

МОГНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

фелеральное государственное бюджетное образовательное учреждение

высшего образования «РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра гидрометрии

## ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА (бакалаврская работа)

На тему

# Скоростная структура потока по данным наблюдений на реке Оредеж

Исполнитель

Исакова Ирина Алексеевна

lleal

ководитель кандидат ге

кандидат географических наук, доцент

Субботина Елена Сергеевна

К защите допускаю» Завелующий кафедрой

—» июнь 2016г.

кандидат географических наук, доцент

Исаев Дмитрий Игоревич

Санкт–Петербург 2016



### 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

# Скоростная структура потока по данным наблюдений на реке Оредеж

Исполнитель

Исакова Ирина Алексеевна

Руководитель

к.г.н., доцент

Субботина Елена Сергеевна

«К защите допускаю» Заведующий кафедрой

к.г.н., доцент

Исаев Дмитрий Игоревич

«\_\_\_\_» июнь 2016г.

Санкт–Петербург 2016

## СОДЕРЖАНИЕ

Введение	5				
1.Состояние изученности проблемы скоростной структуры потока	6				
1.1 Распределение скоростей в турбулентном потоке по вертикали					
1.2 Зависимости для распределения скоростей и гидравлических					
сопротивлений, основанные на двухслойной модели И.К.Никитина	16				
1.3 Пульсационные характеристики турбулентного течения					
2. Обзор натурных данных	25				
2.1 Общие сведения					
2.1.1 Рельеф и геология					
2.1.2 Почвенный покров					
2.1.3 Растительность					
2.1.4 Климат					
2.1.5 Описание реки Оредеж и участка наблюдений					
2.1.6 Характеристика высшей водной флоры реки Оредеж					
2.1.7 Причины интенсивного зарастания русла реки Оредеж					
2.2 Обработка и первичный анализ натурных данных					
2.2.1 Описание участка наблюдений					
2.2.2 Методика измерений					
2.2.3 Первичная обработка натурных данных					
3. Результаты расчетов и их анализ	36				
3.1 Обработка данных натурных наблюдений по методике И.К.Никитина					
3.2 Подбор закона распределения скоростей по глубине потока					

3.3 Расчет пристенного слоя по данным о пульсациях скорости						
Заключение					49	
Список используем	ных источни	ков			51	
Приложение А По	оперечный п	рофиль дна на 1	о.Оредеж		52	
Приложение Б - Таблица измеренных расходов волы					53	
Приложение В - Эпюры распределения скоростей по глубине потока на						
приложение Б. Энторы распределения скоростен по тлуоние потока на						
приложение г Эп	юры распре,	деления скорос		потока на	55	
вертикалях	π			· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	55	
приложение	Д	J	пюры	скорост	геи	
<i>u</i>   <i>z</i>					62	
Приложение Е Ло	гарифмичес	кий профиль ск	оростей		70	
Приложение Ж Графический анализ эпюры скоростей <i>u</i>   <i>z</i>						
Приложение И Ро	езультаты об	бработки данны	х натурных на	блюдений по		
методике И.К.Ники	1ТИН				73	
Приложение К Эпюры распределения продольных скоростей по вертикале						
по натурным да	нным и р	асчетным зави	исимостям бе	з прокоса	ОТ	
02.07.2015г					74	
Приложение Л.	- Эпюры	распределения	продольных	скоростей	по	
вертикале по натур	эным данны	м и расчетным	зависимостям	при прокосе	e 1	
метр	ОТ	0	4.07.2015		Г.	
-					75	
Приложение М.	- Эпюры	распределения	продольных	скоростей	ПО	
вертикале по нату	т Эным данны	м и расчетным	зависимостям	при прокосе	e 5	
метров от 07 07 2015г						
r		-			76	
Припочение Ц	- Эпори	 nacпneпепеция		 скоростой	ло <i>77</i>	
приложение п.	- эпюры	распределения	продольных	скоростей	110 //	

вертикале по натурным данным и расчетным зависимостям при прокосе 5 08.07.2015г.. метров OT ..... Приложение П. - Эпюры распределения продольных скоростей по вертикале по натурным данным и расчетным зависимостям при прокосе 10 09.07.2015г.. метров ОТ 78 ..... Приложение Р. - Эпюры распределения продольных скоростей по вертикале по натурным данным и расчетным зависимостям при прокосе 10 метров от 10.07.2015г. 79 Приложение С. - Эпюры распределения продольных скоростей по вертикале по натурным данным и расчетным зависимостям при прокосе 10 14.07.2015г.. метров ОТ 80 ..... Приложение Т. - Эпюры распределения продольных скоростей по вертикале по натурным данным и расчетным зависимостям от 12.02.2016г.... 81 Приложение У. – Натурные данные пульсаций скорости..... 82

#### ВВЕДЕНИЕ

Возрастающая с каждым годом степень хозяйственного использования рек и вопросы их охраны, требуют создания более точных методов учета стока. Особенно сложным является оценка пропускной способности рек и скоростной структуры потока. Решению этих вопросов посвящено много научных трудов.

Известные в литературе способы расчета расходов воды базируются на использовании формулы Шези для средней скорости *u*, при этом движение предполагается равномерным, а поскольку это невозможно для рек, то использование формулы Шези в таких случаях всегда будет иметь приближенный характер.

Нахождение законов распределения скоростей в потоке тесно связанного с ним закона гидравлических сопротивлений для турбулентных течений является одной из важнейших задач речной гидравлики. Так же большой интерес представляет течение в пограничном слое у шероховатой поверхности. Течение у шероховатой поверхности так же, как и у гладкой, всегда разделяются на две области – пристенного подслоя  $\delta$  с четко выраженным линейным распределением скоростей и турбулентное ядро с близким к логарифмическому профилем. В настоящее время решение этой проблемы возможно только полуэмпирическим путем с привлечением данных натурных или лабораторных наблюдений.

Целью данной бакалаврской работы является исследование скоростной структуры потока, подбор закона распределения скоростей по вертикали, определение пограничного слоя у шероховатой стенки, а также обобщение и анализ многолетних данных наблюдений за расходом воды на конкретном водном объекте – р. Оредеж.

1. Состояние изученности проблемы скоростной структуры потока

#### 1.1 Распределение скоростей в турбулентном потоке по вертикали

Характер распределения осредненных скоростей по глубине в турбулентном потоке зависит от ряда факторов: средней скорости потока, шероховатости русла, глубины, уклона водной поверхности. Кроме этих, действует еще ряд дополнительных факторов: растительность в русле, ледяной покров, ветер, морфология русла и поймы, русловые деформации и прочее. Все эти факторы, оказывая влияние на поле скоростей затрудняют его теоретическое описание. В настоящее время отсутствует строгое теоретическое решение проблемы, так как система дифференциальных уравнений, описывающих турбулентное движение, остается незамкнутым. Распределение скоростей в потоке при турбулентном движении существенно отличается от распределения скоростей при ламинарном движении. Отличие обусловлено поперечным движениями частиц жидкости в турбулентном потоке.

Рисунок 1.1- Распределение скоростей по вертикали в турбулентном и ламинарном потоке.

1,2- эпюры скоростей соответственно для ламинарного и турбулентного режима.

B открытом турбулентном потоке наибольшая скорость  $u_{max}$ наблюдается обычно на поверхности воды. У дна показано конечное значение скорости  $u_{\rm d}$ , называемое донной скоростью потока на вертикали. В результате турбулентного перемешивания распределение скоростей по вертикали В средней части потока оказывается значительно более равномерным, чем при ламинарном движении; при этом непосредственные измерения распределения скоростей в турбулентном потоке показывают, что скорости у стенки сначала очень быстро возрастают, но мере удаления от стенки дальнейшее их возрастание становится сравнительно медленным.

В ряде случаев кривая u = f(z) принимает более сложное очертание. В



частности, наибольшая скорость  $u_{max}$  может наблюдаться ниже свободной поверхности из-за встречного ветра, торможения потока нижней поверхностью льда или за счет вторичных течений.

Главная сложность в исследовании распределения скоростей в турбулентно потоке заключается в том, что, хотя имеются некоторые теоретические предпосылки для описания скоростного поля потока, все известные уравнения распределения скоростей по вертикали основаны на эмпирических данных.

Рассмотрим плоское равномерное движение жидкости, когда влияние боковых стенок потока и формы поперечного сечения можно не учитывать. Но даже для этого наиболее простого случая вопрос о распределении скоростей по глубине не имеет однозначного решения. Реки есть единая система движения воды и это движение может быть описано различной формой, которое необходимо учитывать при описании характеристик потока. Для расчета водности и пропускной способности русла нужно знать только основные параметры потока такие как отметки и уклон свободной поверхности, скоростей течения, а также площади водного сечения. Для усовершенствования аргументирования И теории И подходов этих характеристик нужно изучать взаимодействие гидрометрических приборов и средой, это значит, что необходимо учитывать внешние и внутренние факторы руслового потока. Доказано, что скорости течения в потоке неоднородны и меняются в зависимости от глубины и ширины реки, вследствие этого надо объяснить предпочтение выбора той или иной формулы для описания профиля скорости турбулентного течения потока, которые необходимы для решения задач речной гидрометрии. Как только гидрометрические приборы были появились выведено множество эмпирических формул для решения данных задач: параболическая. эллиптическая, логарифмическая, степенная и другие[2].

