



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

Кафедра водно-технических изысканий

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
(бакалаврская работа)

На тему Исследования турбулентного
потока на одиночном изгибе

Исполнитель Мокренских София Романовна
(фамилия, имя, отчество)

Руководитель К.Г.Н., доцент
(ученая степень, ученое звание)

Исаев Дмитрий Игоревич
(фамилия, имя, отчество)

«К защите допускаю»
Заведующий кафедрой


(подпись)

К.Г.Н., доцент
(ученая степень, ученое звание)

Исаев Дмитрий Игоревич
(фамилия, имя, отчество)

«5» 06 2023г.

Санкт-Петербург
2023

ОГЛАВЛЕНИЕ

| | |
|--|----|
| Введение..... | 2 |
| Глава 1 Теоретические основы исследований турбулентных потоков | 3 |
| 1.1 Теории турбулентности..... | 4 |
| 1.2 Структура турбулентного потока..... | 10 |
| 1.3 Касательное напряжение в турбулентном потоке | 12 |
| 1.4 Теоретическое описание турбулентного потока на одиночном изгибе | 13 |
| 1.5 Поведение турбулентного потока на повороте в лабораторных условиях | 14 |
| Глава 2 Лабораторное исследование турбулентного режима на одиночном изгибе жесткого русла | 16 |
| 2.1 Исходная информация..... | 17 |
| 2.3 Методика проведения эксперимента при коэффициенте асимметрии, взятой как интенсивность турбулентности | 24 |
| Глава 3 Выводы | 26 |
| Заключение | 32 |
| Список использованной литературы..... | 34 |

Введение

В теории турбулентности говорится о том что, характеристика турбулентности связана с гидравлическим сопротивлением (Теория Ньютона-теория о внутреннем трения).

Практическая значимость состоит в то что, если будем знать, как характеристики турбулентности связаны с гидравлическим сопротивлением, то можем не использовать формулу Шези, а перейдем к более совершенной формуле.

Поскольку природные потоки не бывают прямолинейны, это всегда повороты, а изучение режимов сопротивления на повороте, связано с определенными трудностями, в частности с перекосами уклона свободной поверхности, именно поэтому итоговой целью является- связать характеристики турбулентности с режимом сопротивления. Но на данном этапе мы изучаем более узкую задачу.

Задача исследования состоит в том, чтобы наглядно рассмотреть, как меняются характеристики турбулентности в различных условиях, в частности на повороте жесткого русла.

Цель работы заключается, выяснить как изменяются характеристики турбулентности на повороте.

Для достижения поставленных цели и задачи, надо использовать микровертушку, с помощью которой будут измеряться скорости течения на каждом из створов. А после определить меру турбулизации потока, и наглядно рассмотреть изменения.

Глава 1 Теоретические основы исследований турбулентных потоков

В настоящее время понятие «турбулентность речных потоков» трактуется достаточно обширно.

Турбулентные пульсации тяжело отслеживать, так как скорость в одном месте одна, а в другом уже другая, поэтому между собой нужно сравнивать вариации этих пульсаций.

Важно подчеркнуть, что турбулентные вихри непрерывны и постоянно соприкасаются друг с другом, причем большие вихри содержат в себе вихри меньших размеров. Одновременно с вихревой интерпретацией, турбулентность трактуется как волновой процесс. Наблюдения за явлением турбулентности восходят еще к Леонардо да Винчи, который, несомненно, интересовался турбулентностью, о чем можно судить по его зарисовке, воспроизведенной на Рисунке 1. [3]



Рисунок 1- Очень ранние наблюдения турбулентности: рисунок Леонардо да Винчи (около 1500 г.)

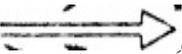
Характеристики турбулентного режима оказывают влияние на гидравлические характеристики потока, морфологическое строение русла, а, следовательно, и на режим перемещения наносов, и на развитие руслового процесса в целом.

Для изучения турбулентности потока, надо начать с теоретической основы, на которые будут опираться дальнейшие исследования.

1.1 Теории турбулентности

Теория турбулентности М. А. Великанова заключалась в том, что он представлял поток, в виде системы больших катящихся вихрей, приводящие мелкие вихри, другой структуры, в противоположенное движение.

Скоростной поток он делили на три компонента;

- Поля осредненных скоростей 

- Поля структурных пульсационных скоростей 

- Поля случайных пульсационных скоростей 

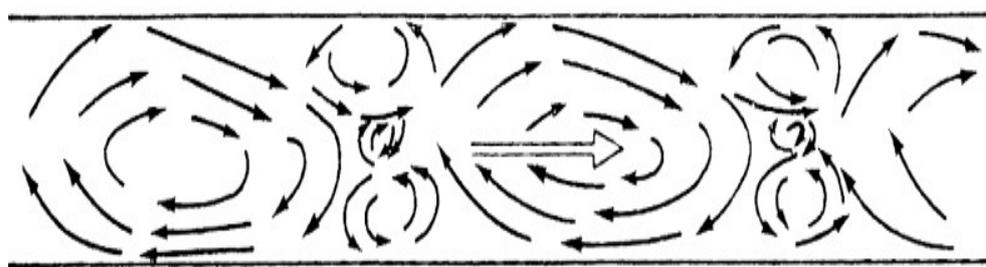


Рисунок 2- Схема кинематической структуры потока по М.А. Великанову[2]

Клавином А. Б. был произведен эксперимент в лаборатории ГГИ. В лоток кидали ПВХ- шарики, что всплывали убирала из лотка, а то что было в середине потока оставалось. Затем, на лоток светили мощной лампой-страбоскопом. Движение потока происходило слева направо. На дне течение отсутствовало, было прилипание. После этого наблюдения была построена схема, из которой можно сказать, что макровихри, размеры которых равны ширине потока, имеют эллипсоидную форму. Внутри макротурбулентных пульсаций, имеется мезотурбулентностью. На схеме, размеры их показаны пустотелыми стрелками. Между мезотурбулентностью и макротурбулентностью- зона хаоса. Детальные наблюдения, произведенные с помощью скользящей киносъемки Клавином, показали что вихри вытянуты вдоль потока тем сильнее, чем больше места они занимают по глубине.[2]

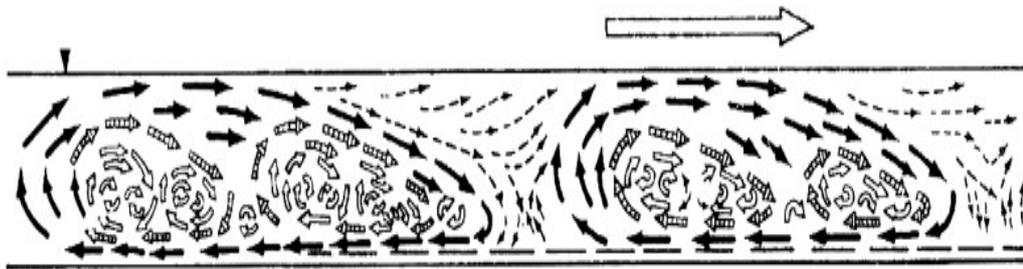


Рисунок 3- Схема кинематической структуры руслового потока, построенная по материалам лабораторных экспериментов ГГИ[2]

Гончаров В. Н. предлагает свой вариант структуры турбулентности. Он выделял в турбулентном потоке два вида структурных возмущений: первичные (или основные) вихри, которые уходя в толщу, образуют вторичные (или паразитические) структурные вихри. Первичные (или основные) возмущения, по Гончарову, зарождаются на дне в результате торможения потока стенкой и затем вторгаются в толщу потока, вызывая торможение продольно-поступательного движения и определяя основной механизм турбулентного перемешивания. Вторичные структуры, по мнению Гончарова, возникают под действием градиента осредненного течения и заполняют в поперечном направлении весь объем потока. Эти структуры имеют форму эллипсов с большой полуосью, параллельной основному направлению потока, и при движении по течению не испытывают заметных поперечных перемещений. [2]

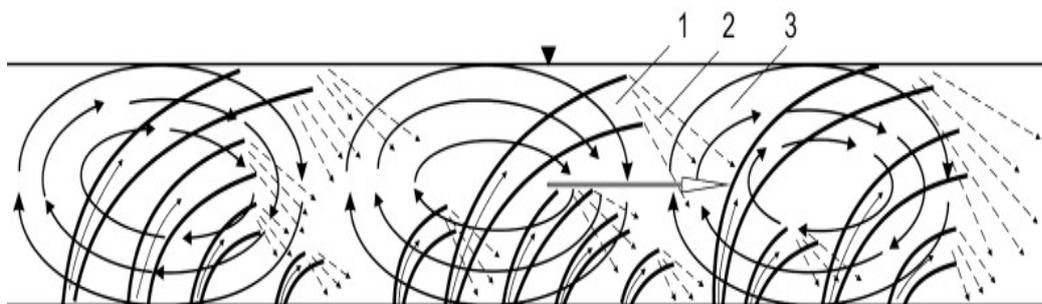


Рисунок 4- Схема кинематической структуры по Гончарову В. Н.: 1 — первичные (основные) возмущения; 2 — компенсационные (нисходящие токи жидкости); 3 — вторичные возмущения[2]

Н. Е. Кондратьев, предполагал, что микровихри обитают на дне, и по ним как по роликам, катятся макровихри, который в свою очередь заполнены микровихрями.

