

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«КАЛИНИНГРАДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

**Н. Р. Ахмедова**

## **ГИДРОЛОГИЯ И ГИДРОТЕХНИЧЕСКИЕ СООРУЖЕНИЯ**

Учебно-методическое пособие по выполнению лабораторных работ для  
студентов, обучающихся в бакалавриате по направлению подготовки  
08.03.01 Строительство  
(профиль «Водоснабжение и водоотведение»)

Калининград  
Издательство ФГБОУ ВО «КГТУ»  
2024

УДК 556/626

Рецензент

доктор технических наук, профессор кафедры техносферной безопасности и природообустройства ФГБОУ ВО «Калининградский государственный технический университет» В. А. Наумов

Ахмедова, Н. Р.

Гидрология и гидротехнические сооружения: учеб.-методич. пособие по выполнению лабораторных работ для студентов бакалавриата по направлению подготовки 08.03.01 Строительство (профиль «Водоснабжение и водоотведение») / Н. Р. Ахмедова. – Калининград: ФГБОУ ВО «КГТУ», 2024. – 47 с.

Учебно-методическое пособие – локальный электронный методический материал содержит задания по лабораторным работам и методические материалы, необходимые для выполнения данных заданий. В пособии указаны оценочные средства и критерии оценивания, приведен перечень типовых вопросов для защиты лабораторной работы.

Табл. 11, рис. 9, список лит. – 10 наименований

Учебно-методическое пособие рекомендовано к использованию в качестве локального электронного методического материала в учебном процессе методической комиссией института морских технологий, энергетики и строительства 26.02.2024 г., протокол № 2

УДК 556/626

© Федеральное государственное  
бюджетное образовательное  
учреждение высшего образования  
«Калининградский государственный  
технический университет», 2024 г.  
© Ахмедова Н. Р., 2024 г.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

|                                      |    |
|--------------------------------------|----|
| Введение.....                        | 4  |
| Лабораторная работа 1.....           | 7  |
| Лабораторная работа 2.....           | 12 |
| Лабораторная работа 3.....           | 16 |
| Лабораторная работа 4.....           | 22 |
| Лабораторная работа 5.....           | 30 |
| Лабораторная работа 6.....           | 36 |
| Список рекомендуемой литературы..... | 44 |
| Приложения .....                     | 45 |
| Приложение А .....                   | 46 |
| <u>Приложение Б</u> .....            | 46 |

## ВВЕДЕНИЕ

Дисциплина *Гидрология и гидротехнические сооружения* входит в состав основной профессиональной образовательной программы бакалавриата по направлению подготовки 08.03.01 Строительство (профиль «*Водоснабжение и водоотведение*»).

*Целью* выполнения лабораторных работ является формирование у обучающихся навыков применения знаний, полученных в ходе изучения дисциплины в сфере своей профессиональной деятельности.

В результате выполнения лабораторных работ студент должен:

знать:

– основные нормативные, справочные и методические источники получения информации, термины и законы в области гидрологии и гидротехнических сооружений;

уметь:

– использовать знания гидрологии и гидротехнических сооружений в сводном анализе исходных данных на проектирование;

владеть:

– навыками применения полученных в ходе изучения дисциплины знаний в сфере своей профессиональной деятельности; навыками участия в проведении предпроектных исследований и подготовке данных для разработки архитектурного раздела проектной документации.

Лабораторные работы выполняются в лаборатории с гидравлическим лотком. Перед началом работы необходимо ознакомиться с алгоритмом проведения исследования и только затем приступить к измерениям заданных параметров. По результатам работы составляется отчет, который, как правило, содержит схемы, рисунки, расчеты, результаты расчетов и выводы о проделанной работе. Конкретные требования к составу отчета приведены после каждой работы.

Защита лабораторной работы проводится либо на очередном занятии, либо в часы индивидуальных или групповых консультаций преподавателя. Обучающийся, защитивший работу с ответами на контрольные вопросы, получает оценку «зачтено» за данную лабораторную работу. Оценивание осуществляется в соответствии с критериями, указанными в таблице 1.

Выполненные и защищенные в полном объеме лабораторные работы, предусмотренные программой, являются условием допуска к экзамену.

В данном учебно-методическом пособии содержатся рекомендации по выполнению лабораторных работ по всем разделам в объеме, предусмотренном курсом дисциплины.

Таблица 1 – Система и критерии оценивания

| Система оценок<br>Критерий                                     | «Не зачтено»   | «Зачтено»   |  |  |
|--|--|---|--|--|
| Системность и полнота знаний в отношении изучаемых объектов    | Обладает частичными и разрозненными знаниями, которые не может корректно связывать между собой (только некоторые из которых может связывать между собой) | Обладает минимальным набором знаний, необходимым для системного взгляда на изучаемый объект | Обладает набором знаний, достаточным для системного взгляда на изучаемый объект  | Обладает полнотой знаний и системным взглядом на изучаемый объект  |
| Работа с информацией   | Не в состоянии находить необходимую информацию, либо в состоянии находить отдельные фрагменты информации в рамках поставленной задачи                    | Может найти необходимую информацию в рамках поставленной задачи                             | Может найти, интерпретировать и систематизировать необходимую информацию в рамках поставленной задачи                                    | Может найти, систематизировать необходимую информацию, а также выявить новые, дополнительные источники информации в рамках поставленной задачи   |
| Осмысление изучаемого явления, процесса, объекта               | Не может делать корректных выводов из имеющихся у него сведений, в состоянии проанализировать только некоторые из имеющихся у него сведений              | В состоянии осуществлять корректный анализ предоставленной информации                       | В состоянии осуществлять систематический корректный анализ предоставленной информации, вовлекает в исследование новые релевантные данные | В состоянии осуществлять систематический и корректный анализ предоставленной информации, вовлекает в исследование новые релевантные поставленной задаче данные, предлагает новые ракурсы поставленной задачи |
| Освоение стандартных алгоритмов решения профессиональных задач | В состоянии решать только фрагменты поставленной задачи в соответствии с заданным алгоритмом, не освоил предложенный алгоритм, допускает ошибки          | В состоянии решать поставленные задачи в соответствии с заданным алгоритмом                 | В состоянии решать поставленные задачи в соответствии с заданным алгоритмом, понимает основы предложенного алгоритма                     | Не только владеет алгоритмом и понимает его основы, но и предлагает новые решения в рамках поставленной задачи   |

## Лабораторная работа 1

### Опытное определение коэффициента шероховатости русла

**Цель работы:** сформировать навыки выполнения измерений морфометрических параметров в открытом русле и гидрологических расчетов.