Так, например, изучая распределение скоростей по вертикали в реках и широких каналах А.В.Караушев установил, что в условиях открытых потоков можно принять гипотезу о постоянном возрастании коэффициента

турбулентного обмена вместе с возрастанием скорости от дна к поверхности потока:

$$A \cong k * u(1.1)$$

где *k* – коэффициент пропорциональности;

u — местная скорость.

С учетом этого эллиптическое уравнение распределения скорости по вертикали было записано А. В. Караушевым в виде

$$u = u_0 \times \sqrt{1 - (0.57 + \frac{3.3}{c}) \times \frac{y}{H}}$$
, (1.2)

где *u*<sub>0</sub> – поверхностная скорость;

Н – глубина потока;

у – глубина погружения точки под уровень свободной поверхности;

С – коэффициент Шези.

Используя гипотезу о постоянстве коэффициента турбулентного обмена «А» по вертикали, Базеном был получен параболический закон распределения скорости по вертикали

$$u = u_0 - \frac{mV}{C} \times \left(\frac{y}{H}\right)^2 \quad , \qquad (1.3)$$

где *V* – средняя скорость на вертикали;

т – коэффициент, принимаемый по Базену равным 24, а по Буссинеску 22,3

А.В.Караушев предложил следующее приближенное отношение

$$m = 0,35C + 3$$
 ,(1.4)

Довольно большая группа исследователей считает логарифмический закон, применяемый для описания характера распределения скоростей по глубине с достаточной точностью для практических целей. Логарифмические зависимости были предложены Прандтлем, Ясмундом и Никурадзе, В.Н.Гончаровым, И.К.Никитиным и другими. В них формирование профиля осредненных скоростей по вертикали рассматривается как результат взаимодействия придонного слоя с толщей основного потока.

К полуэмпирическим теориям обычно относят направление, начало которого положено работами Л.Прандтля, Дж.Тейлора и Т.Кармана. Рассмотрим предложенный ими путь решения задачи – непосредственное определение связи между турбулентными напряжениями и осредненными характеристиками течения [6].

При ламинарном течении с градиентом скорости силу трения между двумя смежными слоями с позиций кинематической теории жидкости и газов можно представить, как результат обмена между ними молекулами, участвующими в беспорядочном тепловом движении

$$\tau = \frac{1}{3} C\rho l \frac{du}{dy} = \mu \frac{du}{dy}, \qquad (1.5)$$

где С – средняя скорость молекулы в тепловом движении;

*l* – длина свободного пробега.

Проводя аналогию между турбулентным перемешиванием и хаотическим молекулярным обменом, Л.Прандль турбулентное касательное напряжение  $\tau_{\rm T}$  объясняет беспорядочным обменом между двумя смежными слоями жидкости объемами конечной величины. Объемы из слоя с малой осредненной скоростью, попадая в слой с большой скоростью будут при переходе разгонять слои с малой скоростью. Взаимное действие друг на друга двух слоев получается таким, как если бы между ними существовало трение $\tau_{\rm T}$ .

Пусть объемы переходят из одного слоя в другой, отстоящий на расстоянии *l*, и затем теряют свою «индивидуальность», смешиваются. Тогда разность осредненных скоростей между этими двумя слоями приближено

равняется  $l\frac{du}{dy}$ . Масса жидкости, которая переносится из слоя в слой в единицу времени на единицу площади, равна произведению плотности  $\rho$  жидкости на скорость перемешивания V'. Следовательно, касательное напряжение  $\tau_{\rm T}$ , возникающее при таком перемешивании должно определиться по формуле

$$\tau_{\rm T} = \rho V' \left( l \frac{du}{dy} \right)^2 , \qquad (1.6)$$

Далее, отличает И.К.Никитиным[6] полагая, что величина вертикальной скорости при турбулентном перемешивании V' имеет тот же порядок, что и разности скоростей между рассматриваемыми слоями, то есть принимая

 $V' \approx l \frac{du}{dy}$ , Прандтль получает для турбулентного трения следующую зависимость

$$\tau_{\rm T} = \rho \left( l \frac{du}{dy} \right)^2 \,, \qquad (1.7)$$

Сопоставляя зависимости (1.6) и (1.7) видно, что турбулентное напряжение  $\tau_{\rm T}$ 

Пропорционально уже не первой, а второй степени градиента скоростей [6]. Расстояние *l* на протяжении которого жидкие объемы перемещаются в перпендикулярном направлении, сохраняя свою «индивидуальность», Прандтль по аналогии с длиной свободного пробега молекул назвал длиной пути перемешивания.

Уравнение (1.7) еще не решает задачи, так как изменение длины перемешивания l в турбулентном потоке остается неизвестным. Поэтому, рассматривая течение у гладкой стенки, Прандтль вынужден ввести новое допущение: он считает, что для некоторой точки, находящейся на расстоянии «у» от стенки, по условию задачи нельзя найти какую-либо другую длину,

определяющую состояние движения в окрестности этой точки, кроме самого расстояния «у». Величина *l* также является длиной, характеризующей движение в рассматриваемой точке.

Поэтому длину перемешивания, оказалось, нельзя определить иначе, как принимая ее пропорциональной расстоянию от стенки «у»

$$l = \chi y , \qquad (1.8)$$

где  $\chi$  – коэффициент пропорциональности, который можно определить из опыта.

Подставляя значение *l* в (1.7) после преобразования можно найти

$$\frac{du}{dy} = \frac{1}{\chi y} \times \sqrt{\frac{\tau_{\rm T}}{\rho}} , \qquad (1.9)$$

Далее, вводя еще одно допущение

$$\tau_{\rm T} = \text{const} = \tau_0 \quad (1.10)$$

Л.Прандтль, интегрируя (1.9) и обозначая  $\sqrt{\frac{\tau_0}{\rho}} = u_{*0}$ , выводит

логарифмический закон распределения скоростей

$$u = \frac{u_{*0}}{\chi} ln(y) + C$$
 , (1.11)

Этот закон получен при допущении, что касательное напряжение в потоке складывается за счет турбулентных напряжений, а вязкими составляющими можно пренебречь. Поэтому формула (1.11) справедливая для турбулентного ядра, неприменима для пристенного подслоя, в котором течении является вязким.

Учитывающие этот недостаток Прандтлем получены зависимости (1.12) и (1.13) раздельно описывающее движение в вязком подслое и в турбулентном ядре течения

$$\frac{u}{u_{*0}} = \frac{u_{*0} \times y}{v} , \quad (1.12)$$

И

$$\frac{u}{u_{*0}} = A \times ln \frac{u_{*0} \times y}{v} + B \quad , \quad (1.13)$$

*v* –постоянная Кармана (изменяется от 0,26 до 0,54)

Еще одним недостатком модели Л.Прандтля явилось то, что сопряжение профилей вязкого подслоя и турбулентного ядра оказалось неплавным, что неправильно. Для исправления этого недостатка Т.Карман ввел в рассмотрение промежуточный слой между вязким подслоем и турбулентным ядром. Существование этого слоя объясняют тем, что в его пределах молекулярная и турбулентная вязкости имеют один и тот же порядок величин. Распределение скоростей в трехслойной модели Кармана определяется следующими зависимостями.

Для вязкого подслоя

$$0 < \frac{u_{*0} \times y}{v} < 5$$
 ,  $\frac{u}{u_{*0}} = \frac{u_{*0} \times y}{v}$  , (1.14)

для буферной области

$$5 < \frac{u_{*0} \times y}{v} < 30$$
 ,  $\frac{u}{u_{*0}} = 11,5 \times ln \frac{u_{*0} \times y}{5v}$  , (1.15)

для турбулентного ядра

$$30 < \frac{u_{*0} \times y}{v}$$
,  $\frac{u}{u_{*0}} = 5,75 \times ln \frac{u_{*0} \times y}{5v} + 5,5$ . (1.16)

Основываясь на схожих предположениях было получено уравнение Ясмунда-Никурадзе

$$u = \frac{2.3}{\chi} V_* \times lg \left( \frac{y/h}{1 + \frac{w}{a}} \right) \quad , \quad (1.17)$$

где *х* – 0,4- константа Кармана;

а – характеристика относительной шероховатости;

*V*<sub>\*</sub> – динамическая скорость, определяется равенством

$$V_* = \sqrt{gHI}$$
 , (1.18)

где *g* – ускорение свободного падения;

Н – глубина потока;

*I* –поверхностный уклон.

Рассмотрим также предложение В.Н.Гончарова. Вывод формулы он сделал на основе разработанной им концепции кинематической структуры потока. Помимо уравнений движения и неразрывности, он рассмотрел следующую систему уравнений:

$$u_* \approx V_*$$
,  $u_* = S \times \frac{du}{dy}$ ,  $\frac{V_*}{V_{*0}} = \frac{C}{y+C}$ , (1.19)

где *V*<sub>\*</sub>и *V*<sub>\*0</sub> – соответственно местная и начальная вертикальные составляющие скорости возмущений;

*u*<sub>\*</sub> – продольная составляющая скорости возмущений относительно масс жидкости основного потока;

С – постоянная, имеющая размерность длины (С =  $0,06\Delta$ );

*S* – коэффициент пропорциональности.