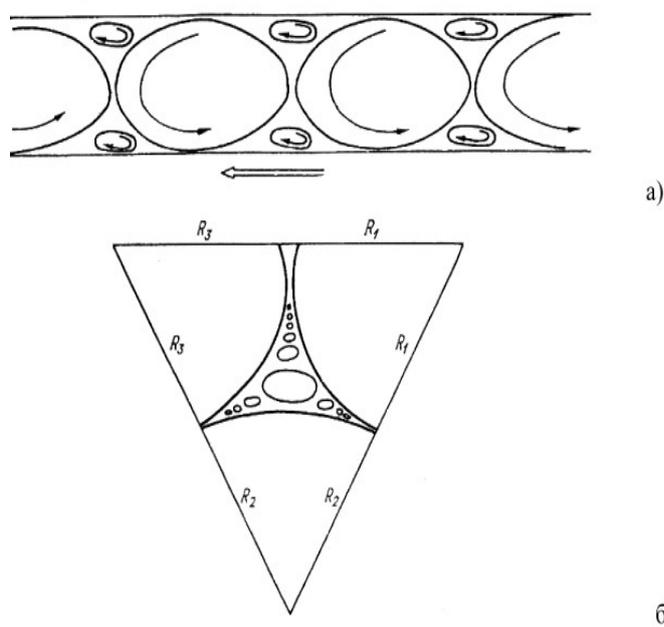


Рисунок 5- Схема кинематической структуры потока по Н.Е. Кондратьеву: а — общий вид структуры придонного слоя; б — схема заполнения промежутков между крупными вихрями[2]

К. В. Гришанин, проанализировав результаты отечественных и зарубежных работ, предполагал, что микротурбулентность существует на самом дне, так же существует зона с восходящим течением, которая плавно переходит в нисходящую. Схематизацию кинематической структуры потока Гришанин представляет в виде цепочки вихрей равной интенсивности, следующих с некоторым постоянным шагом. Центры этих вихрей расположены на середине глубины потока, а вектор вихрей, составляющих цепочку, принимается совпадающим с вектором вихря осредненного течения.[2]

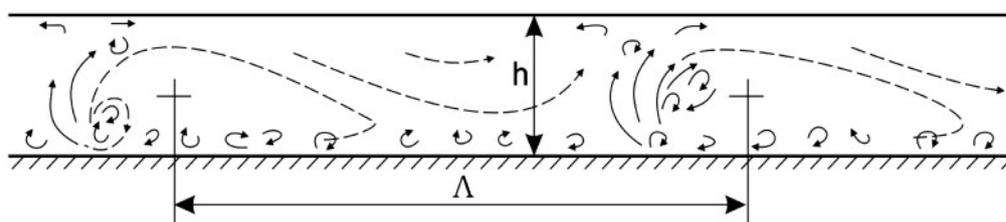


Рисунок 6- Большие вихри руслового потока по К.В. Гришанину[2]

Караушев А. В., отмечал, что турбулентное перемешивание есть в потоке вихрей, возникновение которых связано с влиянием дна и боковых стенок. Процесс возникновения, развития и разрушения вихрей, по мнению Караушева, происходит непрерывно, а внутренняя структура вихревых элементов представляется сложной: наиболее крупные первичные вихревые образования состоят из вторичных меньшего размера, вторичные — из еще более мелких и т. д.[2]

В. М. Маккавеев рассматривает турбулентный поток как сложную систему. Он предложил схему структуры турбулентного потока, в которой пульсационные вихри представляются в виде водоворотов с вертикальной осью вращения, замкнутых одним концом на дне, а другим — на свободной поверхности. Причем они чередуются, одни нисходящие, другие восходящие и так далее.[2]

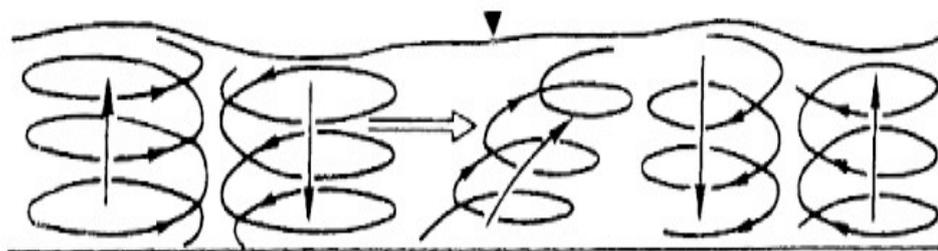


Рисунок 7- Схема кинематической структуры потока по В.М. Маккавееву[2]

Н.С. Знаменская предложила схему кинематической структуры потока при наличии на его дне песчаных подвижных гряд. В наиболее сложном варианте, когда водоворотная область подвалья оказывается неустойчивой и наблюдаются периодические выбросы завихренной жидкости из подвалья к поверхности потока, схема Знаменской состоит из четырёх фрагментов (Рисунок 8): транзитной зоны, для которой принимается потенциальный закон течения; водоворотной зоны подвалья гряды, где течение схематизируется в виде концентрических эллипсов; зоны катящихся по напорному склону гряды

водоворотов, также (как и в схеме Кондратьева) схематизируемых в виде концентрических элементов; и зоны выбрасываемой из подвала гряды завихренной жидкости. В последнем фрагменте механизм движения жидкости крайне сложен, но для условий плоской задачи и с целью упрощения общей схемы он также представлен системой восходящих к поверхности потока эллипсов. В третьем фрагменте промежутки между водоворотами первого порядка заполняются структурами высших порядков, именуемых Знаменской микровихрями.[2]

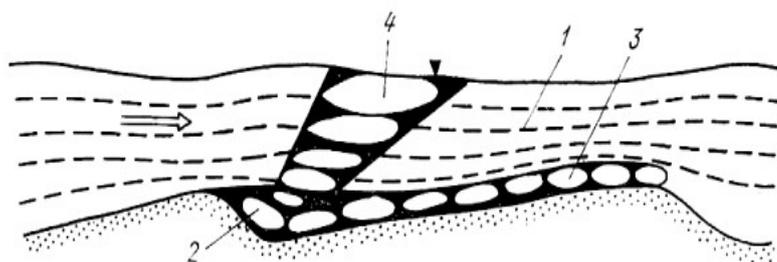


Рисунок8- Схема кинематической структуры потока при грядовой форме дна по Н.С. Знаменской:

- 1 — транзитный поток; 2 — водоворотная зона подвала гряд; 3 — зона вихрей, катящихся по напорному склону гряд; 4 — зона вихрей, вырывающихся из подвала в толщу потока[2]

Эта схема была разработана для расчета потерь энергии потока при грядовом рельефе дна с использованием формулы скорости рассеяния энергии. Выполненные Знаменской расчеты привели к выводу о том, что наименьшее количество энергии рассеивается в транзитной зоне потока, а наибольшее — в микровихрях зоны катящихся водоворотов.[2]

А.А. Таунсенд представляет структуру турбулентного потока состоящей из вихрей разного масштаба. Самые крупные вихри, по Таунсенду, получают энергию непосредственно от осредненного движения и передают ее вихрям меньшей величины. В течениях с градиентом средней скорости по вертикали большие вихри, по свидетельству Таунсенда, имеют вытянутую по течению

форму: их длина превосходит ширину по меньшей мере в три раза. Внутренняя структура больших вихрей представляется простой.[2]

