных рек. В каждой из них содержатся двенадцать категорий описаний поверхностей торможения со значениями коэффициента шероховатости в пределах от 0.020 до 0.20. Наряду с описанием характеристик русел и пойм, в таблице для горных рек и периодических водотоков для большинства категорий указывается гидравлический уклон  $I$ . При этом принят следующий постулат: чем больше  $I$ , тем больше  $n$  [Б]. Отличительная и важная особенность таблиц состоит в том, в них нашла отражение принципиально правильная точка зрения Павловского о непостоянстве показателя  $u$  в формуле для коэффициента Шези.

Чоу в своих таблицах обобщил данные различных авторов, имеющиеся в США, проиллюстрировав цветными фотографиями участки русел рек и каналов. Для всех категорий русел приведены средние, минимальные и максимальные значения коэффициентов шероховатости, которые изменяются от 0.025 до 0.16.

Таблица Дж.Бредли во многом близка к таблице Чоу. Значения коэффициентов шероховатости приводятся отдельно для русел рек с шириной поверхности при паводочном уровне менее 30 м, и с шириной поверхности более 30 м. Значения коэффициентов шероховатости изменяются в пределах от 0.03 до 0.16.

Все таблицы составлены 15-30 лет назад и это приводит к необходимости их критической оценки на основе накопленной натурной информации. По данным исследований Н.Б.Барышникова [2], средняя погрешность определения коэффициентов шероховатости, составляющая 30-50 % по таблицам, значительно превышает допустимые, а наибольшие отклонения, достигающие 400-500 %, вообще неприемлемы. Это свидетельствует о необходимости совершенствования таблиц или поиска принципиально новых подходов в решении проблемы оценки сопротивлений движению потоков в речных руслах, основанном на системном подходе, требующему принципиальных изме-

нений в системе наблюдений и измерений на стационарной сети наблюдений, в проведении комплексных полевых работ в руслах, на поймах и бассейнах.

В Таблице 3.1 представлены результаты расчета относительных характеристик русла для 32 водотоков РФ. В Таблице 3.2 приведены сведения о реках, данные по которым используются в расчетах.