Решая систему уравнений для плоского турбулентного потока, Гончаров получает зависимость между местной и максимальной скоростями на вертикали:

$$\frac{u}{u_0} = \frac{ln\frac{y+C}{C}}{ln\frac{h}{C}} = \frac{lg\left(\frac{16,7y}{\Delta} + 1\right)}{lg\frac{16,7h}{\Delta}} \quad , \quad (1.20)$$

Используя формулу для расчета расхода воды, Гончаров получает зависимость между средней и максимальной скоростями:

$$\frac{V}{u_0} = \frac{ln\left(\frac{h}{2,7C}\right)}{ln\frac{h}{C}} = \frac{lg\left(\frac{6,15h}{\Delta}\right)}{lg\left(\frac{16,7h}{\Delta}\right)} \quad , \quad (1.21)$$

Подставляя значения  $u_0$  из формулы (1.21) в формулу (1.20), он получил:

$$u = V \times \frac{\ln\left(\frac{y+C}{C}\right)}{\ln\left(\frac{h}{2,7C}\right)} = V \times \frac{\lg\left(\frac{16,7y}{\Delta}+1\right)}{\lg\left(\frac{6,15h}{\Delta}\right)} \quad , \quad (1.22)$$

В некоторых работах используется степенной закон распределения осредненных скоростей по глубине потока, применимый как в гладких, так и в шероховатых руслах.

Например, Железняковым была предложена следующая зависимость:

$$\frac{\bar{u}}{\bar{u}_{max}} = \left(\frac{z}{h}\right)^{1/m} \quad , \qquad (1.23)$$

где  $\overline{u}$  и  $\overline{u}_{max}$  — соответственно средняя и максимальна скорости на вертикали;

*h* – глубина потока.

$$\frac{1}{m} = (\bar{u}_{max} - \bar{u}) \times \bar{u} \quad , \quad (1.24)$$

Коллупайло предложил степенную формулу:

$$u = aVy^{1/b}$$
 , (1.25)

где *а* и *b* – эмпирические коэффициенты;

*V* – средняя скорости на вертикали;

у – ордината, отсчитываемая от дна потока.

Степенные законы распределения скоростей, хорошо описывая турбулентное ядро течения, не учитывают особенностей движения вблизи стенки и в пристенной области неприменимы.

Таким образом, в настоящее время нет однозначного решения системы уравнений движения и неразрывности с целью определения расчетного профиля скоростей по глубине потока. Частичные решения, основанные на различных допущениях, приводят к существенно разным формулам, описывающим профиль скоростей плоского потока. Эти формулы, однако, дают близкие результаты за исключением придонной области, где Большинство исследователей, весьма велики. расхождение как уже отмечалось, отдают предпочтение логарифмическим зависимостям, оценивая степень соответствия различного вида формул натурными данными.

Для улучшения сходимости расчетной логарифмической кривой распределения скоростей в придонной области с кривой, полученной по экспериментальным и натурным данным, как уже известно, были разработаны двух и трехслойные модели. Выделим из них универсальную двухслойную модель И.К.Никитина, которая будет рассмотрена ниже отдельно.

1.2 Зависимости для распределения скоростей и гидравлических сопротивлений, основанные на двухслойной модели И.К.Никитина

Как уже известно, значения коэффициентов шероховатости, широко используемые в практике инженерных расчетов, весьма изменчивы и зависят от большого числа факторов, которые не всегда учитываются в таблицах. Этим условным коэффициентом по существу делается попытка оценить величину гидравлических сопротивлений. Однако, ввиду чрезвычайно большого разнообразия естественных русел, в которых коэффициенты шероховатости изменяются для одного и того же участка в зависимости от наполнения русла, фазы режима, сезона и других факторов, использование его вызывает большие затруднения.

В последние десятилетия ведутся поиски более рациональных путей оценки гидравлических сопротивлений. Изучение скоростной структуры турбулентного потока методом микрофотосъемки позволило И.К.Никитину по-новому подойти к решению этого вопроса. В 60-х годах, главным образом, на основе данных лабораторных опытов им была разработана двухслойная модель течения вблизи шероховатой поверхности. Как отмечает Никитин, его универсальную модель турбулентного движения следует рассматривать как уточнение движения в пристенных слоях в известной схеме Прандтля.

В основу модели положен экспериментально установленный факт существования пристенного подслоя  $\delta$  с линейным распределением осредненных скоростей, плавно сопротивляющегося с логарифмическим профилем турбулентного ядра.

В соответствии с принятой двухслойной моделью Никитиным получены следующие зависимости для профиля скоростей

Для пристенного подслоя

$$\frac{u}{u_{*\delta}} = Re_{*\delta} \times \frac{y}{\delta} \quad , \qquad 0 \le \frac{y}{\delta} \le 1 \qquad (1.26)$$

Для турбулентного ядра

$$\frac{u}{u_{*\delta}} = Re_{*\delta} \times \left(1,15 \, lg \frac{y}{\delta} + 1,5 - 0,5 \frac{\delta}{y}\right) \quad , \qquad 1 \le \frac{y}{\delta} \le \frac{n}{\delta} \qquad (1.27)$$

где *и* – местная скорость;

 $u_{*\delta}$  – динамическая скорость на границе пристенного подслоя;

 $\delta$  – толщина пристенного подслоя;

у – расстояние отсчитываемое от дна потока;

 $Re_{*\delta}$  — число Рейнольдса на верхней границе пристенного подслоя (рисунок



Рисунок 1.2- Схема двухслойной модели потока И.К.Никитина

1-ядро турбулентного потока;

2-пристеннный подслой;

δ- толщина пристенного подслоя;

 $\delta_{\rm M}$ - вязкий подслой.

По зависимостям (1.26) и (1.27) можно построить осредненный профиль скоростей по всей высоте у турбулентного течения, начиная от плоскости

y = 0, u = 0, представляющей физическое дно шероховатой поверхности, и до динамической оси потока y = h.

Двухслойную модель течения Никитин использовал для получения универсальной зависимости для коэффициента гидравлического трения λ, справедливой для всех режимов проявления шероховатости, от гидравлически гладкого до режима с квадратичным законом сопротивления включительно.

$$\frac{1}{\lambda} = Re_{*\delta\infty} \times \left(0,813 \, lg \, \frac{h}{\delta} + 0,706\right) \quad , \qquad (1.28)$$

где

$$Re_{*\delta\infty} = \psi\left(\frac{h}{\delta}\right)Re_{*\delta}$$
 , (1.29)

И

$$\Psi = \left(\frac{h}{\delta}\right) = \left(1 - \frac{\delta}{h}\right)^{3/2} \times \left[1 + \frac{0.5\frac{\delta}{h}}{\left(1 - \frac{\delta}{h}\right) \times \left(1.15 + lg\frac{h}{\delta} + 1\right)}\right] , \quad (1.30)$$

Пользуясь известным соотношением

$$C = \sqrt{\frac{2g}{\lambda}} \quad , \quad (1.31)$$

Можно от выражения (1.28) для коэффициента гидравлического трения перейти к зависимости для коэффициента Шези *С* 

$$C = \sqrt{2g} \times \left[ Re_{*\delta\infty} \left( 0.813 \, lg \frac{h}{\delta} + 0.706 \right) \right] \quad , \quad (1.32)$$

или с допустимой степенью приближения

$$C = Re_{*\delta\infty} \times \left(3,61 \, lg \frac{h}{\delta} + 3,1\right) \quad , \quad (1.33)$$

В формулы профиля скоростей (1.26) и (1.28), коэффициента гидравлического трения (1.28) и коэффициента Шези (1.32) входит параметр  $Re_{*\delta\infty}$ , являющийся характеристикой границы раздела потока  $y = \delta$  в двухслойной модели течения. Как показывает эксперимент, этот параметр зависит от отношения  $\frac{h}{\delta}$ . В потоках с $\frac{h}{\delta} \rightarrow \infty$ , что в случае течения у гладкой стенки соответствует предельно большим числам Рейнольдса потока  $Re, \psi(\frac{h}{\delta}) \rightarrow 1$  и  $Re_{*\delta\infty}$  становится равным  $Re_{*\delta}$ . Следовательно, параметр  $Re_{*\delta}$  является предельным значением числа  $Re_{*\delta\infty}$ , последнее в количественном отношении является более постоянной характеристикой.

Таким образом, основными параметрами формулы для расчета профиля скоростей, коэффициента гидравлического терния и коэффициента Шези двухслойной модели является  $Re_{*\delta\infty}$  и  $\delta$ . Параметр  $Re_{*\delta\infty}$  в некоторой степени характеризует форму потока и тип шероховатой поверхности. Толщина пристенного подслоя  $\delta$  отражает в интегральной форме влияние на поток шероховатости и процессов ее проявления. При введении величины  $\delta$  в формулы автоматически учитываются в неявной форме вся сложная картина реального движения вблизи шероховатой поверхности. Этим объясняется универсальность приведенных выше зависимостей.