**Задание:** определить коэффициент шероховатости лотка  $n$  (однородный по периметру и длине лотка) и выяснить область сопротивления потока.

**Оборудование:** гидравлический лоток, мерная рейка, мерная лента, секундомер.

#### Порядок выполнения работы:

1. Измерить ширину и глубины потока при различных значениях расхода.
2. Измерить время заполнения резервуара при достижении объема  $V = 100$  л.
3. Определить значения основных гидравлических элементов живого сечения (смоченный периметр, гидравлический радиус, площадь живого сечения).
4. Вычислить значения коэффициента шероховатости при различных значениях расхода.
5. Сравнить вычисленные значения коэффициента шероховатости со значениями, приведенными в приложении А для естественных водотоков.
6. Установить область сопротивления потока.
7. Ответить на вопросы, приведенные в конце лабораторной работы.

#### Алгоритм проведения опытов:

1. Определить уклон лотка  $i$  между двумя сечениями: в начальном и конечном сечениях лотка.
2. Мерной лентой измерить ширину лотка по дну  $b$  (величина постоянная).
3. Через лоток пропускается произвольный расход  $Q$ , для определения которого необходимо определить время заполнения резервуара  $\tau$  до значения  $V=100$  л.

4. В лотке должно установиться равномерное движение, после чего следует выполнить измерение глубины.

5. Повторить опыт при различных значениях  $Q$ . Опытов должно быть не менее пяти.

**Алгоритм выполнения расчетов:**

1. Определение смоченного периметра производят по формуле

$$\chi = b + 2h, \quad (1.1)$$

где  $b$  – ширина лотка по дну, м;  $h$  – глубина потока, м.

2. Площадь живого сечения определяют по формуле:

$$\omega = b \cdot h, \quad (1.2)$$

где  $b$  – ширина лотка по дну, м;  $h$  – глубина потока, м.

3. Гидравлический радиус  $R$  определяется по формуле:

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

где  $\omega$  – площадь живого сечения, м<sup>2</sup>;  $\chi$  – смоченный периметр, м.

4. Расход жидкости определяется по формуле

$$Q = \frac{V}{\tau}, \quad (1.4)$$

где  $V$  – объём жидкости в резервуаре, м<sup>3</sup>;  $\tau$  – время заполнения резервуара, с.

5. При измеренных  $i$ ,  $Q$ ,  $b$  и  $h_0$  вычисляются средняя скорость  $v$  и коэффициент Шези  $C$  из опыта:

$$v = Q / \omega, \quad (1.5)$$

где  $Q$  – расход жидкости, м<sup>3</sup>/с;  $\omega$  – площадь живого сечения, м<sup>2</sup>,

$$C = \frac{v}{\sqrt{Ri}}, \quad (1.6)$$

где  $v$  – средняя скорость движения жидкости, м/с;  $R$  – гидравлический радиус, м;  $i$  – уклон.

6. При найденном опытном значении  $C$  можно определить коэффициент шероховатости  $n$ , из формул для определения коэффициента скорости Шези  $C$  с учетом коэффициента шероховатости  $n$ :

по И. И. Агроскину:  $n = 1/(C-17,72lgR)$  (1.7)

по Маннингу:  $C = \frac{1}{n} R^{1/6}$ . (1.8)

Для получения более достоверной величины коэффициента шероховатости  $n$  рекомендуется выполнить расчет при нескольких значениях расхода  $Q$  и вычислить среднеарифметическое  $n_{cp}$ .

7. Область сопротивления выясняется сравнением числа Рейнольдса  $Re_{п}$  в потоке с  $Re_{кв}$ , определяемым по формуле

$$Re_{кв} = 21,6 \cdot C \frac{4R}{\Delta}, \quad (1.9)$$

где  $\Delta$  – высота выступов шероховатости, измеренная в натуре.

Число Рейнольдса для потока определяется через гидравлический радиус

$$Re_{п} = \frac{vR}{\nu}, \quad (1.10)$$

где  $\nu$  – кинематический коэффициент вязкости.

Если  $Re_{п} \geq Re_{кв}$ , то область сопротивления в потоке будет квадратичной.

### **Требования к содержанию отчета по работе:**

Отчет по данной лабораторной работе должен содержать информацию о теме и цели работы, формулировку задания, все выполняемые расчеты и выводы по результатам опытов. Результаты расчетов оформляются в виде таблицы (таблица 2).

### **Перечень типовых вопросов для защиты лабораторной работы**

1. Формула для определения коэффициента Шези (по Маннингу).
2. Формула для определения смоченного периметра в лотке прямоугольного сечения.
3. Единицы измерения расхода потока.
4. В каком случае уровень воды в лотке будет больше (при прочих равных условиях): при коэффициенте шероховатости  $n = 0,025$  или  $n = 0,08$ ?
5. Единицы измерения коэффициента Шези.
6. Области сопротивления потока.
7. Основные признаки равномерного движения воды.

8. Алгоритм определения коэффициента шероховатости в данной лабораторной работе.

9. Формула для определения площади живого сечения в лотке прямоугольного сечения.

10. Параметры, от которых зависит значение коэффициента шероховатости  $n$ , определяемого по формуле Агроскина.



## Лабораторная работа 2

### Вычисление расходов и скоростей воды

**Цель работы:** сформировать навыки выполнения измерений скорости потока в открытом русле, гидрологических и гидравлических расчетов.

**Задание:** определить расход воды в открытом лотке по скоростям, измеренным гидрометрической вертушкой, и глубинам потока; определить среднюю скорость потока при различных расходах и глубинах воды в лотке.

**Оборудование:** гидравлический лоток, мерная рейка, мерная лента, секундомер, гидрометрическая вертушка (рисунок 1).



Рисунок 1 – Измеритель скорости потока воды (гидрометрическая вертушка)

#### Порядок выполнения работы:

1. Выполнить измерения необходимых параметров (ширина, глубины и средние скорости (при помощи гидрометрической вертушки) потока при различных значениях расхода.
2. Вычислить расход воды в открытом лотке по скоростям, измеренным гидрометрической вертушкой и глубинам потока.
3. Определить среднюю скорость потока при различных расходах и глубинах воды в лотке.
4. Сравнить значения скоростей, определенных расчетным способом и измеренных гидрометрической вертушкой.
5. Ответить на вопросы, приведенные в конце лабораторной работы.

#### Алгоритм проведения опытов:

1. Определить уклон лотка  $i$  между двумя сечениями: в начальном и конечном сечениях лотка. Уклон должен быть нулевым.