По Т. Теодорсену, основным и универсальным элементом турбулентности принимаются возмущения типа закручивающихся вихревых трубок, возникающие в пристеночной области потока и названные им вихревыми подковами. Самая большая вихревая подкова, или вихревая трубка первого порядка, создается основным потоком. Возникнув, она испытывает местный изгиб, и некоторая ее часть подъемной силой увлекается в толщу потока, что и придает вихревой трубке петлеобразную форму, напоминающую подкову. Вихревая подкова оказывает сопротивление движению основного потока, в результате чего на ее поверхности образуется система вихревых трубок второго порядка, которые, развиваясь и отбирая энергию у первичной вихревой трубки, как бы разрушают ее. [2]

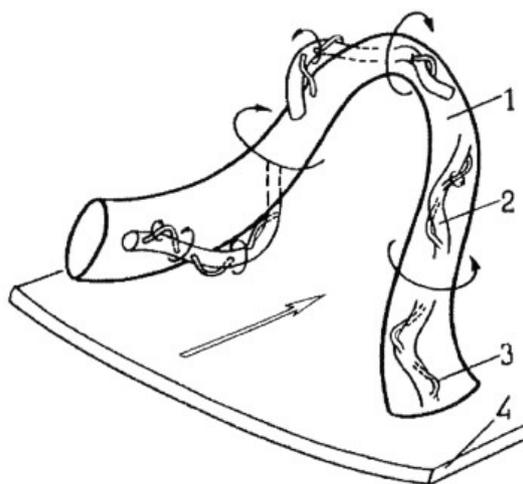


Рисунок 9-Схема кинематической структура потока по Т. Теодорсену[2]

1.2 Структура турбулентного потока

По гипотезе Прандтля Л. турбулентный поток в круглой трубе, представляется двух- слойным, состоящий из турбулентного ядра и вязкого ламинарного подслоя.

Существует пограничный слой, который представляет собой некий слой, где в любом турбулентном потоке будет наблюдаться ламинарный режим. Скорость течения в нем изменяется по хаотичному закону (как в трубе по ламинарному режиму).

По гипотезе Ньютона о внутреннем трении, касательное напряжение находится по формуле:

$$\tau = \mu \frac{dU}{dy}$$

где μ - коэффициент динамической вязкости.

На верхушке слоя, касательное напряжение, находится:

$$\tau = \mu \frac{\overline{U_{гр}}}{\delta}$$

где $\overline{U_{гр}}$ - средняя скорость слоя, δ - толщина слоя.

Преобразуя выражение выше, получается:

$$\frac{\tau}{\rho} = \nu \frac{\overline{U_{гр}}}{\delta}$$

Если взять корень из левой и правой части, получается:

$$\sqrt{\frac{\tau}{\rho}} = U_*$$

где U_* - динамическая скорость.

Возводя все в квадрат, выражение выглядит следующим образом:

$$U_*^2 = \frac{\tau}{\rho}$$

Выражение, с преобразованиями получается равно:

$$\frac{\overline{U_{\text{гр}}}}{U_*} = \frac{\delta U_*}{\nu}$$

где $\frac{\delta U_*}{\nu}$ - число Рейнольдса, на границе пограничного слоя (на верхушке ламинарного подслоя).

Вано Никурадзе установил, что число Рейнольдса на границе между ламинарным и турбулентным потоком является постоянной величиной, и по его эмпирическим экспериментам, эта константа равна двенадцати.

Толщина ламинарного подслоя, по формуле Никурадзе:

$$\delta = \frac{\nu N}{U_*}$$

По формуле Никитина, толщина ламинарного подслоя находится по формуле:

$$\delta = \frac{5,6\nu}{\sqrt{\rho g i}}$$

По формуле Гончарова, толщина ламинарного подслоя находится по формуле [1]:

$$\delta = \frac{8\nu}{U_{\Delta}}$$

1.3 Касательное напряжение в турбулентном потоке

В ламинарном потоке, касательное напряжение связано с трением между слоями. В турбулентном потоке сложнее, поэтому турбулентные пульсации рассматриваются с двух сторон: со стороны трения вязкости, и трения турбулентного обмена.

Каждая скорость потока рассматривается, как некая осредненная скорость, плюс пульсационная добавка.

Продольная скорость находится по формуле:

$$U = \bar{U} + U'$$

Где U' - пульсационная добавка.

Вертикальная скорость, за каждый момент времени, находится по формуле:

$$V = \bar{V} + V'$$

Интегрируя, получается:

$$U'V' = \frac{1}{T} \int_0^T U'V' dt.$$

В турбулентном потоке, рассматривая два соседних квадрата, предположив, что в одном продольная скорость, а в другом продольная плюс пульсационная добавка. Между ними находится площадь соприкосновения между собой (ΔW).

Если продольные скорости разные, то обмен массами жидкостей, приводят к обмену количества движения, то есть балансируются, выравниваются. Например, если один тормозит, а другой быстро двигается, то второй, начинает тормозит первый, и замедляется сам.

В турбулентном потоке, касательное напряжение состоит из следующих элементов:

$$\tau = \tau_0 + \bar{\tau}$$

Где τ_0 - касательное напряжение сил вязкости, $\bar{\tau}$ - касательное напряжение обусловленное турбулентным перемешиванием. [1]

1.4 Теоретическое описание турбулентного потока на одиночном изгибе

В основе теории Разовского, лежит гипотеза о теле вращения (в основе, стакан с чаем и сахаром).

У Гончарова, теория основана на распределении площадей:

$$V\tau = V_0 r_0.$$

Теория отражения, автором которой является Кондратьев, говорит о том, что набегающий потока от вогнутого берега, отражается под углом, равным углу набегания.

Интересно, что средняя струя, никогда не достигнет берега, так как начинает все поворачивать, то есть возникает продольно- винтовое течение.

Поток набега на стену, поджимается, и поток уходит вниз, в этом месте образуется фокус размыва. Фокусы размыва возникают в весеннее половодье, или в высокие дождевые паводки.

Несколько компенсационных вихрей нельзя измерить, но установить можно промером. Поэтому коэффициент вариации (C_v), принимается мерой турбулизации (то есть насколько возбужден поток) потока.

Входя в поворот, коэффициент вариации уменьшается в два раза, по сравнению с прямолинейным участком. Можно сказать, что на повороте, поток идёт сглажено, и сам себе меняет турбулентность, перестраивая струи.

1.5 Поведение турбулентного потока на повороте в лабораторных условиях

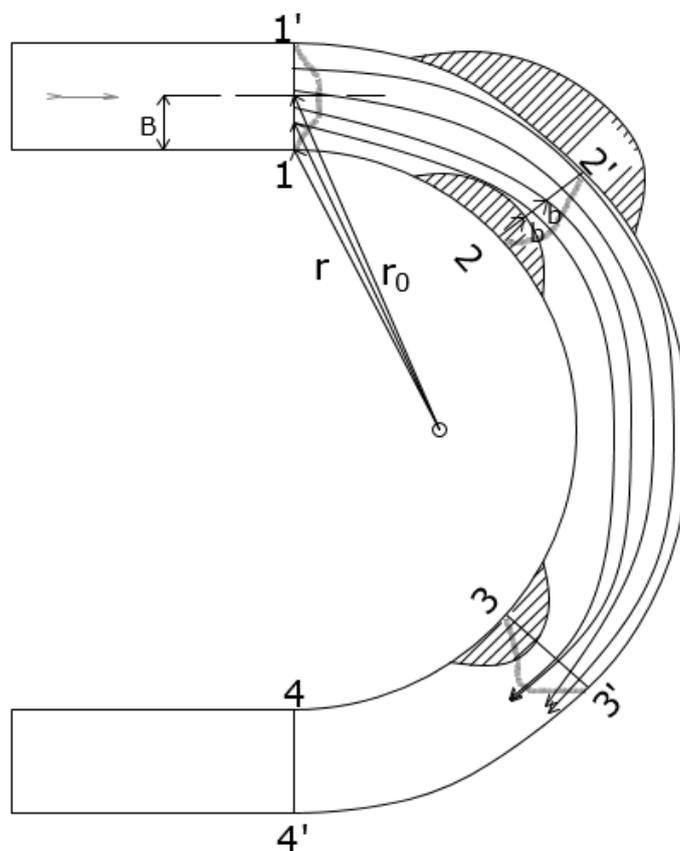


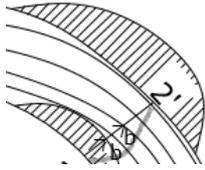
Рисунок 10- Схема одиночного изгиба в лабораторных условиях

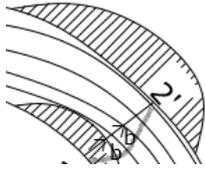
На одиночном изгибе есть такие характеристики как: r_0 -радиус поворота до середины потока (угол поворота 180 градусов), B - полуширина, r - расстояние до любой точки в любом сечении, b - расстояние от выпуклого берега до внутренней точки. $1'$ - вогнутый берег, 1 -выпуклый берег.