#### 1.3 Пульсационные характеристики турбулентного течения

В реках, каналах и других водотоках обычно наблюдается турбулентный режим движения воды, который характеризуется перемешиванием водных масс, вызывающим пульсацию скоростей как по величине, так и по направлению. Причиной турбулентного перемешивания является возникновение вихрей на выступах шероховатости русла; вихри, отрываясь от выступов, проникают в толщу потока. В результате этого вся масса воды потока движется в условиях непрерывного перемешивания отдельных

объемов воды. В связи с этим скоростное поле потока представляет собой сложную картину, непрерывно меняющуюся во времени. Повороты русла, всевозможные препятствия (камни, водные растения), а также разные русловые образования (песчаные гряды, перекаты и др.) вносят искажения в скоростное поле потока. При обтекании потоком препятствий за ними возникают зоны завихрений, при этом возможно возникновение обратных течений. Современная аппаратура измерить позволяет И записать пульсационные изменения скорости течения BO времени. Подобные измерения показывают, что пульсационные изменения происходят с большой частотой, отдельные пики значительной причем амплитуды на накладываются пики меньшей амплитуды, но большей частоты. В открытых потоках амплитуда пульсаций обычно увеличивается от поверхности ко дну. В поперечном сечении потока амплитуда пульсаций возрастает от оси потока к берегам. Частотапульсаций мало зависит от положения точки в потоке и от размера потока. [4]

Большой интерес представляет течение в пограничном слое у шероховатой поверхности. Течение шероховатой поверхности так же, как и у гладкой, всегда разделяются на две области – пристенного подслоя  $\delta$  с четко выраженным линейным распределением скоростей и турбулентное ядро с близким к логарифмическому профилем. В режиме с квадратичным законом сопротивления возле границы подслоя  $\delta$  находятся также максимумы эпюр продольных пульсационных скоростей  $\sqrt{(\bar{u}_m')^2}$  и  $(\bar{u'v'})_m$ .

Для продольных u' и вертикальных v' составляющих пульсационных скоростей резко различным оказалось положение максимальных значений по высоте. Для u максимум связан с толщиной пристенного подслоя  $\delta$  и примерно совпадает с его верхней границей для течения у шероховатых стенок в режиме с полным проявлением шероховатости. Положение максимального значения v' не зависит от толщины пристенного подслоя  $\delta$ , а

определяется глубиной потока, располагаясь всегда на расстоянии примерно 0,18*h* от дна, независимо от его шероховатости. [6]

Анализ данных натурных и лабораторных измерений позволяет констатировать в потоке наряду с мелкомасштабными пульсациями наличие крупномасштабных пульсаций скоростей и других характеристик потока с периодами порядка десятков минут.

Основываясь на макромасштабной концепции турбулентности, наличие в потоке низкочастотных и высокочастотных пульсаций также объясняют прохождением вихрей соответствующих размеров. При этом размеры пульсаций скоростей и других характеристик потока тесно связывают с размерами вихревых структур. Установлено, что значение пульсаций скоростей возрастает с увеличением шероховатости русла и продольной



скорости потока [1].

Рисунок 1.3- Пульсационный характер изменения скоростей потока а, б - продольная и вертикальная составляющие.

На рисунке 1.3 показано изменение продольной *и* и вертикальной *v* составляющих скорости в конкретной точке, измеренных малоинерционным

датчиком. Мгновенные значения продольной и вертикальной составляющих скорости можно представить в виде суммы их осредненных значений  $\bar{u}$  и  $\bar{v}$  и пульсационных добавок u' и v':

$$u = \overline{u} + u'$$
  
 $v = \overline{v} + v'$ 

Определение осредненных значений скоростей производится по выражениям:

$$\bar{u} = \frac{\int_0^T u dt}{T}$$
$$\bar{v} = \frac{\int_0^T v dt}{T}$$

Следует отметить, что для плоского потока  $\bar{v} = 0$ .

В связи с наличием пульсации скоростей в гидрометрии различают мгновенную скорость и осредненную местную скорость. Мгновенной скоростью называется скорость в данной точке в данное мгновенье. Мгновенная скорость изменяется во времени по величине и по направлению. В гидрометрии обычно рассматривают не сам вектор мгновенной скорости, а его компоненты в прямоугольной системе координат. При этом одну из координатных осей направляют горизонтально вдоль продольной оси потока. Проекцию вектора мгновенной скорости на эту ось называют продольной составляющей или продольной скоростью. Проекцию же вектора на вертикальную ось называют вертикальной составляющей или вертикальной При измерении скоростей течения очень важно, чтобы скоростью. продолжительность отдельного измерения была бы не менее периода осреднения. В противном случае местная скорость будет определена неверно. Определению продолжительности периода осреднения при гидрометрических измерениях были посвящены многочисленные исследования. Строго говоря, даже в различных точках одной и той же

вертикали период осреднения должен быть различным, — как правило, он возрастает от поверхности ко дну. Однако, определение периода осреднения при каждом отдельном измерении очень усложнило бы производство гидрометрических работ. Поэтому у нас принято производить измерение скорости течения в точке в течение 60 секунд, что для большинства случаев оказывается достаточным, т. е. это время превышает период осреднения. При большой степени турбулентности этой продолжительности может все же оказаться недостаточно. Тогда она должна быть увеличена. Следует иметь в виду, что направления векторов местных скоростей в отдельных точках могут сильно отклоняться от общего направления движения потока. Многочисленными наблюдениями установлено, что в реках даже при препятствий, искажающих отсутствии скоростное поле, отклонение скоростных векторов от общего направления потока может достигать в отдельных точках живого сечения 50—65 градусов.[8]

#### 2. Обзор натурных данных

#### 2.1 Общие сведения

2.1.1 Рельеф и геология

В основу исследования положены данные специальных наблюдений на беспойменном участке реки Оредеж в районе поселка Батово Гатчинского района Ленинградской области.

Река Оредеж является правым притоком реки Луги, которая относится к бассейну Балтийского моря. Бассейн Балтийского моря расположен между 67°40` - 55° 36`с.ш и 27°20`- 37°57` в.д и занимает площадь 396 тыс. км<sup>2</sup>.

По характеру геологического и геоморфологического строения территория разделяется на две области: Карелия и Северо-Запад. Нас будет интересовать Северо-западная часть этой территории, которая в свою очередь разделяется на: 1) северо-западную – неизменную и 2) восточную, юго-восточную и южную- возвышенную. Северо- западная часть расположена в основном в пределах Прибалтийской низменности, уходящей на западе на территорию Эстонии и Латвии, а на севере и северо-востоке – в Карелию.

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

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

Территория Северо-Запада расположена почти целиком в пределах Русской платформы и сложена комплексом осадочных дочетвертичных отложений, залегающих под четвертичными на архейском или протерозойском кристаллическом основании. Лишь самая северная окраина территории - север Карельского перешейка- относится к южной оконечности Балтийского щита и сложена древнейшими кристаллическими породами архейско-протерозойского комплекса, представленного различного рода гнейсами и сланцами[9].

#### 2.1.2 Почвенный покров

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

Глубина промерзания почвы зависит от рельефа местности, а также от интенсивности нарастания отрицательных температур воздуха и наличия

снежного и растительного покрова, механического состава почвы и ее увлажнения.

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

#### 2.1.3 Растительность

Рассматриваемая территория расположена преимущественно в пределах таежной зоны.

Таежные полосы представлены следующими типами растительности:

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

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

2.1.4 Климат

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

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

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

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

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

Величина испарения является одним из основных расходных элементов водного баланса, на который в условиях Северо-Запада затрачивается 50-70% атмосферных осадков, поступающих на поверхность водосбора[9].

#### 2.1.5 Описание реки Оредеж и участка наблюдений

Река Оредеж берет начало из Кикеренских болот и течет в северовосточном направлении, сильно меандрирует. Впадение реки Оредеж в реку Лугу происходит на 194 км от устья последней. Длина реки 201 км, общая площадь водосбора 3400 км<sup>2</sup>. Площадь водосбора в районе наблюдений составляет 192 км<sup>2</sup>. Отметка истока-112,6 м БС, устья-31,6 м., в результате общее падение реки составляет 81 м.

Прилегающая местность-слабовсхолмлённая на пологом юговосточном склоне Ижорской возвышенности, покрытая смешанным лесом и сельскохозяйственными угодьями.

Долина реки неясно выражена. В районе проведения работ долину реки можно отнести к V-образной форме. Преобладающая ширина долины 150-200 м, наибольшая- 1,5 км у с. Рыбицы и наименьшая- 10 м. у д. Даймище.

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

Река Оредеж зарегулирована гидротехническими сооружениями, которые в настоящее время не эксплуатируются.

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

Суточные колебания уровня воды незначительны, но во время обильных дождей уровень резко повышается, что вызывает затопление поймы. Уровни весеннего половодья превышают меженные на 1-2 м в верхнем и среднем течении.

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

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

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

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

Высота снега в поле средняя за зиму около 45 см, максимальная-71 см, минимальная- 19 см. В леса средняя- 36 см, максимальная- 63 см, минимальная – 14 см. Годовые осадки могут достигать 708 мм.