2. Мерной лентой измерить ширину лотка по дну  $b$  (величина постоянная).

3. Через лоток пропускается произвольный расход  $Q$ , для определения которого необходимо определить время заполнения резервуара  $\tau$  до значения  $V=100$  л.

4. В лотке должно установиться равномерное движение, после чего следует выполнить измерение глубины и скорости гидрометрической вертушкой.

5. Повторить опыт при различных значениях  $Q$ . Опытов должно быть не менее пяти.

#### **Алгоритм выполнения расчетов:**

1. Площадь живого сечения определяют по формуле:

$$\omega = b \cdot h. \quad (2.1)$$

где  $b$  – ширина лотка по дну, м;  $h$  – глубина потока, м.

2. Расход жидкости  $Q_1$  определяется по формуле

$$Q_1 = v_1 \cdot \omega, \quad (2.2)$$

где  $v_1$  – средняя скорость потока, измеренная гидрометрической вертушкой, м/с;  $\omega$  – площадь живого сечения, м<sup>2</sup>.

3. Расход жидкости  $Q_2$  определяется по формуле

$$Q_2 = \frac{V}{\tau}, \quad (2.3)$$

где  $V$  – объём жидкости в резервуаре, м<sup>3</sup>;  $\tau$  – время заполнения резервуара, с.

4. При измеренных  $b$  и  $h$  вычисляется средняя скорость  $v$  из опыта:

$$v_2 = Q_2 / \omega, \quad (2.4)$$

где  $Q_2$  – расход жидкости, м<sup>3</sup>/с;  $\omega$  – площадь живого сечения, м<sup>2</sup>.

#### **Требования к содержанию отчета по работе:**

Отчет по данной лабораторной работе должен содержать информацию о теме и цели работы, формулировку задания, все выполняемые расчеты и

выводы по результатам опытов. Результаты расчетов оформляются в виде таблицы (таблица 3).

### **Перечень типовых вопросов для защиты лабораторной работы**

1. Принцип работы гидрометрической вертушки.
2. Вычисление расхода воды аналитическим способом. (метод «скорость-площадь»).
3. Объемный метод определения расхода.
4. Единицы измерения расхода потока.
5. Формула для определения уклона лотка.
6. Признаки, характеризующие равномерное движение воды в лотке.
7. Формула для определения средней скорости при известных значениях расхода и параметрах потока.



## Лабораторная работа 3

### Водосливы с острым ребром

**Цель работы:** сформировать навыки выполнения гидравлических расчетов водосливов с острым ребром.

**Задание:** определить расходы воды через водосливы с острым ребром на основании проведенных опытов и сравнить с расходами, полученными по расчетным формулам при измеренных напорах.

**Оборудование:** гидравлический лоток, мерная рейка, мерная лента, секундомер, водосливы треугольного и трапецидального сечения (рисунок 2).

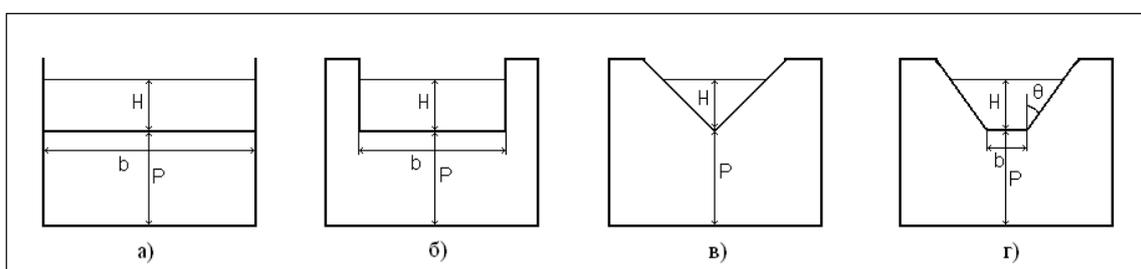


Рисунок 2 – Водосливы с тонкой стенкой:

- а) прямоугольный без бокового сжатия; б) прямоугольный с боковым сжатием;  
в) треугольный; г) трапецидальный

#### Порядок выполнения работы:

1. Измерить параметры водосливов (ширину  $b$ , порог  $P$ ).
2. Измерить параметры потока при различных значениях расхода (глубина потока  $h$ , ширина потока по дну  $B$ , уровень воды в верхнем бьефе УВВБ, уровень воды в нижнем бьефе УВНБ).
3. Вычислить значения расходов  $Q$  и напоров  $H$  для каждого эксперимента (не менее пяти экспериментов).
4. По рассчитанным значениям расходов  $Q$  и напоров  $H$  построить графики зависимости  $Q=f(H)$  и выполнить анализ пропускной способности водосливов с острым ребром различного поперечного сечения.
5. Ответить на вопросы, приведенные в конце лабораторной работы.

#### Алгоритм проведения опытов:

1. Измерить ширины ( $b$ ,  $B$ ) и угол  $\theta$  трапецидального водослива.

2. Измерить ширину по дну  $B$  и угол  $\Theta$  для треугольного водослива.
3. Определить уклон лотка  $i$  между двумя сечениями: в начальном и конечном сечениях лотка.
4. Через лоток пропускается произвольный расход  $Q$ , для определения которого необходимо определить время заполнения резервуара  $\tau$  до значения  $V=100$  л.
5. Измерить отметку свободной поверхности воды перед водосливом ( $\nabla_{УВВБ}$ ) на таком расстоянии от ребра водослива, где спад свободной поверхности практически не заметен (это расстояние примерно равно трем напорам). Затем измерить отметку порога водослива ( $\nabla_P$ ) – в низшей точке.
6. Повторить опыт при различных значениях  $Q$ . Опытов должно быть не менее пяти для каждого водослива.

При выполнении экспериментов необходимо учитывать следующую информацию:

1) для правильной работы трапецеидального водослива рекомендуется, чтобы он был неподтопленным, выполнялось условие  $B \geq 3H$ , (где  $B$  – ширина водослива по низу) и скорость подхода должна быть настолько малой, чтобы ею можно было пренебречь;

2) измерительные водосливы не рекомендуется применять при напорах  $H < 5-7$  см, потому что при малых напорах наблюдается прилипание струи (рисунок 3) к нижней грани и формулы для определения расхода становятся недействительными.