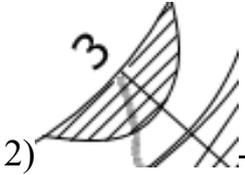
На 1 створе есть только продольный уклон, глубины одинаковые, на 2 створе максимальная скорость смещена к выпуклому берегу. На 3 створе в основном есть перепад по глубинам по вогнутому берегу, максимальная скорость смещается к выпуклому берегу.

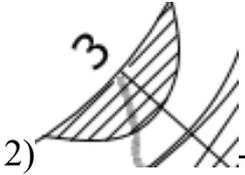
Самое главное замечание, состоит в том, что поток загоняется в жёсткие рамки, если дать потоку свободу, то он поведет себя по-другому.

Водоворотные зоны бывают двух видов:



1)  - если течение идеи плавно, то отрыва не будет, а перекося есть. Если течение быстрое, то наоборот, отрыв будет, а перекося нет.



2)  - водоворотная зона возникает сразу на выходе, за выпуклым берегом. Под третьим створом находится точка притяжения донных струй, это и есть вторая водоворотная зона.

Если кинуть горсть опилок на створ 1-1', то поверхностные скорости будут смещаться к вогнутому берегу (черные линии на Рисунке 5), первая линия не упирается в берег, так как у него есть смещение струй, но она близка к берегу.

Донное течение направлено от вогнутого берега к выпуклому. А поверхностное наоборот, от выпуклого, к вогнутому.

Интересно, но все что кинем во 2' створ, будет донным на точке три.

Второй створ считается основным створом изгиба, после этого створа, все сбивается. Если на первом и втором створе можно начертить эпюру скоростей, то на третьем створе, не получится.

Глава 2 Лабораторное исследование турбулентного режима на одиночном изгибе жесткого русла

В качестве характеристики турбулентности, принято использовать интенсивность турбулентности, которая выражается в коэффициенте вариации скоростей C_v .

Для реализации поставленных цели и задачи исследования, была взята микровертушка, с помощью которой проводились записи измерений. Исследование выполнялось на установке, моделирующей одиночный изгиб русла прямоугольного сечения русла, при условиях гладкого русла.

Перед створами находится условие входа. Весь поворот разделен на двадцать четыре створа. На каждом створе по пять вертикалей. Между створами расстояние составило десять сантиметров. Ширина самого русла равна тридцать девять сантиметров.

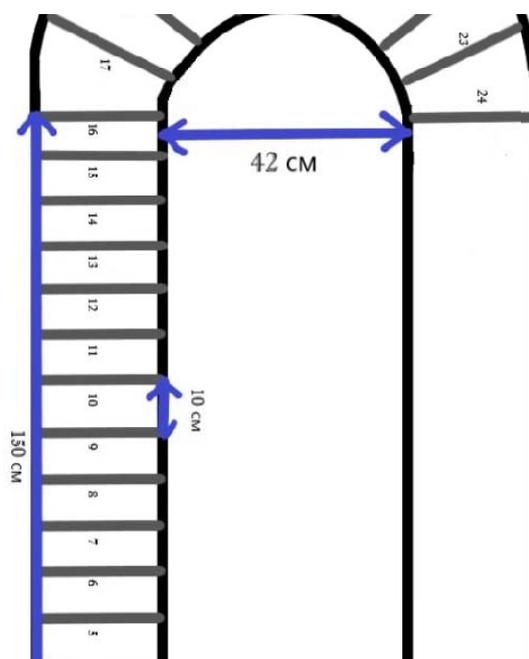


Рисунок 11- Установка, моделирующая одиночный изгиб русла прямоугольного сечения русла

2.1 Исходная информация

На жестком изгибе прямоугольного русла, на протяжении всего эксперимента, измерялся расход воды, на треугольном водосливе и уровень воды (Таблица 1 и 2).

Таблица 1- Расход воды измеренный на треугольном водосливе

| | Время | Створ | h, м | H, м | Q, м ³ /с |
|-------|-------|-------|-------|--------|----------------------|
| 16.11 | 17:00 | 1 | 0,243 | 0,073 | 0,0020 |
| | 17:25 | 2 | 0,244 | 0,074 | 0,0021 |
| | 18:00 | 4 | 0,242 | 0,072 | 0,0019 |
| | 18:25 | 5 | 0,243 | 0,073 | 0,0020 |
| | 19:15 | 7 | 0,244 | 0,074 | 0,0021 |
| | 19:50 | 9 | 0,243 | 0,073 | 0,0020 |
| | 20:15 | конец | 0,244 | 0,074 | 0,0021 |
| 17.11 | 12:10 | 9 | 0,244 | 0,074 | 0,0021 |
| | 13:30 | 14 | 0,244 | 0,074 | 0,0021 |
| | 14:30 | 16 | 0,243 | 0,073 | 0,0020 |
| | 15:00 | 17 | 0,244 | 0,074 | 0,0021 |
| | 15:30 | 18 | 0,245 | 0,075 | 0,0022 |
| | 16:00 | 19 | 0,244 | 0,074 | 0,0021 |
| | 16:30 | 21 | 0,244 | 0,074 | 0,0021 |
| | 17:00 | 22 | 0,243 | 0,073 | 0,0020 |
| | 17:30 | 23 | 0,244 | 0,074 | 0,0021 |
| | 18:00 | 24 | 0,242 | 0,072 | 0,0019 |
| 18:30 | конец | 0,243 | 0,073 | 0,0020 | |
| 18.11 | 12:20 | 24 | 0,243 | 0,073 | 0,0020 |
| | 13:00 | 25 | 0,242 | 0,072 | 0,0019 |
| | 13:30 | 26 | 0,243 | 0,073 | 0,0020 |
| | 14:00 | 28 | 0,244 | 0,074 | 0,0021 |
| | 14:45 | 30 | 0,245 | 0,075 | 0,0022 |
| | 15:05 | 31 | 0,244 | 0,074 | 0,0021 |

| | | | | | |
|--|-------|-------|-------|---------|--------|
| | 15:35 | 32 | 0,243 | 0,073 | 0,0020 |
| | 16:05 | 35 | 0,244 | 0,074 | 0,0021 |
| | 16:20 | конец | 0,243 | 0,073 | 0,0020 |
| | | | | Средний | 0,0020 |

Расход воды в течении всего эксперимента изменялся в интервале: 0,0019-0,0022 м³/с. Уровень воды в течение всего эксперимента изменялся в интервале: 0,242- 0,245 метров.

Таблица 2- Глубина воды

| 1 створ | | 2 створ | | 3 створ | | 4 створ | |
|--------------|-----------|--------------|-----------|--------------|-----------|--------------|-----------|
| Левый берег | 0,04 2 | Левый берег | 0,03 9 | Левый берег | 0,03 7 | Левый берег | 0,04 |
| /2 | 0,04 | /2 | 0,04 | /2 | 0,04 | /2 | 0,03 9 |
| Середина | 0,04 4 | Середина | 0,03 8 | Середина | 0,04 3 | Середина | 0,03 9 |
| /2 | 0,04 | /2 | 0,04 5 | /2 | 0,04 | /2 | 0,04 3 |
| Правый берег | 0,04 1 | Правый берег | 0,04 1 | Правый берег | 0,04 | Правый берег | 0,04 3 |
| 5 створ | | 6 створ | | 7 створ | | 8 створ | |
| Левый берег | 0,03 8 | Левый берег | 0,03 5 | Левый берег | 0,03 9 | Левый берег | 0,03 5 |
| /2 | 0,03 6 | /2 | 0,04 | /2 | 0,03 6 | /2 | 0,03 5 |
| Середина | 0,04 2 | Середина | 0,04 | Середина | 0,03 6 | Середина | 0,04 |
| /2 | 0,04 1 | /2 | 0,03 9 | /2 | 0,04 3 | /2 | 0,03 8 |
| Правый берег | 0,04 | Правый берег | 0,03 9 | Правый берег | 0,04 4 | Правый берег | 0,03 9 |
| 9 створ | | 10 створ | | 11 створ | | 12 створ | |
| Левый берег | 0,03 4 | Левый берег | 0,04 | Левый берег | 0,03 5 | Левый берег | 0,03 2 |
| /2 | 0,03 5 | /2 | 0,03 7 | /2 | 0,03 4 | /2 | 0,03 6 |
| Середина | 0,03 6 | Середина | 0,03 5 | Середина | 0,03 3 | Середина | 0,03 5 |
| /2 | 0,04 1 | /2 | 0,03 6 | /2 | 0,03 9 | /2 | 0,03 5 |
| Правый берег | 0,04 | Правый берег | 0,04 1 | Правый берег | 0,03 7 | Правый берег | 0,03 5 |
| 13 створ | | 14 створ | | 15 створ | | 16 створ | |
| Левый берег | 0,03 1 | Левый берег | 0,02 9 | Левый берег | 0,03 4 | Левый берег | 0,03 1 |
| /2 | 0,03 | /2 | 0,03 | /2 | 0,03 | /2 | 0,03 |