Таблица 3.1

N	река	год	Fkm2	B/h	C65	п	l‰	h, м	Log F	n/n	C/C	h/h
1	Алдан	1963	514000	81.8	45.4	0.034	0.082	11.3	5.711	1	0.998	1
	Алдан	1965	514000	90.3	44.2	0.036	0.066	9.99	5.711	0.999	0.999	0.999
2	Амудиса	1965	240	119	28.3	0.031	3.49	0.36	2.3802	1	1	1
3	Вилкой-Усть-	1965	57300	91.04	33.2	0.039	0.25	4.21	4.7582	1	0.999	1
4	Вилкой-Ч.	1961	136000	35.9	48.3	0.032	0.157	7.8	5.1335	0.999	0.999	1
		1962	136000	33.7	42.5	0.035	0.203	8.3	5.1335	0.999	1.001	1.001
		1963	136000	45	29.45	0.047	0.045	5.25	5.1335	1	1	0.999
5	Витим-	1963	18200	81.7	21.7	0.059	0.35	2.35	4.2601	1.002	1	1
		1965	18200	123.5	80.23	0.046	0.109	1.262	4.2601	1	1.001	0.999
6	Иргичээн	1965	3090	61.1	38.6	0.04	0.534	1.6	3.49	1	1	1
7	Калакан	1963	10700	36.3	31.1	0.039	0.46	3.25	4.0294	1.001	0.999	1
		1965	10700	35.7	27.1	0.046	0.508	3.35	4.0294	0.999	1.002	1
8	Калар	1965	447	178	31	0.032	1.02	0.94	2.6503	1.001	1	1
9	Катугин	1965	1140	32.2	5.51	0.0274	0.546	2.372	3.0569	0.009	0.009	1
10	Кэнкэмэ	1963	3550	9.1	32.1	0.031	0.23	0.25	3.5502	1.001	0.999	1.003
		1965	3550	10.46	40	0.073	0.19	0.885	3.5502	0.999	1	1.028
11	Лена	1963	4690	38.7	36.2	0.031	0.31	1.86	3.6712	1.002	1	1
		1065	4690	37.6	38.2	0.03	0.33	1.92	3.6712	1	1	1.001
12	Миня	1963	4800	60.6	41.1	0.029	0.25	2.52	3.6812	1	1.025	1
		1965	4800	48.9	61.2	0.021	0.171	3.01	3.6812	1	1	1
13	Могой	1965	633	61.5	36.5	0.026	0.268	0.5	2.8014	1	1	1
		1966	633!	25	25.8	0.043	0.255	1.47	2.8014	0.999	0.999	1
		1967	633	31.5	22.5	0.047	0.337	1.25	2.8014	0.813	1.336	1.458
		1968	633	30.8	21	0.05	0.421	1.14	2.8014	1.001	1	1
		1969	633	38.3	26.3	0.038	0.29	0.996	2.8014	1	1	0.997
14	Пеледуй	1963	13600	61.2	17.2	0.067	0.87	1.75	4.1335	1.001	1.005	1
		1965	13600	69.9	19.1	0.057	0.36	1.39	4.1335	0.999	1	1.001
15	Половинная	1963	175	18.1	18.3	0.054	2.62	0.48	2.243	0.999	1.002	1
		1965	175	19.7	19.6	0.049	1.67	0.42	2.243	0.999	0.999	1
16	Правая	1963	1450	47.4	36.7	0.027	1.56	0.73	3.1614	1.001	1	1
		1965	1450	46.6	40.6	0.024	1.33	0.8	3.1614	1.001	1.001	1
17	Сюльбан	1961	840	33.1	30.2	0.041	0.332	1.547	2.9243	1	1	1.001
		1962	840	34.8	30	0.037	0.379	1.267	2.9243	1	1	1.002
		1963	840	30.6	42.7	0.026	0.467	1.474	2.9243	1.001	1	0.999
		1964	840	21	27.8	0.051	0.387	2.097	2.9243	1	1	1.008
18	Таюра	1963	5720	134	34	0.03	1.05	1.11	3.7574	1	1	1
		1965	5720	123	50.1	0.021	0.51	1.16	3.7574	1	1.001	1
19	Тачна	1958	1920		36.9	0.028	0.242	0.968	3.2833	1	1	1
20	Томь	1963	57800	204.8	11.71	0.119	0.194	3.189	4.7619	0.996	1	1