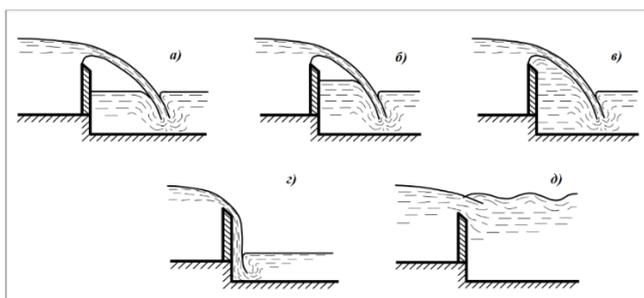


Рисунок 3 – Формы струи при истечении через водослив с тонкой стенкой:

- а) свободная; б) отжатая; в) подтопленная снизу;  
 г) прилипшая; д) волнистая

### Алгоритм выполнения расчетов:

1. Определить расход воды в лотке  $Q$  объемным способом по формуле:

$$Q = V/\tau, \quad (3.1)$$

где  $V$  – объем жидкости,  $\text{м}^3$ ;  $\tau$  – время прохождения жидкости через данное поперечное сечение, с.

2. Определить напор на водосливе  $H$ , как разность отметок поверхности воды и порога водослива.

3. При определенном напоре  $H$ , известных углах  $\theta$ , ширине  $b$  или  $B$  трапецидального водослива вычисляются расходы  $Q$  по формулам 3.2-3.8.

Для неподтопленного треугольного водослива расход  $Q$  определяется по формуле:

$$Q = m_0 t g \frac{\theta}{2} \sqrt{2g} H^{5/2}, \quad (3.2)$$

где  $m_0$  – коэффициент расхода, который зависит от величины угла при вершине  $\theta$ .

В формуле 3.2 скорость подхода учтена в коэффициенте расхода  $m_0$ , коэффициенты расхода  $m_0$  и  $m$  связывает зависимость:

$$\frac{m}{m_0} = \left( H/H_0 \right)^{3/2}. \quad (3.3)$$

При угле  $\theta = 90^\circ$  расход  $Q$  для треугольного водослива равен:

- а) по Я. Томсону

$$Q = 1,4H^{5/2}, \quad (3.4)$$

- б) по Х. Кингу

$$Q = 1,343H^{2,47}. \quad (3.5)$$

В случае, когда угол  $\theta$  не равен  $90^\circ$ , а изменяется в пределах  $22^\circ \leq \theta \leq 118^\circ$ , расход  $Q$  может быть определен по эмпирической формуле, предложенной Ф. Гриве:

$$Q = 1,331 \left( t g \frac{\theta}{2} \right)^{0,996} H^{2,47}. \quad (3.6)$$

Расчетная зависимость для расхода через трапецеидальный водослив с учетом коэффициента расхода выглядит следующим образом:

$$Q = m_0(b_0 + 0,8Htg\theta)\sqrt{2g}H^{3/2}. \quad (3.7)$$

где  $m_0$  – коэффициент расхода, зависит от угла водослива;  $b_0$  – ширина водослива по низу, м.

Для трапецеидального водослива с заложением боковых граней  $tg\theta = 1/4$  нет необходимости вводить поправку на боковое сжатие струи.

Для неподтопленного трапецеидального водослива с углом  $\theta = 14^\circ$  ( $tg\theta = 0,25$ ), по исследованиям Чиполетти коэффициент расхода  $m_0=0,42$  независимо от значения напора, поэтому расчетная формула расхода для водослива Чиполетти:

$$Q = 1,86 b H^{3/2}, \quad (3.8)$$

где  $b$  – ширина водослива, м.

### Требования к содержанию отчета по работе:

Отчет по данной лабораторной работе должен содержать информацию о теме и цели работы, формулировку задания, все выполняемые расчеты и выводы по результатам опытов, в том числе в виде графиков зависимости  $Q=f(H)$  для треугольного и трапецеидального водосливов (рисунок 4). Результаты расчетов оформляются в виде таблиц (таблицы 4, 5).

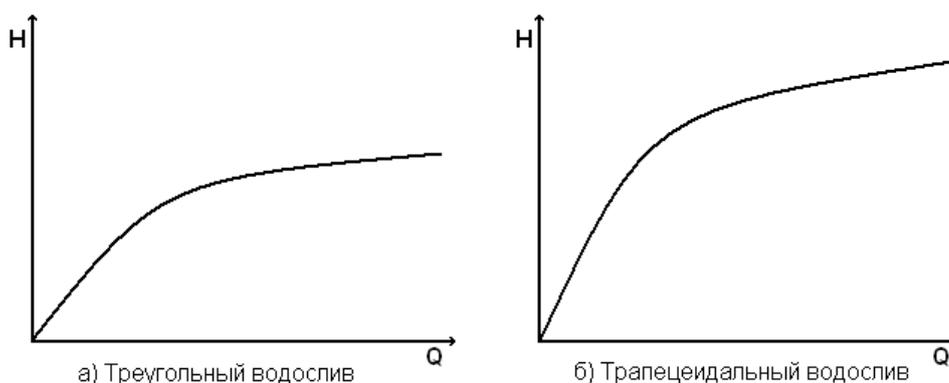


Рисунок 4 – Зависимость  $Q=f(H)$

### Перечень типовых вопросов для защиты лабораторной работы

1. Определение для водослива с тонкой стенкой?

2. Назвать водосливы с тонкой стенкой с боковым сжатием.
3. Условие подтопления водослива с тонкой стенкой трапецеидального сечения.
4. Водосливы (трапецеидальный или треугольный), которые пропускают большие расходы при одинаковых напорах.
5. Начертить схему свободного истечения через водослив с тонкой стенкой.
6. Начертить схему истечения через водослив с тонкой стенкой с прилипшей струёй.
7. Начертить схему треугольного водослива с указанием всех основных параметров (ширина по дну, напор над водосливом и т. д.).
8. Зависимость между коэффициентами расхода  $m_0$  и  $m$ .
9. Способ, которым определялся напор над водосливом в данной работе.



## Лабораторная работа 4

### Истечение через водослив практического профиля

**Цель работы:** изучить процесс прохождения жидкости через водослив практического профиля, сформировать навыки выполнения гидравлических расчетов водосливов.

**Задание:** получить экспериментальную зависимость изменения коэффициента расхода водослива практического профиля от изменения напора  $H$  при неподтопленном истечении; определить величину коэффициента подтопления  $\sigma_{\text{п}}$  при различных степенях подтопления водослива  $\Delta/H_0$ ; определить коэффициент скорости  $\varphi$  водослива.

**Оборудование:** гидравлический лоток, мерная рейка, мерная лента, секундомер, водослив практического профиля (рисунок 5).