| | | | | | | | |
|-----------------|-----------|--------------|-----------|--------------|-----------|--------------|-----------|
| | | | 4 | | 2 | | 1 |
| Середина | 0,03 5 | Середина | 0,03 2 | Середина | 0,03 2 | Середина | 0,03 3 |
| /2 | 0,03 5 | /2 | 0,03 3 | /2 | 0,03 3 | /2 | 0,03 3 |
| Правый берег | 0,03 4 | Правый берег | 0,03 2 | Правый берег | 0,03 2 | Правый берег | 0,02 9 |
| 17 створ | | 18 створ | | 19 створ | | 20 створ | |
| Левый берег | 0,02 3 | Левый берег | 0,02 3 | Левый берег | 0,02 8 | Левый берег | 0,02 9 |
| /2 | 0,02 4 | /2 | 0,02 6 | /2 | 0,02 6 | /2 | 0,02 9 |
| Середина | 0,02 9 | Середина | 0,02 5 | Середина | 0,02 9 | Середина | 0,02 9 |
| /2 | 0,02 9 | /2 | 0,02 9 | /2 | 0,02 8 | /2 | 0,02 8 |
| Правый берег | 0,02 8 | Правый берег | 0,02 6 | Правый берег | 0,02 5 | Правый берег | 0,02 9 |
| 21 створ | | 22 створ | | 23 створ | | 24 створ | |
| Левый берег | 0,02 8 | Левый берег | 0,02 6 | Левый берег | 0,02 8 | Левый берег | 0,03 1 |
| /2 | 0,02 8 | /2 | 0,02 7 | /2 | 0,03 | /2 | 0,03 3 |
| Середина | 0,02 7 | Середина | 0,02 9 | Середина | 0,03 | Середина | 0,03 4 |
| /2 | 0,02 7 | /2 | 0,02 8 | /2 | 0,02 9 | /2 | 0,03 1 |
| Правый берег | 0,02 5 | Правый берег | 0,02 6 | Правый берег | 0,02 8 | Правый берег | 0,03 3 |

Глубина воды, на каждом створе и каждой вертикали, в течение всего эксперимента изменялась незначительно. Самая максимальная глубина наблюдалась на 2 створе, ближе к правому берегу, и равна она была 0,045 м. Самая минимальная глубина наблюдалась на 17 и 18 створах, у левого берега, и равна была 0,023 метров.

2.2 Методика проведения эксперимента при коэффициенте вариации, взятой как интенсивность турбулентности

Получив измеренные скорости на каждом створе, посчитали по каждому ряду интенсивность турбулентности (Таблица 3).

Таблица 3- Общая таблица коэффициентов вариации

| 1 створ | | 2 створ | | 3 створ | | 4 створ | |
|--------------|------|--------------|------|--------------|------|--------------|------|
| Левый берег | 0,28 | Левый берег | 0,34 | Левый берег | 0,34 | Левый берег | 0,36 |
| /2 | 0,35 | /2 | 0,35 | /2 | 0,35 | /2 | 0,33 |
| Середина | 0,35 | Середина | 0,37 | Середина | 0,34 | Середина | 0,34 |
| /2 | 0,34 | /2 | 0,35 | /2 | 0,34 | /2 | 0,33 |
| Правый берег | 0,34 | Правый берег | 0,35 | Правый берег | 0,34 | Правый берег | 0,34 |
| 5 створ | | 6 створ | | 7 створ | | 8 створ | |
| Левый берег | 0,34 | Левый берег | 0,34 | Левый берег | 0,24 | Левый берег | 0,22 |
| /2 | 0,35 | /2 | 0,34 | /2 | 0,29 | /2 | 0,28 |
| Середина | 0,34 | Середина | 0,34 | Середина | 0,19 | Середина | 0,29 |

| | | | | | | | |
|--------------|------|--------------|------|--------------|------|--------------|------|
| /2 | 0,35 | /2 | 0,34 | /2 | 0,25 | /2 | 0,21 |
| Правый берег | 0,35 | Правый берег | 0,27 | Правый берег | 0,26 | Правый берег | 0,23 |
| 9 створ | | 10 створ | | 11 створ | | 12 створ | |
| Левый берег | 0,27 | Левый берег | 0,04 | Левый берег | 0,03 | Левый берег | 0,03 |
| /2 | 0,31 | /2 | 0,04 | /2 | 0,03 | /2 | 0,04 |
| Середина | 0,29 | Середина | 0,03 | Середина | 0,03 | Середина | 0,03 |
| /2 | 0,31 | /2 | 0,05 | /2 | 0,05 | /2 | 0,14 |
| Правый берег | 0,04 | Правый берег | 0,03 | Правый берег | 0,03 | Правый берег | 0,16 |
| 13 створ | | 14 створ | | 15 створ | | 16 створ | |
| Левый берег | 0,32 | Левый берег | 0,31 | Левый берег | 0,36 | Левый берег | 0,36 |
| /2 | 0,26 | /2 | 0,28 | /2 | 0,37 | /2 | 0,39 |
| Середина | 0,21 | Середина | 0,35 | Середина | 0,34 | Середина | 0,34 |
| /2 | 0,26 | /2 | 0,35 | /2 | 0,28 | /2 | 0,33 |
| Правый берег | 0,33 | Правый берег | 0,38 | Правый берег | 0,31 | Правый берег | 0,27 |
| 17 створ | | 18 створ | | 19 створ | | 20 створ | |
| Левый берег | 0,36 | Левый берег | 0,35 | Левый берег | 0,41 | Левый берег | 0,29 |
| /2 | 0,39 | /2 | 0,34 | /2 | 0,36 | /2 | 0,33 |
| Середина | 0,33 | Середина | 0,32 | Середина | 0,43 | Середина | 0,41 |
| /2 | 0,28 | /2 | 0,33 | /2 | 0,44 | /2 | 0,37 |
| Правый берег | 0,26 | Правый берег | 0,24 | Правый берег | 0,37 | Правый берег | 0,42 |
| 21 створ | | 22 створ | | 23 створ | | 24 створ | |
| Левый берег | 0,64 | Левый берег | 0,69 | Левый берег | 0,70 | Левый берег | 0,44 |
| /2 | 0,58 | /2 | 0,63 | /2 | 0,59 | /2 | 0,59 |
| Середина | 0,35 | Середина | 0,38 | Середина | 0,62 | Середина | 0,58 |
| /2 | 0,35 | /2 | 0,32 | /2 | 0,51 | /2 | 0,54 |
| Правый берег | 0,43 | Правый берег | 0,49 | Правый берег | 0,57 | Правый берег | 0,49 |

Чтобы наглядно рассмотреть распределения коэффициента вариации на одиночном изгибе жесткого русла, в Surfer построена иллюстрация (Рисунок 12).