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

2.1.6 Характеристика высшей водной флоры реки Оредеж

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

виды которого играют решающую роль в сложении растительного покрова таежной зоны (ель и сосна) полностью отсутствует среди водных растений. Отдел Покрытосеменных представлен в водной флоре видами двух классов: класс Однодольных насчитывает 19 видов, а класс Двудольных - 9 видов. Наиболее крупным родом является Рдест, который содержит 5 видов, произрастающих в районе исследования. Род Осока представлена 3 видами прибрежно-водных растений (несомненно, количество видов этого рода, произрастающих по берегам Оредежа. Остальные роды высших водных растений представлены по одному виду. Наиболее крупным семейством, содержащим 5 видов, является семейство Рдестовые. Семейство Осоковые содержит 4 вида, по 2 вида - семейства Частуховые, Водокрасовые, Злаковые и Лютиковые. Остальные семейства содержат по 1 виду. Подавляющее большинство семейств содержит по роду, а по 2 рода содержится в семействах Водокрасовые, Злаковые, Осоковые и Лютиковые. Почти все представители водной флоры являются многолетними растениями, исключение составляет лишь 1 вид - болотник болотный, который является однолетним растением. Очень редким видом для Северо-Запада европейской части России в целом, произрастающим только в окрестностях Донцо на сильно минерализованной влажной почве, является дубровник чесночный. Oh. безусловно, заслуживает самой строгой охраны на территории Ленинградской области. Охраняемым видом на территории Ленинградской области является кубышка желтая. К числу довольно редких видов для Ленинградской области относятся рдест нитевидный, шелковник неукореняющийся, вероника ключевая. Эти виды в Оредеже не являются редкими, что, по-видимому, связано с особым химическим составом его воды. Как лекарственные растении в народной медицине используются хвощ речной (мочегонное), рогоз широколистный (дезинфицирующее И противомикробное), рдесты (противомикробное и вяжущее), стрелолист обыкновенный (ранозаживляющее), частуха подорожниковая (мочегонное), сусак зонтичный (жаропонижающее и мягчительное), водокрас лягушачий

(мягчительное), болотник болотный (при глазных болезнях). Вахта является трехлистная не только хорошо известным лекарственным средством, но и красильным (дает зеленую краску), медоносным, пряноароматическим (используется в ликероналивочном производстве и В пивоварении) и кормовым (для промысловых животных) растением. Менее обладающая известная вероника ключевая, также лекарственными свойствами, может использоваться как витаминное, пищевое (листья съедобны) И кормовое (пастбищное) растение. Как пищевые (крахмалоносные) растения могут использоваться рогоз широколистный, стрелолист обыкновенный и сусак зонтичный. Питательным белковым растением с хорошими вкусовыми качествами является ряска трехдольная. Эти виды водных растений заслуживают более внимательного отношения к себе со стороны селекционеров: на их основе можно вывести новые пищевые культуры, приспособленные к условиям таежной зоны, покрывающей Ленинградскую область всю без исключения декоративными растениями, способные украсить небольшой водоем на приусадебном участке, являются сусак зонтичный, водокрас лягушачий, лютик длиннолистый, болотник болотный И незабудка болотная. Кормовыми растениями являются двукисточник тростниковый и тростник обыкновенный. Среди водных растений есть и ядовитые: это частуха подорожниковая кубышка желтая и лютик длиннолистый.

#### 2.1.7 Причины интенсивного зарастания русла реки Оредеж

Причины интенсивного зарастания русла Оредежа высшими водными растениями могут быть различными. Река Оредеж из-за того, что она подпружена плотинами, затопила свою пойму. Так как пойма является достаточно эвтрофным участком речной долины из-за большого количества

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

#### 2.2 Обработка и первичный анализ натурных данных

#### 2.2.1 Описание участка наблюдений

Участок реки, на котором производились работы был выбран путем удовлетворения условиям, описанным в «Наставлении гидрометеорологическим станциям и постам» выпуск 6 ч. 1 [10].

Данный створ был назначен согласно всем правилам, описанным в наставлении, режим реки на этом створе является характерным для достаточно большого участка это значит, что результаты наблюдений считаются репрезентативными и их можно использовать для дальнейших расчетов.

Участок должен быть удобным для производства наблюдений, обеспечивать максимально возможную точность в данных условиях.

Характерность режима реки, удобство и обеспечение точности наблюдений должны быть с возможной полнотой оценены на месте при обследовании реки. На выбранном участке реки в летний период 2015 года были выполнены детальные измерения расходов воды, способом обметки с многоточечными измерениями скоростей. Также фиксировался уклон водной поверхности. Трава в пределах гидроствора выкашивалась постепенню. Были произведены измерения скорости течения микро-вертушкой в период полного зарастания реки травой, далее были измерены скорости течения при прокосе равном 1 метр, 5 метров и 10 метров. Промеры производились штангой с лодки через 1 метр, скоростные вертикали назначались через 2 метра. Таким образом измерение скоростей производилось на 7-ми вертикалях. По измеренным глубинам был построен поперечный профиль гидроствора №4 на р. Оредеж)

Нивелирование гидрологического поста производят для определения высот водомерных устройств, относительно которых производят наблюдения за уровнем воды в реке. Такими устройствами для реечных гидрологических постов является «0» водомерной рейки. Нивелирный ход прокладывают от основного репера и до водомерной рейки в прямом и обратном направлении. Расхождение между превышениями в двух данных точках не превышает 3 мм. Отметка репера 97.794 мБс, в результате нивелирного хода отметка «0» рейки составила 90,667 мБс, отметка уреза воды составила 91,017 мБс, превышение между репером и отметкой уреза воды составило 5,117 м.

#### 2.2.2 Методика измерений

На выбранном участке в летний период 2015 года, а также в зимний период 2016 года были выполнены детальные измерения расходов воды, способом обметки с многоточечными измерениями скоростей. Параллельно с измерениями скоростей воды фиксировался уклон водной поверхности. В период зимы работы производились с лодки, так как ледовые явления отсутствовали.

Летом на поперечниках вертикали назначались через 2 м. Характеристики, полученные в результате натурных наблюдений помещены в приложение Б. (Приложение Б.- Таблица измеренных расходов воды).

Расходы воды измерялись микро-вертушкой при полном зарастании русла, далее измерения расходов воды производились вертушкой ГР-21 при прокосах 1-5-10 метров. Промеры производились штангой с лодки через 0,5 метра, скоростные вертикали назначались через 2 метра.

2.2.3 Первичная обработка натурных данных
Первичная обработка натурных данных заключалась в аналитической и графической обработке расходов воды при различных прокосах воды на гидростворе. В качестве примера в приложении В (Приложение В.-Графическая обработка расхода воды) приведен пример графической обработки расхода воды от 07.07.2015года. Для более полного анализа были построены эпюры распределения скоростей по глубине потока на вертикалях при различном зарастании русла. (Приложение Г.- Эпюры распределения скоростей по глубине потока на вертикалях).

Для построения вышеуказанных зависимостей использовались данные наблюдений за июль 2015 и февраль 2016 года.

Анализируя эпюры скоростей можно сделать вывод, что характер изменения скорости по глубине по мере увеличения ширины прокоса приближается к стандартному виду эпюры при свободном русле.

#### 3. Результаты расчетов и их анализ

### 3.1 Обработка данных натурных наблюдений по методике И.К.Никитина

И.К. Никитин предложил статистический подход для выявления общих для пристеночной области закономерностей, основанный на осреднении характеристик большого числа вертикалей, разбросанных по элементу шероховатой поверхности, отражающему с достаточной полнотой ее шероховатые свойства. [7] Порядок обработки данных наблюдений заключается в следующем по данным измеренных значений глубины и скорости строятся эпюры скоростей.

Для построения осредненного профиля скоростей по площади потока рассчитывается зависимость

$$\frac{u}{V} = f\left(\frac{y}{h}\right)(3.1)$$

где *и* – мгновенная скорость в точке измерения;

*V* – средняя скорость на вертикале;

y = (0,2;0,4;0,6;0,8)h;

*h* – глубина на вертикали.

Полученные значения затем используют для построения в логарифмических координатах точек измерения профиля скоростей u(y). (Приложение Д.-Эпюры скоростей u|z|)

Анализ измеренного профиля скоростей выполняется графическим примеров по формулам:

$$\frac{u}{u_{*\delta}Re_{*\delta}} = \frac{y}{\delta'} \quad , \qquad 0 \le \frac{y}{\delta} \le 1 \; , \qquad (3.2)$$

$$\frac{u}{u_{*\delta}Re_{*\delta}}1,15lg\frac{y}{\delta}+1,5-0,5\frac{\delta}{y} \quad , \qquad 1 \le \frac{y}{\delta} \le \frac{h}{\delta} \quad . \tag{3.3}$$

на прозрачной пленке строиться кривая профиля скоростей двухслойной модели в логарифмических координатах (Приложение Е.- Логарифмический профиль скоростей)

$$lg \frac{u}{u_{*\delta} Re_{*\delta}} = f\left(\lg \frac{y}{\delta}\right). \quad (3.4)$$

Отдельно на листе бумаги в тех же логарифмических координатах и с тем же масштабом осей откладываются точки измеренного профиля

$$\lg u = f(\lg y) . (3.5)$$

Далее пленка накладывается на этот график и перемещением ее с сохранением параллельности осей, как это показано в приложении Ж (Приложение Ж.- Графический анализ эпюры скоростей u|z|), зависимость совмещается с точками измерений так, чтобы среднеквадратическое отклонение было наименьшим. [6]

Отсчеты по координатным осям для совмещенного в области пристеночного течения положения графиков связаны соотношениями

$$lg \frac{u}{u_{*\delta}Re_{*\delta}} = lg u - lg(u_{*\delta}Re_{*\delta}), (3.6)$$
$$lg \frac{y}{\delta} = lg y - lg \delta, (3.7)$$

Следовательно, отсчитав в этом положении сдвиг шкал  $lg \, u - lg \left( \frac{u}{u_{*\delta} Re_{*\delta}} \right)$ ,

Согласно формуле (3.6) получим величину  $lg(u_{*\delta}Re_{*\delta})$  и найдем произведение  $(u_{*\delta}Re_{*\delta})$ . Аналогично, отсчитав сдвиг осей  $lg y - lg \frac{y}{\delta}$ , найдем в соответствии с (3.7) толщину пристенного подслоя  $\delta$ . При этом совершенно не обязательно, чтобы точки измерений скоростей u, захватывали область подслоя  $\delta$ , данный способ позволяет определить величину  $\delta$  и в тех случаях, когда имеется достоверно измеренный профиль скоростей турбулентного ядра течения.