21	Тимптон	1963	13300	50.8	31.9	0.04	0.44	3.63	4.1239	0.999	1.001	1
		1965	13300	54.5	31.2	0.04	0.38	3.45	4.1239	0.999	1	1
22	Тира	1963	5070	76.2	31.9	0.032	1.2	1.02	3.705	1.001	0.999	0.999
		1965	5070	90	23.4	0.042	1.27	0.82	3.705	0.999	1.001	0.999
23	Тулдунь	1963	680	39.8	13.3	0.089	1.3	1.21	2.8325	1	1	1
		1965	680	74.2	20.4	0.059	1.32	0.68	2.8325	1	0.998	1.077
24	Тутура	1963	7100	48.3	25.4	0.043	0.27	1.43	3.8513	1.001	1	1.001
		1965	7100	38.7	29.5	0.043	0.38	1.96	3.8513	1.001	1	0.999
25	Ципа	1963	15600	72.9	27.5	0.044	0.225	2.21	4.1931	0.999	0.999	0.999
		1965	15600	71.7	37.9	0.03	0.066	2.15	4.1931	1.001	1.001	1
26	Ципикан	1963	5990	47	33.9	0.034	0.72	1.45	3.7774	1	0.999	1.001
		1965	5990	47.5	21.5	0.055	0.84	1.15	3.7774	1	1	1.001
27	Чанчур	1963	577	23.5	16.4	0.06	3.2	0.79	2.7612	1	1	1
		1965	577	23	14.6	0.081	2.93	0.79	2.7612	1	0.999	1
28	Чара	1962	1320	78.4	33.4	0.031	0.721	0.97	3.1206	1	1	1.001
		1963	1320	75.3	31.2	0.032	0.905	1.09	3.1206	1.001	1	1
		1964	1320	65.3	35.8	0.03	0.78	1.05	3.1206	1	1	1
		1965	1320	80.1	46	0.022	0.461	0.93	3.1206	1.001	0.999	1
		1966	1320	50.9	36.2	0.031	0.615	1.52	3.1206	0.999	1	1
		1967	1320	57.1	41.4	0.026	0.315	1.18	3.1206	1.002	0.992	1
		1968	1320	508	35.5	0.032	0.456	1.25	3.1206	0.999	1	1.001
		1969	1320	61	37.1	0.032	0.375	0.93	3.1206	1.001	0.998	0.981
29	Чина	1965	320	48.2	26.9	0.037	0.77	0.71	2.5051	1	1.001	1
30	Чимирикм	1963	1510	1.13	65.1	0.013	0.175	0.174	3.179	1	1	1.001
31	Чона	1963	37700	646	46.5	0.026	0.068	4.33	4.5763	0.999	0.999	1.001
		1965	37700	81	47.6	0.025	0.055	2.91	4.5763	1	1.001	0.999
32	Яна	1963	45300	99.9	62.1	0.025	0.098	2.89	4.6561	1.001	1.001	1
	Среднее		29518.7	61.78	33.52	0.0402	0.646	2.119	3.6058	0.982	0.99	1.008

Таблица 3.2. Сведения о реках, данные по которым используются в расчетах

N	УГМС	Количество рек	Примечание
1	Северо-Западное	1	По реке Томь использовались
2	Иркутское	11	
3	Якутское	19	

### 3.3. Анализ расчётных зависимостей

В настоящей работе, из числа других методов целесообразно предложить, к разработке, методику расчёта коэффициентов шероховатости для определения русловых сопротивлений и подтверждения различных типов зависимостей от глубины. Цель методики сводится к попытке понять механизм и комплекс процессов влияющих на движения потока, если так можно выразится, при нетрадиционном взгляде на эту проблему, для возможности решения практических задач при помощи несложных расчётов. При этом исключая использования неточных (ошибки при измерениях возникающих по различным причинам и другое), или заведомо непригодных (разрозненность данных) для создания целостной системы закономерности, если таковые проявятся, полученной посредством анализа данных при наблюдении множества объектов различных типов в географических зонах.

Определения русловых сопротивлений по принципу сравнения уровня воды в измеренном створе, при определённом расходе, с тем уровнем, который получится расчётным путём. Приведённых в формулу тех же значений расхода воды, площади поперечного сечения и уклона на наблюдаемом створе. Разница между наблюдаемым уровнем и тем уровнем который получится в результате вычислений будет выражена значением, которое на дальнейшем этапе определения руслового сопротивления будет использовано.

В качестве исходных натуральных данных отбирались данные о расходах воды, площадях водного сечения, скоростях течений, ширине и глубине русел, уклонах водной поверхности по постам бассейна реки Томь.

По исходным данным - средней скорости, глубине руслового потока и уклону водной поверхности для каждого измеренного расхода по формуле Шези, были определены значения коэффициентов Шези:

$$C = V/\sqrt{hI} \quad (3.9)$$

Затем на их основе и формуле Маннинга определялись значения коэффициентов шероховатости:

$$n = h^{1/6}/C \quad (3.10)$$

Эти сведения были использованы для выявления влияния глубин и других характеристик на значение коэффициентов Шези и шероховатости. С этой целью для всех исследуемых объектов были построены зависимости

$$n = f(h) \text{ и } C = f(h) \quad (3.10)$$

Следует отметить, что зависимость  $C = f(h)$  является зеркальным отображением зависимости  $n = f(h)$ .