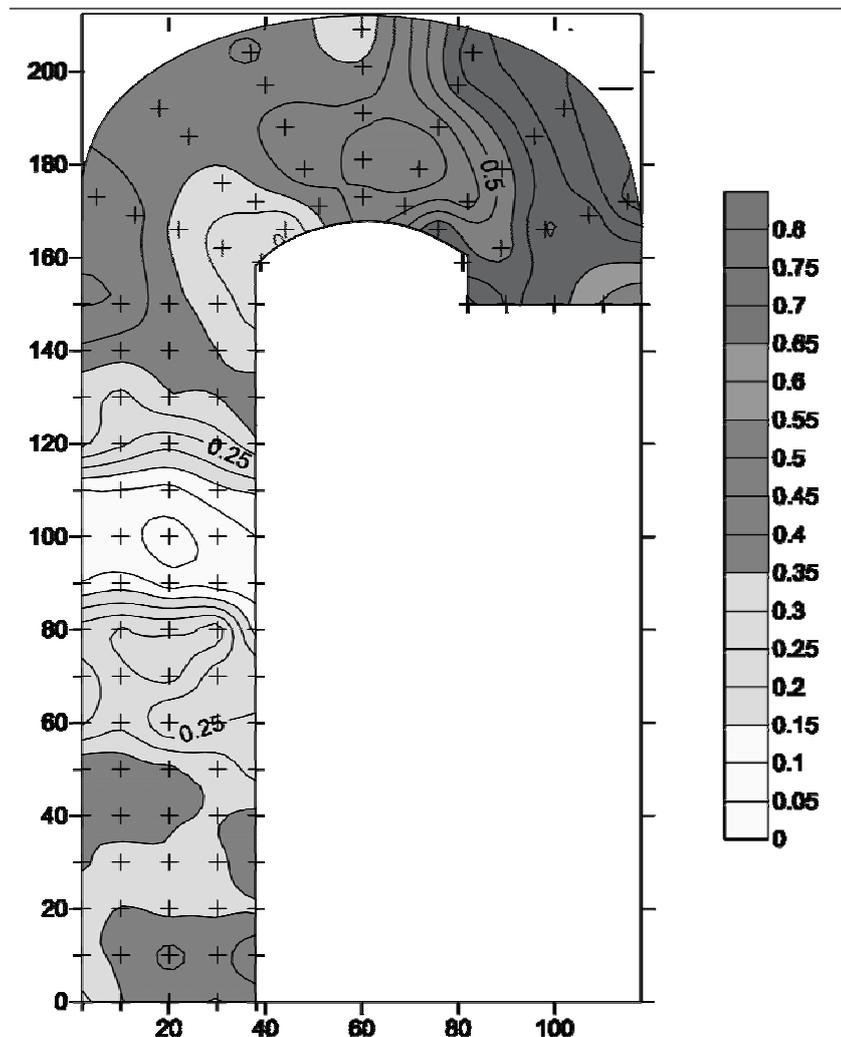
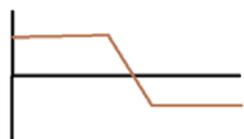


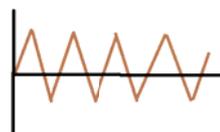
Рисунок 12- Интенсивность турбулентности (C_v) на одиночном изгибе русла

Данный эксперимент показал, что интенсивность турбулентности снижается перед входом потока в поворот, причем у выпуклого берега коэффициент вариации снижается, а у вогнутого берега- возрастает. На самом повороте жесткого русла коэффициент вариации повышается. То есть в самом створе поворота, коэффициент вариации в два раза больше, чем на прямолинейном участке русла.

Известно, что коэффициент вариации ряда А (Рисунок 13, а), и ряда Б (Рисунок 13, б) одинаковый. Поэтому было решено использовать следующую характеристику. В качестве такой характеристики был взят коэффициент асимметрии C_s .



а) Ряд А



б) Ряд Б

Рисунок 13- Ряды А и Б

2.3 Методика проведения эксперимента при коэффициенте асимметрии, взятой как интенсивность турбулентности

Таблица 4- Общая таблица коэффициента асимметрии

| | | | | | | | |
|--------------|-----------|--------------|-------|--------------|-----------|--------------|-----------|
| 1 створ | | 2 створ | | 3 створ | | 4 створ | |
| Левый берег | 2,40 | Левый берег | 1,02 | Левый берег | 1,35 | Левый берег | 0,92 |
| /2 | 0,92 | /2 | 0,79 | /2 | 0,84 | /2 | 0,55 |
| Середина | 0,95 | Середина | 1,22 | Середина | 1,28 | Середина | 1,05 |
| /2 | 0,78 | /2 | 0,76 | /2 | 1,26 | /2 | 1,16 |
| Правый берег | 1,02 | Правый берег | 1,51 | Правый берег | 1,29 | Правый берег | 1,34 |
| 5 створ | | 6 створ | | 7 створ | | 8 створ | |
| Левый берег | 1,09 | Левый берег | 1,16 | Левый берег | 3,31 | Левый берег | 3,63 |
| /2 | 0,58 | /2 | 1,11 | /2 | 2,17 | /2 | 2,88 |
| Середина | 0,76 | Середина | 1,17 | Середина | 4,52 | Середина | 2,31 |
| /2 | 1,07 | /2 | 0,34 | /2 | 2,79 | /2 | 3,61 |
| Правый берег | 0,92 | Правый берег | 2,61 | Правый берег | 3,05 | Правый берег | 3,27 |
| 9 створ | | 10 створ | | 11 створ | | 12 створ | |
| Левый берег | 2,59 | Левый берег | -0,31 | Левый берег | - 0,13 | Левый берег | - 0,21 |
| /2 | 2,11 | /2 | -0,10 | /2 | - 0,18 | /2 | - 0,22 |
| Середина | 2,80 | Середина | -0,10 | Середина | - 0,27 | Середина | 0,09 |
| /2 | 2,02 | /2 | -0,16 | /2 | 0,28 | /2 | 5,79 |
| Правый берег | - 0,82 | Правый берег | -0,22 | Правый берег | - 0,50 | Правый берег | 5,66 |
| 13 створ | | 14 створ | | 15 створ | | 16 створ | |
| Левый берег | 1,80 | Левый берег | 2,26 | Левый берег | 1,22 | Левый берег | 1,37 |
| /2 | 3,21 | /2 | 2,73 | /2 | 1,32 | /2 | 1,35 |
| Середина | 2,35 | Середина | 1,89 | Середина | 1,34 | Середина | 1,68 |
| /2 | 2,46 | /2 | 0,30 | /2 | 2,01 | /2 | 1,30 |
| Правый берег | 1,82 | Правый берег | 0,68 | Правый берег | 1,49 | Правый берег | 1,68 |
| 17 створ | | 18 створ | | 19 створ | | 20 створ | |
| Левый берег | 0,75 | Левый берег | 0,69 | Левый берег | 2,30 | Левый берег | 0,01 |
| /2 | 1,15 | /2 | 1,54 | /2 | 0,59 | /2 | 0,11 |
| Середина | 1,75 | Середина | 1,75 | Середина | 1,02 | Середина | 1,91 |
| /2 | 2,19 | /2 | 1,67 | /2 | 0,76 | /2 | 0,99 |
| Правый берег | 2,01 | Правый берег | 0,85 | Правый берег | 1,31 | Правый берег | 0,58 |
| 21 створ | | 22 створ | | 23 створ | | 24 створ | |
| Левый берег | 0,63 | Левый берег | 1,63 | Левый берег | 2,82 | Левый берег | 2,47 |
| /2 | 0,55 | /2 | 1,03 | /2 | 2,47 | /2 | 2,27 |
| Середина | 1,03 | Середина | 0,87 | Середина | 2,04 | Середина | 1,44 |
| /2 | 2,02 | /2 | 1,21 | /2 | 2,04 | /2 | 0,43 |
| Правый берег | 2,46 | Правый берег | 2,45 | Правый берег | 3,03 | Правый берег | - 0,17 |

Интенсивность турбулентности, в виде коэффициента асимметрии C_s на одиночном изгибе выглядит следующим образом (Рисунок 14).