Анализ профиля u(y) позволяет получить произведение  $(u_{*\delta}Re_{*\delta})$ , для того чтобы определить из него параметр  $Re_{*\delta}$ , предварительно вычислив динамическую скорость  $u_{*\delta}$ ,

38

$$u_{*\delta} = \sqrt{gh_{\rm cp}I} \times \left(1 - \frac{\delta}{h_{\rm cp}}\right)$$
, (3.8)

Двухслойную модель течения Никитина использовал для получения универсальной зависимости для коэффициента гидравлического трения λ, справедливой для всех режимов проявления шероховатости, от гидравлически гладкого до режима с квадратичным законом сопротивления включительно.

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = Re_{*\delta\infty} \times \left(0.813 \times lg \frac{h}{\delta} + 0.706\right), \qquad (3.9)$$

где 
$$Re_{*\delta\infty} = \psi\left(\frac{h}{\delta}\right) \times Re_{*\delta}$$
, (3.10)  
 $\mu \psi\left(\frac{h}{\delta}\right) = \left(1 - \frac{\delta}{k}\right)^{3/2} \times \left[1 + \frac{0.5\frac{\delta}{h}}{\left(1 - \frac{\delta}{h}\right) \times \left(1.15 lg\frac{h}{\delta} + 1\right)}\right],$  (3.11)

Пользуясь известным соотношением

$$C = \sqrt{\frac{2g}{\lambda}}, (3.12)$$

Можно от выражения для коэффициента гидравлического трения перейти к зависимости для коэффициента Шези С

$$C = \sqrt{2g} \times \left[ Re_{*\delta\infty} \left( 0,813 \, lg \frac{h}{\delta} + 0,706 \right) \right] \quad , \qquad (3.13)$$

или с допустимой степенью приближения записать:

$$C = Re_{*\delta\infty} \times \left(3,6 \lg \frac{h}{\delta} + 3,1\right) \quad , \qquad (3.14)$$

В формулы (3.13) и (3.14) входит параметр  $Re_{*\delta\infty}$ , являющийся характеристикой границы раздела потока  $y = \delta$ , в двухслойной модели течения. Как показывает эксперимент, этот параметр зависит от отношения  $h/_{\delta}$ . В потоках с  $h/_{\delta} \to \infty$ , что в случае течения у гладкой стенки

соответствует предельно большим числам Рейнольдса потока Re ,  $\psi \left( \frac{h}{\delta} \right) \rightarrow$ 

1 и  $Re_{*\delta\infty}$  становится равными  $Re_{*\delta}$ . Следовательно, параметр  $Re_{*\delta}$  является предельным значением числа  $Re_{*\delta\infty}$ .

Таким образом, основными параметрами формул для расчета эпюры скоростей, коэффициента Шези двухслойной модели является  $Re_{*\delta\infty}$ и б. Параметр  $Re_{*\delta\infty}$  в некоторой степени характеризует форму потока и тип шероховатой поверхности. Толщина пристенного подслоя б отражает в интегральной форме влияние на поток шероховатости поверхности и процессов ее проявления.

При введении величины б в формулы автоматически учитывается в неявной форме вся сложная картина реального движения вблизи шероховатой поверхности. Этим объясняется универсальность приведенных выше зависимостей.

Результаты обработки данных натуральных наблюдений по методике И.К. Никитина помещены в Приложение И. (Приложение И.- Результаты обработки данных натурных наблюдений по методике И.К.Никитина).

Анализ результатов расчетов позволяет сделать следующие выводы:

 Двухслойная модель турбулентного движения, предложенная И.К.
 Никитиным, и полученные им универсальные зависимости для профиля скоростей и коэффициента гидравлического трения λ могут быть использованы для описания скоростной структуры и гидравлических сопротивлений в русловых потоках. Рассчитанные и измеренные значения б мало отличаются друг от друга. Это имеет принципиальное значение, так как зависимости были получены И.К. Никитиным, главные рассчитанные анализа данных лабораторных образом, на основе экспериментов. Необходимо отметить, что это не первый расчетный материал, для одного и того же участка наблюдений, такие расчеты уже проводились, использовался материал с 1991 по 1993 и 2014 годах. Расчеты, произведенные за предыдущий ряд лет, показали близкое соответствие с представленными в данной бакалаврской работе.

 Толщина пристенного подслоя δ для одной и той же реки изменятся в зависимости от ее водности. В маловодные годы увеличивается влияние растительности, которое заключается в увеличении толщины слоя δ и возрастании коэффициента λ.

3). Значение параметра  $Re_{*\delta\infty}$ с изменением водности реки изменяется незначительно, т.е. подтвердилось предположение о более или менее постоянной величине этого числа для разных случаев движения жидкости.

### 3.2 Подбор закона распределения скоростей по глубине потока

Как было отмечено выше, одной из важнейших задач является теоретическое описание профиля осредненных скоростей по глубине потока.

В данной бакалаврской работе предпринимается попытка подобрать закон распределения скоростей применительно к реке Оредеж, в зависимости от

степени прокоса русла, на выбранном участке наблюдений, кроме зависимости И.К. Никитина.

Расчет теоретической эпюры распределения производится в относительных координатах.

$$\frac{u}{\overline{V}} = f\left(\frac{z}{h}\right) \quad , \quad (3.15)$$

где  $\bar{V}$  — средняя скорость на вертикали, м/с.

Для расчета использовались следующие формулы:

А.В. Караушева:  $u = u_0 \times \sqrt{\left(1 - 10,57 + \frac{3,3}{c}\right) \times \left(1 - \frac{y}{h}\right)^2}$ , (3.16) где y = z;

Формула Базена:

$$u = u_0 - \frac{mV}{C} \times \left(1 - \frac{z}{h}\right)^2 \quad , \quad (3.17)$$

Формула В.Н. Гончарова:

$$u = V \times \frac{lg\left(\frac{16,7}{\Delta} + 1\right)}{lg\frac{6,15h}{\Delta}} \quad , \quad (3.18)$$

где  $\Delta = (22,2n)^2$  и  $\Delta = \delta$ .

Для нахождения ∆ были использованы данные полученный в 2014 году при отборе проб донных отложений на участке наблюдений, для которых был произведен гранулометрический анализ и получены значения К<sub>ср</sub> по формуле

$$K_{\rm cp} = \frac{\sum (k_i \times p_i)}{100} = 0,84$$
 мм

42

где  $k_i$  — диаметр частиц;

*p<sub>i</sub>* – процент содержания *i*- ой фракции в общей смеси.

<i>d</i> , мм	<i>т</i> , мм	%
0,001	2,08	1,94
0,0	5,47	3,71
0,1	22,9	5,94
0,2	72,3	7,49
0,4	3,01	10,3
0,5	1,83	12,8
0,8	2,63	74,1
1,1	2,09	93,6
1,5	2,09	98,2
2,0	2,29	100
Σ	117,9	100

Таблица 3.1- Результаты гранулометрического анализа

После этого находили значение  $\Delta$  по формуле:

$$\Delta = 0,7 \times k_5 = 0,0009$$
 м

где  $k_5$  — крупность наибольшей фракции наносов, процент которой в смеси 5

$$k_5 = 1,\!25$$
 мм

Таблица 3.2. – Значения рассчитанных местных скоростей без прокоса

<i>h</i> м	и, м/с			
10) 11	Степенная	Караушев	Базен	Гончаров
0,99	0,213	0,213	0,213	0,213
0,79	0,186	0,210	0,199	0,208
0,60	0,154	0,199	0,159	0,201

0,40	0,120	0,179	0,091	0,192
0,20	0,076	0,147	-0,003	0,177
0,01	0,011	0,092	-0,124	0,110

По данным таблицы 3.2 был построен график Приложение К. - Эпюры распределения продольных скоростей по вертикале по натурным данным и расчетным зависимостям без прокоса.

Анализ графика показывает, что эпюры, рассчитанные по формулам Базена, Караушева и Гончарова не соответствуют данным натурным наблюдений. Это можно объяснить тем, что расчеты проводились по натурным данным при полном зарастании русла.

Таблица 3.3. – Значения рассчитанных местных скоростей при прокосе 1 метр

h M	и, м/с				
70, M	Степенная	Караушев	Базен	Гончаров	
1,03	0,245	0,245	0,245	0,245	
0,82	0,229	0,241	0,229	0,239	
0,62	0,195	0,228	0,183	0,232	
0,41	0,150	0,206	0,105	0,221	
0,21	0,081	0,170	-0,004	0,203	
0,01	0,021	0,106	-0,144	0,126	

По данным таблицы 3.3 был построен график Приложение Л. - Эпюры распределения продольных скоростей по вертикале по натурным данным и расчетным зависимостям при прокосе 1 метр.