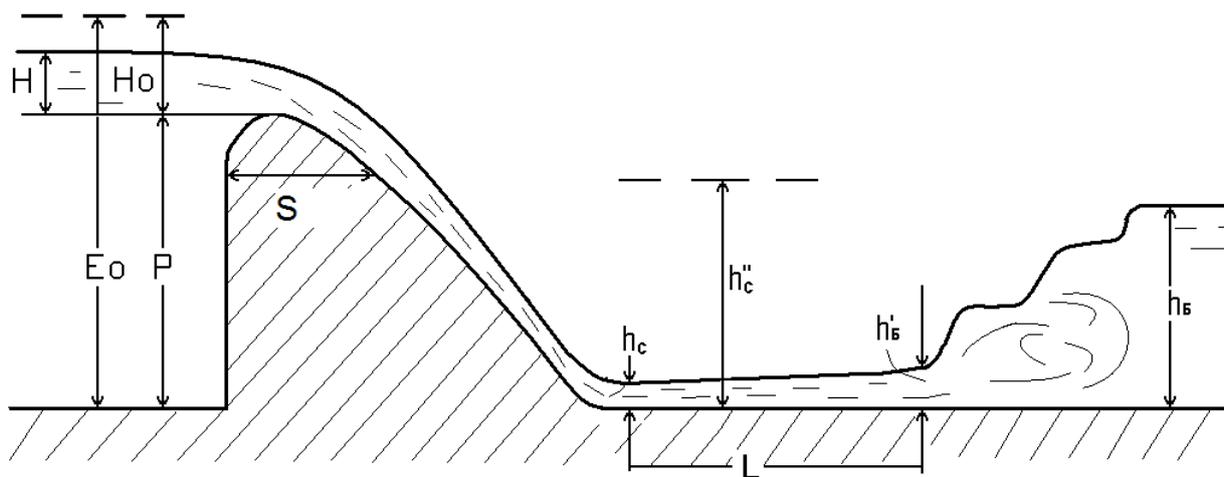


Рисунок 5 – Водослив практического профиля

#### Порядок выполнения работы:

1. Перед пуском воды в лоток, где установлен водослив практического профиля, измерить его ширину  $b$  и высоту  $P$ . В лабораторной работе модель водослива устанавливается в лоток прямоугольного сечения, т. е. без бокового сжатия (ширина лотка  $B$  равна ширине водослива  $b$ ).

2. Измерить параметры потока при различных значениях расхода  $Q$  (см. таблицы 6–8).

3. Выполнить расчеты, результаты внести в таблицы 6–8.
4. Построить график связи  $m = f(H_0)$ .
5. Ответить на вопросы, приведенные в конце лабораторной работы.

**Алгоритм проведения опытов:**

1. Измерить параметры водослива: ширину  $b$  и высоту  $P$ .
2. Через лоток пропускается произвольный расход  $Q$ , для определения которого необходимо определить время заполнения резервуара  $\tau$  до значения  $V=100$  л.
3. Измерить отметку свободной поверхности воды перед водосливом ( $\nabla_{УВВБ}$ ), затем измерить уровень воды за водосливом ( $\nabla_{УВНБ}$ ).
4. Измерить напор  $H$  и глубину в сжатом сечении  $h_c$  за водосливом (рисунок 5). Напор  $H$  измеряется перед водосливом на расстоянии  $\sim 3H$  от гребня.
5. Измерения в лотке выполняют при установившемся движении, когда уровень свободной поверхности потока в верхнем бьефе будет стабильным. Глубины потока за водосливом формируются при полностью открытом концевом затворе лотка. При этом поток за водосливом находится в бурном состоянии.
6. Определение коэффициента подтопления  $\sigma$  следует производить при установленном произвольном расходе  $Q$  через водослив, не связывая этот опыт с опытами при неподтопленном истечении. Подтопление осуществляется частичным прикрытием в конце лотка до тех пор, пока при надвинутом прыжке в нижнем бьефе уровень воды не поднимется выше отметки ребра водослива. После стабилизации уровней (процесс этот обычно довольно длительный) измеряется уровень нижнего бьефа ( $\nabla_{УВНБ}$ ).
7. Повторить опыты при различных значениях  $Q$ . Опытов должно быть не менее пяти для неподтопленного и не менее трёх – для подтопленного водослива.

Водослив практического профиля считается *незатопленным*, если уровень нижнего бьефа лежит ниже гребня водослива (рисунок 5).

### Алгоритм выполнения расчетов:

1. Вычислить значения расходов  $Q$  и напоров с учетом скорости подхода  $H_0$  для каждого эксперимента (не менее пяти экспериментов). Расход  $Q$  измеряется объемным способом и определяется по формуле:

$$Q = \frac{V}{\tau}, \quad (4.1)$$

где  $V$  – объем жидкости,  $\text{м}^3$ ;  $\tau$  – время прохождения жидкости через данное поперечное сечение, с.

Напор перед водосливом с учетом скорости подхода  $H_0$ , определяется (в случае водослива без бокового сжатия) по формуле:

$$H_0 = H + \frac{\alpha v_0^2}{2g}, \quad (4.2)$$

где  $H$  – напор, м;  $\alpha$  – коэффициент Кориолиса, принять равным 1,1;  $v_0$  – скорость подхода жидкости, м/с;  $g$  – ускорение свободного падения,  $\text{м/с}^2$ .

Скорость подхода  $v_0$  вычислить по формуле:

$$v_0 = \frac{Q}{\omega} = \frac{Q}{b(H+P)}, \quad (4.3)$$

где  $Q$  – расход,  $\text{м}^3/\text{с}$ ;  $\omega$  – площадь живого сечения,  $\text{м}^2$ ;  $b$  – ширина водослива, м;  $H$  – напор, м;  $P$  – высота порога, м.

2. По расходам  $Q$  и соответствующим напорам с учетом скорости подхода  $H_0$ , полученным в каждом опыте, вычислить коэффициенты расхода  $m$  по формуле:

$$m = \frac{Q}{b\sqrt{2g}H_0^{3/2}}, \quad (4.4)$$

где  $Q$  – расход,  $\text{м}^3/\text{с}$ ;  $b$  – ширина водослива, м;  $H_0$  – напор перед водосливом с учетом скорости подхода, м;  $g$  – ускорение свободного падения,  $\text{м/с}^2$ .

3. Построить график связи  $m = f(H_0)$ . Результаты вычислений заносятся в таблицу 6.