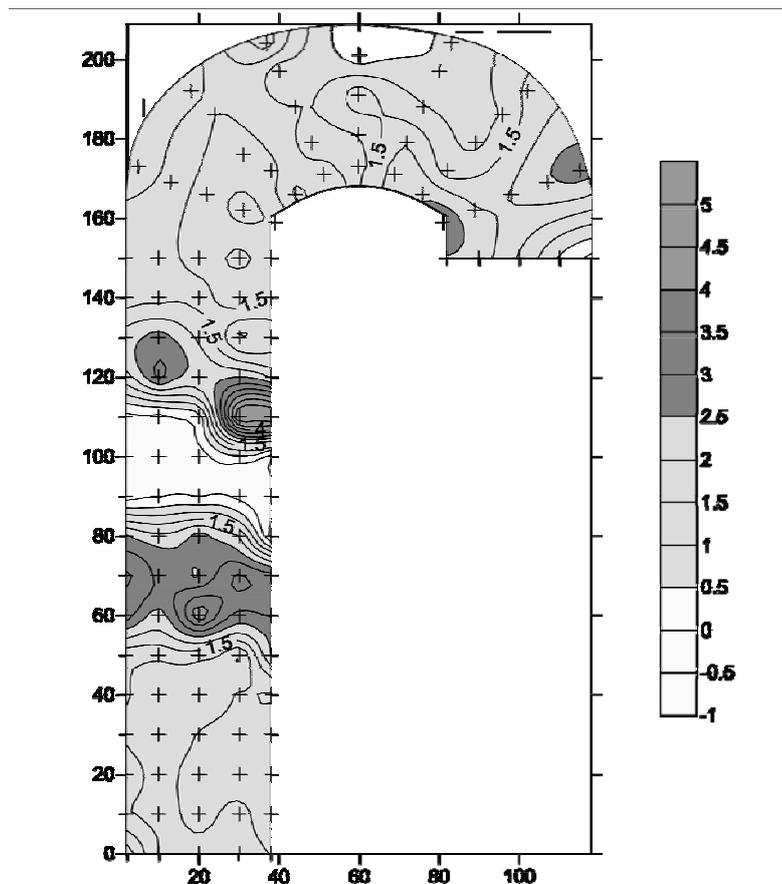


Рисунок 14- Интенсивность турбулентности (C_s) на одиночном изгибе русла

На данном рисунке, видно, что интенсивность турбулентности перед входом в поворот увеличивается, затем снижается, а после опять увеличивается. На повороте интенсивность турбулентности равномерна.

Фокусы размыва хорошо наблюдаются на повороте русла, и на выходе поворота. Причем на повороте русла, фокус размыва находится в отрицательных пределах, а на выходе поворота, максимальных положительных значениях коэффициента асимметрии.

Глава 3 Выводы



Рисунок 15- Донное течение на одиночном изгибе русла

Посмотрев на Рисунок 15, можно увидеть, как происходило переотложенные наносов. Максимум скоростей, с середины потока, смещается к выпуклому берегу. Так же, большой размыв происходит на выходе поворота, у вогнутого берега.

Сравнив донные наносы, с полученными графиками интенсивности турбулентности, можно сказать, что максимумы при интенсивности турбулентности, в качестве C_v , наоборот смещены к вогнутому берегу. А при интенсивности турбулентности, в качестве C_s , никакой закономерности не наблюдается.

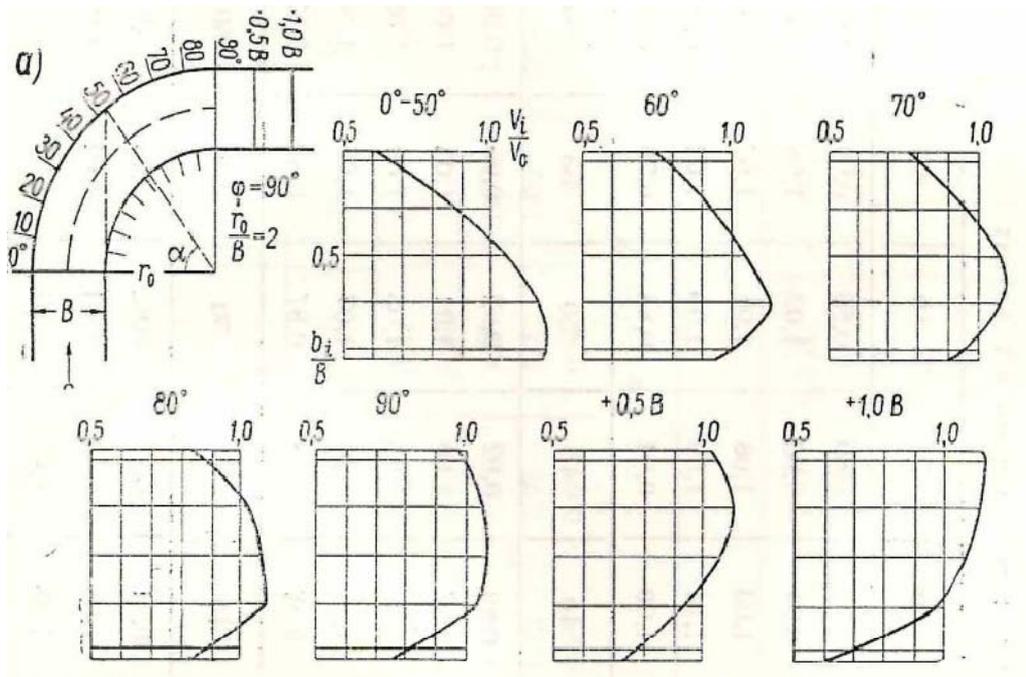


Рисунок 16- Изменение средних по вертикали скоростей по длине изгиба

Для каждого угла поворота приведены данные об относительных скоростях.

Приведенные иллюстрации распределения продольных скоростей (Рисунок 16), объясняют «пятнистость» на полученных рисунка (Рисунок 12 и 14).

Так же были рассчитаны относительные погрешности расчетов коэффициента вариации (Таблица 5) и коэффициента асимметрии (Таблица 6).

Расчеты относительных погрешностей производятся по формулам:

$$\varepsilon_{Cv} = \frac{1}{n + 4C_v^2} \sqrt{\frac{n(1 + C_v^2)}{2}} * 100\%$$

Где n- число значений, C_v - коэффициент вариации.

$$\varepsilon_{Cs} = \frac{1}{C_s} \sqrt{\frac{6}{n} (1 + 6C_v^2 + 5C_v^4)} * 100\%$$

Где n- число значений, C_s - коэффициент асимметрии, C_v - коэффициент вариации.

Таблица 5- Общая таблица погрешностей расчета коэффициента вариации

| | | | | | | | |
|--------------|----------|--------------|----------|--------------|----------|--------------|----------|
| 1 створ | | 2 створ | | 3 створ | | 4 створ | |
| Левый берег | 2,1 9 | Левый берег | 2,2 3 | Левый берег | 2,2 3 | Левый берег | 2,2 4 |
| /2 | 2,2 3 | /2 | 2,2 3 | /2 | 2,2 4 | /2 | 2,2 2 |
| Середина | 2,2 3 | Середина | 2,2 5 | Середина | 2,2 3 | Середина | 2,2 3 |
| /2 | 2,2 3 | /2 | 2,2 4 | /2 | 2,2 3 | /2 | 2,2 2 |
| Правый берег | 2,2 3 | Правый берег | 2,2 4 | Правый берег | 2,2 3 | Правый берег | 2,2 3 |
| 5 створ | | 6 створ | | 7 створ | | 8 створ | |
| Левый берег | 2,2 3 | Левый берег | 2,2 3 | Левый берег | 2,1 7 | Левый берег | 2,1 6 |
| /2 | 2,2 4 | /2 | 2,2 3 | /2 | 2,2 0 | /2 | 2,1 9 |
| Середина | 2,2 3 | Середина | 2,2 3 | Середина | 2,1 5 | Середина | 2,2 0 |
| /2 | 2,2 3 | /2 | 2,2 3 | /2 | 2,1 8 | /2 | 2,1 6 |
| Правый берег | 2,2 4 | Правый берег | 2,1 9 | Правый берег | 2,1 8 | Правый берег | 2,1 7 |
| 9 створ | | 10 створ | | 11 створ | | 12 створ | |
| Левый берег | 2,1 9 | Левый берег | 2,1 1 | Левый берег | 2,1 1 | Левый берег | 2,1 1 |
| /2 | 2,2 1 | /2 | 2,1 1 | /2 | 2,1 1 | /2 | 2,1 1 |
| Середина | 2,2 0 | Середина | 2,1 1 | Середина | 2,1 1 | Середина | 2,1 1 |
| /2 | 2,2 1 | /2 | 2,1 1 | /2 | 2,1 1 | /2 | 2,1 3 |
| Правый берег | 2,1 1 | Правый берег | 2,1 1 | Правый берег | 2,1 1 | Правый берег | 2,1 4 |
| 13 створ | | 14 створ | | 15 створ | | 16 створ | |
| Левый берег | 2,2 2 | Левый берег | 2,2 1 | Левый берег | 2,2 4 | Левый берег | 2,2 4 |
| /2 | 2,1 8 | /2 | 2,1 9 | /2 | 2,2 5 | /2 | 2,2 6 |
| Середина | 2,1 6 | Середина | 2,2 3 | Середина | 2,2 3 | Середина | 2,2 3 |
| /2 | 2,1 8 | /2 | 2,2 4 | /2 | 2,1 9 | /2 | 2,2 2 |
| Правый берег | 2,2 2 | Правый берег | 2,2 6 | Правый берег | 2,2 1 | Правый берег | 2,1 9 |
| 17 створ | | 18 створ | | 19 створ | | 20 створ | |
| Левый берег | 2,2 4 | Левый берег | 2,2 4 | Левый берег | 2,2 8 | Левый берег | 2,2 0 |