Анализируя полученный график можно сделать вывод, что эпюра, построенная по натурным данным, по мере увеличения прокоса приобретает стандартный вид для свободного русла и формулы Базена и Гончарова удовлетворительно описывают данное распределение скоростей.

Таблица 3.4. – Значения рассчитанных местных скоростей при прокосе 5 метров от 07.07.2015

<i>h,</i> м	и, м/с
-------------	--------

	Степенная	Караушев	Базен	Гончаров
0,99	0,197	0,197	0,197	0,197
0,79	0,189	0,194	0,184	0,192
0,60	0,172	0,184	0,147	0,186
0,40	0,134	0,166	0,084	0,178
0,20	0,070	0,136	-0,003	0,164
0,01	0,011	0,085	-0,115	0,102

По данным таблицы 3.4 был построен график Приложение М. - Эпюры распределения продольных скоростей по вертикале по натурным данным и расчетным зависимостям при прокосе 5 метров от 07.07.2015 года.

Таблица 3.5. – Значения рассчитанных местных скоростей при прокосе 5 метров от 08.07.2015 года

<i>b</i> м	и, м/с				
7 <i>t</i> , M	Степенная	Караушев	Базен	Гончаров	
0,991	0,201	0,201	0,201	0,201	
0,793	0,184	0,198	0,188	0,197	
0,595	0,167	0,187	0,150	0,191	
0,396	0,138	0,169	0,086	0,182	
0,198	0,074	0,139	-0,004	0,167	
0,000	0,034	0,087	-0,118	0,104	

По данным таблицы 3.5 был построен график Приложение Н. - Эпюры распределения продольных скоростей по вертикале по натурным данным и расчетным зависимостям при прокосе 5 метров от 08.07.2015 года.

Таблица 3.6. – Значения рассчитанных местных скоростей при прокосе 10 метров от 09.07.2015 года

<i>h</i> , м	и, м/с
--------------	--------

	Степенная	Караушев	Базен	Гончаров
0,991	0,151	0,151	0,151	0,151
0,793	0,142	0,149	0,132	0,147
0,595	0,135	0,141	0,100	0,143
0,396	0,127	0,127	0,052	0,136
0,198	0,115	0,104	-0,102	0,125
0,001	0,074	0,065	-0,314	0,078

По данным таблицы 3.6 был построен график Приложение П. - Эпюры распределения продольных скоростей по вертикале по натурным данным и расчетным зависимостям при прокосе 10 метров от 09.07.2015 года.

Анализируя полученный график можно сделать вывод, что эпюра, построенная по натурным данным, лучше всего аппроксимируется расчетной логарифмической зависимостью Гончарова и эллиптической Караушева.

Таблица 3.7. – Значения рассчитанных местных скоростей при прокосе 10 метров от 10.07.2015 года

<i>h</i> м	и, м/с				
70, 14	Степенная	Караушев	Базен	Гончаров	
1,00	0,150	0,150	0,150	0,150	
0,80	0,142	0,148	0,139	0,146	
0,60	0,136	0,140	0,107	0,142	
0,40	0,130	0,126	0,052	0,135	
0,20	0,120	0,104	-0,021	0,125	
0,00	0,072	0,065	-0,068	0,077	

По данным таблицы 3.7 был построен график Приложение Р. - Эпюры распределения продольных скоростей по вертикале по натурным данным и расчетным зависимостям при прокосе 10 метров от 10.07.2015 года.

Анализируя полученный график можно сделать вывод, что эпюра, построенная по натурным данным, лучше всего аппроксимируется расчетной логарифмической зависимостью Гончарова и эллиптической Караушева.

Таблица 3.8. – Значения рассчитанных местных скоростей при прокосе 10 метров от 14.07.2015 года

<i>h</i> м	и, м/с				
76, 14	Степенная	Караушев	Базен	Гончаров	
0,991	0,144	0,144	0,144	0,144	
0,793	0,137	0,142	0,134	0,141	
0,595	0,132	0,134	0,103	0,137	
0,396	0,125	0,121	0,052	0,130	
0,198	0,111	0,100	-0,020	0,120	
0,001	0,065	0,062	-0,111	0,074	

По данным таблицы 3.8 был построен график Приложение С. - Эпюры распределения продольных скоростей по вертикале по натурным данным и расчетным зависимостям при прокосе 10 метров от 14.07.2015 года.

Анализируя полученный график можно сделать вывод, что эпюра, построенная по натурным данным, лучше всего аппроксимируется расчетной логарифмической зависимостью Гончарова и эллиптической Караушева.

Таблица 3.9. – Значения рассчитанных местных скоростей 12.02.2016

ћ м	и, м/с				
70, 14	Степенная	Караушев	Базен	Гончаров	
1,240	0,191	0,191	0,191	0,191	
0,992	0,164	0,175	0,152	0,186	
0,744	0,144	0,157	0,123	0,180	
0,496	0,120	0,137	0,089	0,172	
0,248	0,085	0,113	-0,005	0,158	
0,001	0,065	0,082	-0,085	0,098	

По данным таблицы 3.8 был построен график Приложение Т. - Эпюры распределения продольных скоростей по вертикале по натурным данным и расчетным зависимостям от 12.02.2016 года.

Анализируя полученный график можно сделать вывод, что эпюра, построенная по натурным данным, лучше всего аппроксимируется расчетной логарифмической зависимостью Гончарова и эллиптической Караушева.

Общий анализ графиков позволяет сделать вывод, что в качестве наиболее удовлетворительного на прокосе 10 метров можно рекомендовать распределение В.Н.Гончарова, на прокосах менее 10 метров рекомендовать распределение Базена, так как они значительно лучше соответствуют натурным данным. Удовлетворительность распределения Гончарова можно объяснить отсутствием в этих формулах коэффициента шероховатости *C*.

Необходимо отметить, что зимние распределения практически не отличаются от летнего это можно объяснить тем, что в этот год на реке отсутствовали ледовые явления.

3.3 Расчет пристенного слоя по данным о пульсациях скорости

Распределение пульсаций продольных составляющих скоростей характеризуется наличием четко выраженного максимума вблизи дна потока значительно сложнее картина распределения пульсаций скоростей в естественных потоках. [7]

Натурные данные, которые легли в основу расчета пристенного слоя были измерены зимой на самой глубокой вертикале. Глубина вертикале составила 1,24 м. Пульсации скорости измерялись через 10 см. в точках по глубине. Измерения повторялись три раза, далее полученные данные были осреднены и занесены в приложение У. (Приложение У. – Натурные данные пульсаций скорости).

Был произведен анализ полученных натурных данных и построен график изменения осреднённых пульсационных добавок по глубине потока.

Рисунок 3.1 - Эпюры изменения осреднённых пульсационных добавок по глубине потока.

48



Анализ данных измерений показал, что для получения средней скорости в точке период осреднения 60 секунд мал. Необходимо вернутся к старым правилам измерения, где время осреднения принималось не менее 100 секунд. Величина пристенного слоя получилась равной  $\delta = 0,38$  мм. полученный результат нуждается в проверке для чего необходимо в летний период 2016 года на практике по гидрометрии повторно произвести измерения пульсационных составляющих скорости с применением более точного способа измерения и оборудования.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Оценивая результаты выполненной работы хочется отметить следующие выводы:

Во-первых, первичная обработка натурных данных указывает на то, что особенность рассматриваемой реки Оредеж заключается в том, что река сильно зарастает в летний период, тем самым растительность создает подпор- уровень повышается, хотя водность реки не изменяется.

Во-вторых, обработка натурного материала по методике И.К.Никитина дала хорошие результаты, по которым можно с уверенностью делать выводы о ее применимости и оправдываемости в натурных условиях.