4. Для определения коэффициента скорости водослива  $\varphi$  (таблица 7) сначала необходимо вычислить значения расходов  $Q$  объемным способом и

напора со скоростью подхода  $H_0$  по формулам 4.1–4.2 соответственно. Результаты вычислений заносятся в таблицу 7.

5. Далее определяется значение удельной энергии  $E_0$ . Наименьшая глубина за водосливом  $h_c$  (рисунок 5) зависит от удельной энергии  $E_0$ , которую имеет поток в сечении перед водосливом. Эта энергия складывается из потенциальной энергии и кинетической и равна:

$$E_0 = P + H + \frac{\alpha v_0^2}{2g} = P + H_0 \quad (4.5)$$

при выбранной плоскости сравнения на уровне 0-0 дна НБ.

Если эту энергию приравнять энергии потока в сжатом сечении с учетом потерь на сопротивления между сечениями (т.е. написать уравнение Бернулли), то после преобразования получим формулу:

$$q = \varphi h_c \sqrt{2g(E_0 - h_c)}, \quad (4.6)$$

из которой, зная коэффициент скорости  $\varphi$ , можно определить глубину  $h_c$  подбором или без подбора – по способу И. И. Агроскина.

Результаты вычислений заносятся в таблицу 7.

6. Коэффициент скорости  $\varphi$  учитывает сопротивления в потоке при переливе через водослив и для типовых оголовков водослива определяется по справочнику, при полученных опытных данных можно определить по формуле:

$$\varphi = \frac{q}{h_c \sqrt{2g(E_0 - h_c)}}, \quad (4.7)$$

где  $q = \frac{Q}{b}$  – удельный расход, м<sup>3</sup>/с на 1 м;  $h_c$  – глубина в сжатом сечении, м;  $E_0$  – удельная энергия, которую имеет поток в сечении перед водосливом.

Результаты вычислений заносятся в таблицу 7.

7. Коэффициент скорости  $\varphi$  следует определять при двух-трех различных расходах  $Q$ , пропускаемых через водослив. Результаты вычислений заносятся в таблицу 7.

8. Определение коэффициента подтопления  $\sigma$  следует производить при установленном произвольном расходе  $Q$  через водослив, не связывая этот опыт с опытами при неподтопленном истечении. Сначала необходимо вычислить

значения расходов  $Q$  объемным способом и напора со скоростью подхода  $H_0$  по формулам 4.1–4.2 соответственно. Результаты вычислений заносятся в таблицу 8.

9. После проведения двух-трёх опытов с подтоплением водослива при различной величине подтопления  $h_n$  (для одного и того же расхода  $Q$ ) вычисляются коэффициенты подтопления  $\sigma$ :

$$\sigma = \frac{Q}{mb\sqrt{2g}H_0^{3/2}}. \quad (4.8)$$

В формуле (4.8) значение коэффициента расхода  $m$  берётся для неподтопленного водослива по результатам предыдущих опытов (снимается с тарировочной кривой  $m = f(H_0)$ ). Результаты вычислений заносятся в таблицу 8.

10. Полученные опытным путем значения коэффициента подтопления  $\sigma$  сравниваются со снятыми с кривой рисунке 6.

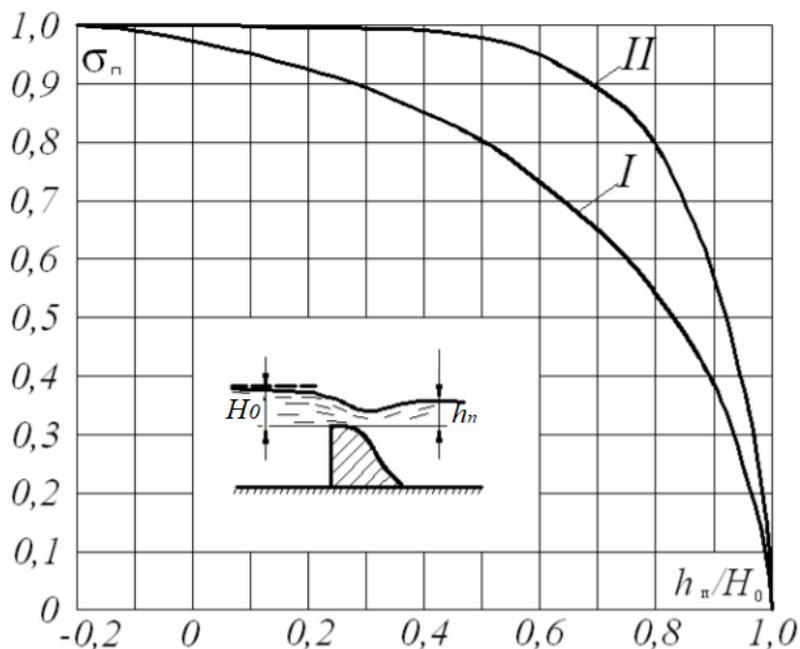


Рисунок 6 – График для определения коэффициента подтопления  $\sigma$

На рисунке 6 кривая I относится к вакуумным водосливам, кривая II – к безвакуумным водосливам нормального очертания. Если под струей на водосливе давление атмосферное или больше атмосферного, то водослив будет

безвакуумный. Водосливная поверхность безвакуумного водослива криволинейного практического профиля очерчивается по координатам Кригера–Офицерова, получаемым в зависимости от проектного напора  $H$ . При проектном напоре коэффициент расхода  $m$  безвакуумного водослива, очерченного по координатам Кригера–Офицерова, будет наибольшим.

### **Требования к содержанию отчета по работе:**

Отчет по данной лабораторной работе должен содержать информацию о теме и цели работы, формулировку задания, все выполняемые расчеты и выводы по результатам опытов, в том числе в виде графика зависимости  $m = f(H_0)$ . Результаты расчетов оформляются в виде таблиц 6–8.

### **Перечень типовых вопросов для защиты лабораторной работы**

1. Основные признаки водослива практического профиля.
2. Определение расхода через неподтопленный водослив практического профиля (формула).
3. Формула для определения напора перед водосливом с учетом скорости подхода, определяемого для случая водослива без бокового сжатия.
4. Описать физическую картину истечения через водослив практического профиля.
5. Признаки неподтопленного водослива практического профиля.
6. Алгоритм вычисления коэффициента скорости в данной лабораторной работе.
7. На рисунке 6 кривая I относится к вакуумным водосливам, кривая II – к безвакуумным водосливам нормального очертания. В каком случае водослив будет безвакуумный?
8. Способ, которым определялась величина подтопления  $h_{\text{п}}$  в данной лабораторной работе.
9. Чему равен коэффициент подтопления  $\sigma$  при неподтопленном истечении?
10. В каком случае происходит подтопление водослива?