| | | | | | | | |
|--------------|----------|--------------|----------|--------------|----------|--------------|----------|
| /2 | 2,2 7 | /2 | 2,2 3 | /2 | 2,2 5 | /2 | 2,2 2 |
| Середина | 2,2 2 | Середина | 2,2 2 | Середина | 2,2 9 | Середина | 2,2 8 |
| /2 | 2,1 9 | /2 | 2,2 2 | /2 | 2,3 1 | /2 | 2,2 5 |
| Правый берег | 2,1 8 | Правый берег | 2,1 7 | Правый берег | 2,2 5 | Правый берег | 2,2 9 |
| 21 створ | | 22 створ | | 23 створ | | 24 створ | |
| Левый берег | 2,5 0 | Левый берег | 2,5 7 | Левый берег | 2,5 7 | Левый берег | 2,3 0 |
| /2 | 2,4 4 | /2 | 2,4 9 | /2 | 2,4 4 | /2 | 2,4 5 |
| Середина | 2,2 4 | Середина | 2,2 6 | Середина | 2,4 8 | Середина | 2,4 4 |
| /2 | 2,2 3 | /2 | 2,2 1 | /2 | 2,3 7 | /2 | 2,3 9 |
| Правый берег | 2,3 0 | Правый берег | 2,3 5 | Правый берег | 2,4 3 | Правый берег | 2,3 5 |

Относительная ошибка расчета коэффициента вариации, находится в пределах равные: 2,11- 2,57. Наибольшая погрешность расчета на 22 и 23 створах, у левого берега. Наименьшая погрешность расчета на 9 створе, у правого берега, 10 и 11 створах по всей ширине, на 12 створе, от левого берега до середины потока.

Таблица 6- Общая таблица погрешностей расчета коэффициента асимметрии

| | | | | | | | |
|--------------|-------|--------------|-------|--------------|-------|--------------|-------|
| 1 створ | | 2 створ | | 3 створ | | 4 створ | |
| Левый берег | 3,76 | Левый берег | 9,56 | Левый берег | 7,17 | Левый берег | 10,7 |
| /2 | 10,7 | /2 | 12,4 | /2 | 11,8 | /2 | 17,5 |
| Середина | 10,3 | Середина | 8,28 | Середина | 7,54 | Середина | 9,24 |
| /2 | 12,5 | /2 | 12,9 | /2 | 7,68 | /2 | 8,23 |
| Правый берег | 9,50 | Правый берег | 6,55 | Правый берег | 7,51 | Правый берег | 7,30 |
| 5 створ | | 6 створ | | 7 створ | | 8 створ | |
| Левый берег | 8,82 | Левый берег | 8,36 | Левый берег | 2,57 | Левый берег | 2,30 |
| /2 | 17,1 | /2 | 8,79 | /2 | 4,18 | /2 | 3,13 |
| Середина | 12,7 | Середина | 8,37 | Середина | 1,78 | Середина | 3,92 |
| /2 | 9,13 | /2 | 0,00 | /2 | 3,09 | /2 | 2,29 |
| Правый берег | 10,8 | Правый берег | 3,41 | Правый берег | 2,86 | Правый берег | 2,59 |
| 9 створ | | 10 створ | | 11 створ | | 12 створ | |
| Левый берег | 3,43 | Левый берег | -23,8 | Левый берег | -54,4 | Левый берег | -34,4 |
| /2 | 4,41 | /2 | -74,5 | /2 | -40,3 | /2 | -33,8 |
| Середина | 3,25 | Середина | -73,0 | Середина | -27,6 | Середина | 83,0 |
| /2 | 4,59 | /2 | -46,1 | /2 | 26,4 | /2 | 1,33 |
| Правый берег | -9,01 | Правый берег | -33,2 | Правый берег | -14,7 | Правый берег | 1,39 |

| | | | | | | | |
|--------------|------|--------------|------|--------------|------|--------------|-------|
| 13 створ | | 14 створ | | 15 створ | | 16 створ | |
| Левый берег | 5,24 | Левый берег | 4,14 | Левый берег | 8,18 | Левый берег | 7,26 |
| /2 | 2,74 | /2 | 3,30 | /2 | 7,62 | /2 | 7,69 |
| Середина | 3,53 | Середина | 5,20 | Середина | 7,29 | Середина | 5,73 |
| /2 | 3,57 | /2 | 32,3 | /2 | 4,43 | /2 | 7,36 |
| Правый берег | 5,22 | Правый берег | 15,0 | Правый берег | 6,28 | Правый берег | 5,25 |
| 17 створ | | 18 створ | | 19 створ | | 20 створ | |
| Левый берег | 13,2 | Левый берег | 14,3 | Левый берег | 4,66 | Левый берег | 799 |
| /2 | 9,13 | /2 | 6,29 | /2 | 17,1 | /2 | 88,7 |
| Середина | 5,44 | Середина | 5,43 | Середина | 10,8 | Середина | 5,63 |
| /2 | 4,09 | /2 | 5,69 | /2 | 14,9 | /2 | 10,1 |
| Правый берег | 4,34 | Правый берег | 10,1 | Правый берег | 7,71 | Правый берег | 18,5 |
| 21 створ | | 22 створ | | 23 створ | | 24 створ | |
| Левый берег | 24,0 | Левый берег | 10,0 | Левый берег | 5,88 | Левый берег | 4,53 |
| /2 | 25,4 | /2 | 14,4 | /2 | 5,64 | /2 | 6,22 |
| Середина | 9,63 | Середина | 11,8 | Середина | 7,19 | Середина | 9,61 |
| /2 | 4,86 | /2 | 7,78 | /2 | 6,15 | /2 | 30,5 |
| Правый берег | 4,51 | Правый берег | 4,92 | Правый берег | 4,52 | Правый берег | -69,3 |

Относительная ошибка расчета коэффициента асимметрии, находится в пределах равные: -74,5- 83,0. Наибольшая погрешность расчета на 12 створе, на середине потока. Наименьшая погрешность расчета на 10 створе, на середине потока.

Заключение

В ходе проведенных экспериментов выявлены особенности изменения C_v и C_s на одиночном изгибе русла.

На одиночном изгибе жесткого русла, были взяты 24 створа, на каждом створе по 5 вертикалей.

Измерения скоростей проводились микровертушкой. После ряды скоростей, принимались как интенсивность турбулентности, в качестве коэффициента вариации, а затем коэффициента асимметрии.

Были получены следующие выводы. Интенсивность турбулентности снижается перед входом потока в поворот, причем у выпуклого берега коэффициент вариации снижается, а у вогнутого берега- возрастает.

А интенсивность турбулентности C_s перед входом в поворот увеличивается, затем снижается, а после опять увеличивается. На повороте интенсивность турбулентности равномерна.

В заключении можно отметить, что C_v как характеристика интенсивности турбулентности, наиболее адекватно отображает перестройку скоростного поля на одиночном изгибе жесткого русла.

Список использованной литературы

1. Барышников, Н. Б. Динамика русловых потоков и русловые процессы / Н. Б. Барышников, И. В. Попов. — Ленинград : Гидрометеоиздат, 1988. — 454 с.
2. Клавен, А. Б. Экспериментальные исследования и гидравлическое моделирование речных потоков и руслового процесса / А. Б. Клавен, З. Д. Копалиани. — Санкт-Петербург : Нестор-История, 2011. — 504 с.
3. Моделирование турбулентных течений: Учебное пособие / И.А. Белов, С.А.Исаев, Балт. гос. техн. ун-т. СПб., 2001. — 108 с.