В связи с эти хочется отметить следующее:

1). Двухслойная модель турбулентного движения жидкости, предложенная И.К. Никитиным и полученные им универсальные зависимости для профиля скоростей и коэффициента гидравлического трения λ, могут быть использованы для описания скоростной структуры потока и гидравлических сопротивлений в русловых потоках. Рассчитанные и измеренные скорости мало отличаются друг от друга;

2). Толщина придонного слоя δ для одной и той же реки изменяется в зависимости от ее зарастания и водности, но эти изменения незначительны из-за мало изменяющихся расходов. В 2015 году наблюдалось увеличение влияния растительности, которое сказывается на увеличении коэффициента гидравлического трения λ;

3). По результатам проверки законов распределения скоростей по вертикали на рассматриваемом участке рек Оредеж, в качестве наиболее удовлетворительных можно рекомендовать законы распределения скоростей по глубине, описываемые формулами В.Н. Гончарова при свободном русле. Расчетные формулы Гончарова и Караушева наиболее лучшим образом

50

соответствуют эмпирическому распределению скоростей в период лета 2015 года и зимы 2016 года. Необходимо отметить, что ледовых явлений зимой 2016 года не наблюдалось и в связи с этим распределение скоростей практически не отличается от летнего.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

- Барышников Н.Б. Динамика русловых потоков. [Учебник.] СПб. изд. РГГМУ, 2007. -314 Стр.
- 2. Быков В.Д., Васильев А.В. Гидрометрия. [Учебник.] Л. Гидрометизд., 1977. -444 Стр.
- Железняков Г.В. Теория гидрометрии. [Учебник]. Л. Гидрометизд. 1976-344 Стр.
- Карасёв И.Ф. Речная гидрометрия и учет водных ресурсов. [Учебник]. -Л. Гидрометизд, 1980- 310 Стр.
- Караушев А.В. Речная гидравлика. [Учебник].- Л. Гидрометизд., 1969-415 Стр.
- 6. Никитин И.К. Сложные турбулентные течения и процессы тепломассопереноса [Учебник]- Киев.: Наукова думка,1980-237 Стр.
- Никитин И.К. Турбулентный русловой поток и процессы в придонной области [ Учебник] - Киев.: Издательство АН УССР.1963-144 Стр.
- Спицын И.П., Соколова В.А.Общая и речная гидравлика-[Учебник]. -Л.: Гидрометизд.1990г.
- Основные гидрологические характеристики Т.2- часть 1-2, Бассейн Балтийского моря-1980г.
- Наставлении гидрометеорологическим станциям и постам выпуск 6 ч.
   1



# Приложение А.-Поперечный профиль гидроствора №4 на р. Оредеж

h,м

Дата измерения	Уровень воды (см) над нулем графика Гидроствор	Расход воды, м <sup>3</sup> /с	Площадь	Скорос	ть течения, 1/сек	ия, Уклон		Глубина, м		Способ
			живого сечения, м <sup>2</sup>	средняя	наибольшая	водной пов-ти, ‰	Ширина русла, м	средняя	наибольшая	измерения расхода
02.07.2015	58	3,69	24,4	0,148	0,254	0,05	25,8	1,00	1,53	110060
04.07.2015	60	2,67	24,9	0,108	0,239	0,08	25,8	1,03	1,53	110060
07.07.2015	57	3,65	23,5	0,153	0,327	0,08	25,8	0,99	1,53	110050
08.07.2015	56	2,65	23,5	0,115	0,162	0,08	25,8	0,99	1,53	11050
09.07.2015	57	2,56	23,8	0,109	0,164	0,08	25,8	0,93	1,53	11050
10.07.2015	58	2,41	23,8	0,105	0,179	0,08	25,8	1,00	1,53	11050
14.07.2015	58	2,56	23,8	0,101	0,136	0,08	25,8	1,00	1,53	11050
12.02.2016	56	1,81	22,4	0,121	0,184	0,08	25,8	0,84	1,24	11050





Приложение Г.- Эпюры распределения скоростей по глубине потока на вертикалях



## Приложение Г.1.- Эпюры распределения скоростей по глубине потока на вертикалях



Распределение скоростей по глубине потока Вертикаль 4







Приложение Г.3.- Эпюры распределения скоростей по глубине потока на вертикалях



Приложение Г.4.- Эпюры распределения скоростей по глубине потока на вертикалях



## Приложение Г.5.- Эпюры распределения скоростей по глубине потока на вертикалях

## Приложение Г.6.- Эпюры распределения скоростей по глубине потока на вертикалях



Распределение скоростей по глубине Вертикаль 9



Приложение Д.1.- Эпюры скоростей *u*|*z*|





Приложение Д.2.- Эпюры скоростей u|z|

Приложение Д.3.- Эпюры скоростей *u*|*z*|



Прокос 5 метров от 08.07.2015г.



Приложение Д.4.- Эпюры скоростей u|z|



Прокос 10 метров от 10.07.2015г.



Приложение Д.6.- Эпюры скоростей u|z|


Приложение Д.7.- Эпюры скоростей u|z|



Приложение Ж.- Графический анализ эпюры скоростей *u*|*z*|



Дата	<i>Q</i> , м <sup>3</sup> /с	<i>V<sub>изм</sub>,</i> м/с	h <sub>ср</sub> , м	$\lambda_{_{H3M}}$	<i>С<sub>изм</sub>,</i> м <sup>0,5</sup> /с	I, ‰	<i>δ,</i> м	$\frac{h}{\delta}$	$Re_{*\delta}$	$Re_{*\delta\infty}$	λ	<i>С,</i> м <sup>0,5</sup> /с	V <sub>расч</sub> , м/с
02.07.2015	3,69	0,15	1,00	0,23	20,9	0,05	0,16	6,25	3,80	2,81	0,17	10,7	0,11

Приложение И.- Результаты обработки данных натурных наблюдений по методике И.К.Никитина

04.07.2015	2,67	0,11	1,03	0,18	11,9	0,08	0,17	6,13	3,74	2,43	0,12	12,8	0,14
07.07.2015	3,65	0,15	0,99	0,21	17,2	0,08	0,18	5,51	3,62	2,84	0,15	11,4	0,11
08.07.2015	2,65	0,12	0,99	0,18	12,9	0,08	0,22	4,43	3,52	2,76	0,16	11,1	0,12
09.07.2015	2,56	0,11	0,93	0,18	12,7	0,08	0,21	4,38	3,21	2,26	0,17	10,7	0,11
10.07.2015	2,41	0,11	1,00	0,17	11,7	0,08	0,24	4,17	3,45	2,41	0,19	10,2	0,10
14.07.2015	2,56	0,10	1,00	0,17	11,3	0,08	0,24	4,17	3,45	2,43	0,15	11,4	0,11
12.02.2016	1,81	0,121	0,89	0,19	14,4	0,08	0,28	3,57	3,15	2,14	0,22	9,48	0,15

Приложение К.- Осредненные эпюры распределения продольных скоростейпо площади рассчитанные по натурным данным и формулам различных авторов (без прокоса от 02.07.2015)



← Степенная → Логарифмическая Гончарова → Элиптическая Караушева → Параболическая Базена

Приложение Л. - Осредненные эпюры распределения продольных скоростейпо площади рассчитанные по натурным данным и формулам различных авторов (1 метр от 04.07.2015 г.)



Приложение М. - Осредненные эпюры распределения продольных скоростейпо площади рассчитанные по натурным данным и формулам различных авторов (5 метров от 07.07.2015г.)



Приложение Н. -Осредненные эпюры распределения продольных скоростейпо площади рассчитанные по натурным данным и формулам различных авторов (5 метров от 08.07.2015г.)



→ Степенная → Логарифмическая Гончарова → Элиптическая Караушева → Параболическая Базена

Приложение П. - Осредненные эпюры распределения продольных скоростейпо площади рассчитанные по натурным данным и формулам различных авторов (10 метров от 09.07.2015г.)



-- Степенная -- Логарифмическая Гончарова -- Элиптическая Караушева -- Параболическая Базена

Приложение Р. - Осредненные эпюры распределения продольных скоростейпо площади рассчитанные по натурным данным и формулам различных авторов (10 метров от 10.07.2015г.)



Приложение С. - Осредненные эпюры распределения продольных скоростейпо площади рассчитанные по натурным данным и формулам различных авторов (10 метров от 14.07.2015г.)



Приложение Т. – Осредненные эпюры распределения продольных скоростей по площади рассчитанные по натурным



→ Степенная → Логарифмическая Гончарова → Элиптическая Караушева → Параболическая Базена

## данным и формулам различных авторов (зима от 12.02.2016г.)

Припочение V	_ Натурице	папитье полгозний	скорости
iphilometric 5.	That yphible	данные пульсации	скорости

Время,с	Обороты			Время,с	Обороты		Время,с	Обороты		Ы	Время,	Обороты			
_	1	2	3		1	2	3		1	2	3	c	1	2	3
h=	поверхн	h=0,3			h=0,6			h=0,9							
10	12	13	10	10	9	9	9	10	5	5	6	10	0	0	0
20	24	25	22	20	18	18	19	20	11	12	11	20	0	0	0
30	35	36	33	30	26	26	28	30	16	18	16	30	0	0	0
40	45	47	44	40	33	32	33	40	20	23	21	40	0	0	0
50	55	58	57	50	41	40	41	50	25	28	25	50	0	0	0
60	66	68	68	60	49	48	49	60	30	32	30	60	0	0	0
Vcp 0,240			Vcp	Vcp 0,176				0,113			Vcp	0,040			
h=0,1				h=0,4				h=0,7				h=дно			
10	12	11	11	10	6	8	7	10	4	5	4	10	0	0	0
20	23	21	20	20	13	16	12	20	6	7	9	20	0	0	0
30	31	31	27	30	19	25	20	30	8	11	11	30	0	0	0
40	42	42	36	40	25	32	26	40	11	14	15	40	0	0	0
50	53	52	44	50	32	39	32	50	15	16	19	50	0	0	0
60	62	63	53	60	39	46	38	60	18	18	22	60	0	0	0
Vcp		0,212		Vcp	Vcp 0,146			Vcp 0,073			Vcp 0,040				
h=0,2				h=0,5			h=0,8								
10	10	11	8	10	7	7	6	10	3	4	1				
20	18	20	15	20	14	15	13	20	4	7	0				
30	28	28	23	30	21	21	20	30	5	9	0				
40	36	38	34	40	27	28	26	40	6	10	0				
50	46	48	42	50	32	35	32	50	6	12	0				
60	54	57	51	60	35	41	37	60	8	13	0				
Vcp	0,195			Vcp		0,154		Vcp		0,043					