Таблица 6 – Протокол исследования для получения экспериментальной зависимости  $m = f(H_0)$  (неподтопленный водослив без бокового сжатия)

| <i>Измеренные</i> |                |                  |                   |         |                | <i>Вычисленные</i>        |                  |             |     |
|-------------------|----------------|------------------|-------------------|---------|----------------|---------------------------|------------------|-------------|-----|
| $b, \text{ м}$    | $P, \text{ м}$ | $V, \text{ м}^3$ | $\tau, \text{ с}$ | УВВБ, м | $H, \text{ м}$ | $Q, \text{ м}^3/\text{с}$ | $H_0, \text{ м}$ | $H_0^{3/2}$ | $m$ |
| $l$               |                |                  |                   |         |                |                           |                  |             |     |
| ...               |                |                  |                   |         |                |                           |                  |             |     |
| $n$               |                |                  |                   |         |                |                           |                  |             |     |

Таблица 7 – Протокол исследования для определения коэффициента скорости (неподтопленный водослив без бокового сжатия)

| <i>Измеренные</i> |                |                  |                   |         |                  |                | <i>Вычисленные</i>        |                  |     |       |           |
|-------------------|----------------|------------------|-------------------|---------|------------------|----------------|---------------------------|------------------|-----|-------|-----------|
| $b, \text{ м}$    | $P, \text{ м}$ | $V, \text{ м}^3$ | $\tau, \text{ с}$ | УВВБ, м | $h_c, \text{ м}$ | $H, \text{ м}$ | $Q, \text{ м}^3/\text{с}$ | $H_0, \text{ м}$ | $q$ | $E_0$ | $\varphi$ |
| $l$               |                |                  |                   |         |                  |                |                           |                  |     |       |           |
| ...               |                |                  |                   |         |                  |                |                           |                  |     |       |           |
| $n$               |                |                  |                   |         |                  |                |                           |                  |     |       |           |

Таблица 8 – Протокол исследования для определения коэффициента подтопления

| <i>Измеренные величины</i> |                |                  |                   |            |            |                | <i>Вычисленные величины</i> |                  |     |             |          |                           |                            | <i>Справочное значение</i> |
|----------------------------|----------------|------------------|-------------------|------------|------------|----------------|-----------------------------|------------------|-----|-------------|----------|---------------------------|----------------------------|----------------------------|
| $b, \text{ м}$             | $P, \text{ м}$ | $V, \text{ м}^3$ | $\tau, \text{ с}$ | УВВБ,<br>м | УВНБ,<br>м | $H, \text{ м}$ | $Q, \text{ м}^3/\text{с}$   | $H_o, \text{ м}$ | $t$ | $H_o^{3/2}$ | $\sigma$ | $h_{\text{п}}, \text{ м}$ | $\frac{h_{\text{п}}}{H_o}$ | $\sigma$                   |
| $l$                        |                |                  |                   |            |            |                |                             |                  |     |             |          |                           |                            |                            |
| ...                        |                |                  |                   |            |            |                |                             |                  |     |             |          |                           |                            |                            |
| $n$                        |                |                  |                   |            |            |                |                             |                  |     |             |          |                           |                            |                            |

## Лабораторная работа 5

### Истечение через водослив с широким порогом

**Цель работы:** изучить процесс прохождения жидкости через водослив с широким порогом, сформировать навыки выполнения гидравлических расчетов водосливов.

**Задание:** для неподтопленного водослива с широким порогом определить из опыта коэффициент расхода  $m$ . Измерить и построить в масштабе профиль водослива и свободную поверхность потока. Определить из опыта глубину на пороге подтопленного водослива, коэффициенты скорости  $\varphi$  и подтопления  $\sigma$ .

**Оборудование:** гидравлический лоток, мерная рейка, мерная лента, секундомер, водослив с широким порогом (рисунок 7).

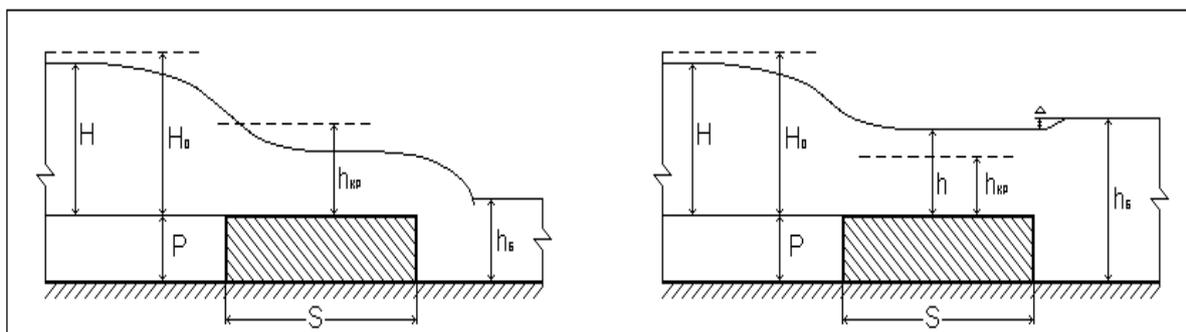


Рисунок 7 – Водослив с широким порогом не подтопленный (а)  
и подтопленный (б):

$H$  – напор;  $h$  – глубина на пороге водослива;  $h_б$  – бытовая глубина;  
 $P$  – высота порога;  $\Delta$  – превышение;  $H_0$  – напор с учетом скорости подхода

Водослив с широким порогом имеет отношение ширины горизонтального порога  $S$  к напору  $H$  (рисунок 7) в пределах  $2 < S/H < 10$ . В этом диапазоне на пороге водослива устанавливается бурный и спокойный поток в зависимости от соотношения глубин потока на пороге и за водосливом.

#### Порядок выполнения работы:

1. Перед пуском воды в лоток, где установлен водослив практического профиля, измерить его ширину  $b$  и высоту  $P$ . В лабораторной работе модель

водослива устанавливается в лоток прямоугольного сечения, т. е. без бокового сжатия (ширина лотка равна ширине водослива).

2. Через лоток пропускается произвольный расход  $Q$ , для определения которого необходимо определить время заполнения резервуара  $\tau$  до значения  $V=100$  л.

3. Измерить параметры потока (см. таблицу 9).