В тоже время из-за различия размеров исследуемых объектов и положения нулей графиков постов выявить характер зависимостей и выполнить их типизацию в абсолютных координатах не представляется возможным. Поэтому построены соответствующие кривые, но в относительных координатах  $n/n = f(h/h)$  и  $C/C = f(h/h)$ .

Удалось произвести типизацию кривых зависимостей

$$n/n = f(h/h) \text{ и } C/C = f(h/h).$$

Анализ характера этих кривых позволил установить наличие двух основных и нескольких вспомогательных их подтипов, характерных как для равнинных, так и для горных и полуплоских рек.

Первый тип, наиболее часто встречающийся на равнинных реках, рисунок 3.2, характеризуется увеличением коэффициента шероховатости при увеличении глубины. К нему относятся реки, берега которых интенсивно заросли растительностью включая кустарники и деревья, и режим движения наносов, на которых может существенно изменяться.

Ко второму типу относятся реки с хорошо разработанными руслами и не заросшими берегами, для которых характерно уменьшение коэффициентов шероховатости при увеличении глубин, рисунок (3.3). Этот тип кривых зависимостей  $n/n = f(h/h)$  наиболее часто встречается на горных и полуплоских реках, что объясняется значительно чаще встречающимся зарастанием берегов на равнинных реках, чем на горных и отсутствием на последних донно-грядовой фазы перемещения наносов.

Вспомогательные типы кривых характеризуются более сложным ха-

рактором изменения коэффициентов шероховатости при увеличении глубин. При увеличении последних увеличение коэффициентов шероховатости может изменяться на их уменьшение или наоборот, уменьшение коэффициентов шероховатости может смениться их увеличением.

Как видно из графиков Приложения 1 интенсивность изменения коэффициентов шероховатости при увеличении или уменьшении глубин различна. Она зависит от степени зарастания и засорённости берегов не только в створе измерений, но и на участках расположенных вблизи него, а также от видов и формы перемещения наносов, наличия и расположения различных видов русловых образований (перекатов, осередков, островов и пр.).

Значительное изменение коэффициентов шероховатости при незначительном увеличении глубин, наблюдающееся на ряде рек, объясняется влиянием песчано - илистого или песчано - каменистого дна, формы сечения русла и других факторов. На ряде рек, особенно больших, наблюдается незначительное изменение коэффициентов шероховатости при значительных изменениях глубин, что можно объяснить малым влиянием берегов русел.

Для рек характерной зависимости,  $n/n = f(h/h)$  которых занимает среднее положение в пучке аналогичных кривых, характерны как извилистость, не разветвлённость, песчаные грунты, так и, деформации русел. Последние так же оказывают существенное влияние на величину  $n$ .

Для второго типа характерны аналогичные различия в степени изменения  $n$  при изменении глубин. Влияние зарядных берегов, значительных деформаций, а также зарастания русел в межень приводит к тому, что при малых уровнях гидравлические сопротивления больше, чем при больших. Существенное значение здесь имеют русловые деформации.

Наименьшая интенсивность уменьшения коэффициентов шероховатости с глубиной характерна для разветвлённых русел с большой амплитудой изменения уровня воды. При этом скалистые, валунно - галечные или каменистые русла с включением песка и ила могут незначительно деформироваться. При «затухании» влияния дна и большой амплитуде уровня интен-



сивность уменьшения величин  $n$  будет меньше, чем в предыдущем случае.

Осреднённое положение кривой  $n/n = f(h/h)$  для второго типа характерно как для прямолинейных, так и для умеренно - извилистых русел, сложенных песком, галькой, валунами или щебнем, с поросшими берегами и не значительными деформациями.

Более сложные типы зависимостей  $n/n = f(h/h)$  характеризуются увеличением, а затем уменьшение коэффициентов шероховатости при увеличении глубин, а четвёртый - характеризуется уменьшением, а затем увеличением коэффициентов шероховатости при увеличении глубин.

Объяснение природы третьего и четвёртого типов зависимостей в полной мере невозможно без учёта сведений и русловых деформациях и других материалов.

Это подтверждает тот факт, что к третьим и четвёртым типам может относиться одна и та же река. Пятый тип зависимости коэффициента шероховатости от глубины, характеризующейся относительным постоянством значений « $n$ », наиболее часто встречается на больших, а так же на зарегулированных реках.

Можно выделить ряд факторов, которые либо вообще не учтены в таблицах, либо их учёт выполнен не полностью. К таким факторам следует отнести глубины, форму сечения русел и частично размеры реки.

Это не полный перечень недоучтённых в таблицах факторов. Однако даже их учёт позволил бы повысить точность определения значений коэффициентов шероховатости.

Анализ графиков  $n/n = f(h/h)$  позволил выделить два основных типа кривых. К первому относятся реки, берега которых заросли растительностью, включая кустарники и деревья, что наиболее характерно для равнинных рек. Этот тип кривых характеризуется увеличением коэффициентов шероховатости при увеличении глубин. Ко второй группе относятся реки с хорошо разработанными росшими руслами, для которых характерно уменьшение коэффициентов шероховатости при увеличении глубин. Этот тип кривых зависи-

мостей  $n/n = f(h/h)$  наиболее часто встречается на горных и полуплоских реках, что объясняется значительно чаще встречающимся зарастанием берегов на равнинных реках, чем на горных.

## Заключение

Выполненные расчёты и анализ их результатов позволяют сделать следующие выводы и рекомендации:

- практически все таблицы для определения коэффициента шероховатости либо не учитывают, либо недоучитывают влияние глубин на коэффициенты шероховатости. Погрешность расчётов, при их использовании, может достигать нескольких сотен процентов;
- установлено, что максимум значений коэффициента Шези соответствует относительной ширине русла  $B/h$  примерно равной 25 - 30;
- методика расчётов гидравлических сопротивлений, основанная на таблицах для определения коэффициентов шероховатости, имеет низкую точность и требует дальнейшего совершенствования. Погрешности при этом

существенно превышают требуемую точность расчётов;

- подтверждено наличие четырёх типов зависимостей коэффициентов шероховатости и Шези от средних глубин русел;

- наиболее перспективным путём решения проблемы является разработка методики расчётов, основанной на рассмотрении системы бассейн - речной поток - русло, как саморегулирующейся;

установлено, что перегиб кривых  $C = f(B/h)$  и  $n = f(B/h)$  наблюдается при значении  $B/h \approx 50$ , что существенно отличается от результатов, полученных И.Ф. Карасёвым для каналов и А.В. Симановичем для речных русел.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Барышников Н.Б. Гидравлические сопротивления речных русел. - СПб: издательство РГГМУ, 2003.-147с.
2. Барышников Н.Б., Самусева Е.А. Системный подход к оценке сопротивления речных русел. - СПб: РГТМИ, 1992. с. 3 - 65.
3. Барышников Н.Б., Попов И.В. Динамика русловых потоков и русловые процессы. - Л.: Гидрометеиздат, 1988. - 456 с.
4. Барышников Н.Б. Антропогенное воздействие на русловые процессы. - Л: Гидрометеиздат, 1990. - 190 с.
5. ГорДж.А. Восстановление и охрана малых рек, теория и практика. Агропромиздат, 1989. - 317 с.
6. Гончаров Р.Н. Динамика русловых потоков. Л: Гидрометеиздат, 1962. - 375с.

7. Горбачёв П.Ф. Формулы средней скорости. М.-Л., ОНТИ, 1936, 171 с.
8. Железняков Г.В. Пропускная способность русел каналов и рек. - Л.: Гидрометеиздат, 1981. - 278 с.
9. Знаменская Н.С. Гидрологическое лабораторное моделирование. - Л.: Гидрометеиздат, 1992.
10. Ю.Зегжда А.П. Гидравлические потери на трение в каналах и трубопроводах. Л.: М.: Госстройиздат, 1980
11. Чугаев Ф.Р. Гидравлика. - Л.: Энергоиздат, 1982. - 341 с.