4. Выполнить расчеты (5.1–5.7), результаты внести в таблицу 9. Сравнить полученные значения коэффициентов расхода  $m$ , скорости  $\varphi$  и подтопления  $\sigma$  со справочными значениями (приложение Б).

5. По данным измерений в масштабе вычерчивается схема водослива с нанесением свободной поверхности потока в трех случаях; при неподтопленном водосливе, в начале подтопления и при подтопленном водосливе. На схеме наносятся линии критической глубины (на пороге водослива и в лотке).

6. Ответить на вопросы, приведенные в конце лабораторной работы.

#### **Алгоритм проведения опытов:**

1. В лоток, где установлен водослив, подается такой расход  $Q$ , при котором напор  $H$  перед водосливом будет удовлетворять условию  $H < S/2$ , т.е. водослив можно считать водосливом с широким порогом. Водослив будет *не подтоплен*, если уровень воды за водосливом при изменении бытовой глубины  $h_b$  в нижнем бьефе не влияет на величину напора  $H$  (рисунок 7, а). Измеряются отметки дна лотка, порога и поверхности потока в зоне водослива, по которым вычисляются напор, высота порога и глубины на водосливе для построения свободной поверхности потока.

2. После проведения всех измерений при неподтопленном водосливе можно приступить к его подтоплению, при этом расход  $Q$ , подаваемый в лоток, остается без изменения. Водослив будет *подтоплен* (рисунок 7, б), если при изменении (увеличении) глубины в нижнем бьефе глубины в потоке на водосливе будут увеличиваться и это вызовет увеличение  $H$ , при этом глубина  $h$  на водосливе больше критической.

Для подтопления водослива увеличиваются глубины в нижнем бьефе прикрытием концевого затвора в лотке. Когда уровень воды в лотке за водосливом приблизится к уровню на водосливе, дальнейшее закрытие затвора следует производить осторожно, стараясь уловить начало подтопления. В начале подтопления со стороны нижнего бьефа на водосливе будет волнообразно повышаться свободная поверхность, и когда эта волна достигает верхнего бьефа, то напор  $H$  начнет увеличиваться. Начало подъема уровня в верхнем бьефе можно считать началом подтопления, и при этом положении надо измерить напор  $H$ , глубины на пороге водослива и за водосливом. Затем последующим прикрытием затвора в лотке увеличивается подтопление, и снова измеряются напор и глубины на водосливе и за ним. Измерения следует производить только тогда, когда после подтопления водослива движение полностью установится, когда уровни свободной поверхности в верхнем и нижнем бьефах не будут изменяться по времени.

**Алгоритм выполнения расчетов:**

1. Расход  $Q$  измеряется объёмным способом и определяется по формуле:

$$Q=V/\tau, \quad (5.1)$$

где  $V$  – объем жидкости,  $\text{м}^3$ ;  $\tau$  – время прохождения жидкости через данное поперечное сечение, с.

2. Напор с учетом скорости подхода определяется по формуле:

$$H_o = H + \frac{\alpha v_0^2}{2g}, \quad (5.2)$$

где  $H$  – напор, м;  $\alpha$  – коэффициент Кориолиса, принять равным 1,1;  $v_0$  – скорость подхода жидкости, м/с;  $g$  – ускорение свободного падения,  $\text{м/с}^2$ .

3. В данной лабораторной работе скорость подхода  $v_0$  определяется по формуле

$$v_0 = \frac{Q}{\omega} = \frac{Q}{b(H+P)}, \quad (5.3)$$

где  $Q$  – расход,  $\text{м}^3/\text{с}$ ;  $\omega$  – площадь живого сечения,  $\text{м}^2$ ;  $b$  – ширина водослива, м;  $H$  – напор, м;  $P$  – высота порога, м.

4. На пороге неподтопленного водослива поток находится в бурном состоянии, т. е. глубина на пороге  $h$  меньше критической  $h_{кр}$ .

Критическую глубину для прямоугольного водослива определить по формуле

$$h_{кр} = \sqrt[3]{\frac{\alpha Q^2}{gb^2}}, \quad (5.4)$$

где  $\alpha$  – коэффициент Кориолиса, принять равным 1,1;  $Q$  – расход, м<sup>3</sup>/с;  $g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;  $b$  – ширина водослива, м.

5. Определить опытные значения коэффициентов расхода

$$m = \frac{Q}{b\sqrt{2gH_0^{3/2}}}, \quad (5.5)$$

скорости

$$\varphi = \frac{Q}{bh\sqrt{2g(H_0-h)}}, \quad (5.6)$$

подтопления

$$\sigma_{п} = \frac{Q}{mb\sqrt{2gH_0^{3/2}}}, \quad (5.7)$$

### **Требования к содержанию отчета по работе:**

Отчет по данной лабораторной работе должен содержать информацию о теме и цели работы, формулировку задания, все выполняемые расчеты и выводы по результатам опытов, в том числе в виде построенного в масштабе профиля водослива и свободной поверхности потока. Результаты расчетов оформляются в виде таблицы (таблица 9).

### **Перечень типовых вопросов для защиты лабораторной работы**

1. Условия, при котором водослив является водосливом с широким порогом.
2. Как изменяется значение коэффициента расхода при увеличении напора?
3. Начертить схему подтопленного истечения через водослив с широким порогом.

4. Написать формулу для определения критической глубины.
5. Условия подтопления водослива с широким порогом.
6. Зарисовать схему неподтопленного водослива с широким порогом.
7. Формула для определения скорости подхода, используемая в данной лабораторной работе.
8. Формула для определения напора с учетом скорости подхода.
9. Единицы измерения напора с учетом скорости подхода.
10. В случае, если глубина на пороге неподтопленного водослива меньше критической, поток будет находиться в бурном или спокойном состоянии?

Таблица 9 – Протокол исследования

| Водослив        | Измеренные |          |           |        |        |             |                 | Вычисленные |          |             |     |           |              |
|-----------------|------------|----------|-----------|--------|--------|-------------|-----------------|-------------|----------|-------------|-----|-----------|--------------|
|                 | $P, м$     | $V, м^3$ | $\tau, с$ | $H, м$ | $h, м$ | $\Delta, м$ | $h_{\delta}, м$ | $Q, м^3/с$  | $H_0, м$ | $h_{кр}, м$ | $t$ | $\varphi$ | $\sigma_{п}$ |
| Не<br>подтоплен |            |          |           |        |        |             |                 |             |          |             |     |           | -            |
| Подтоплен       |            |          |           |        |        |             |                 |             |          |             |     |           |              |

## Лабораторная работа 6

### Изучение гидравлического прыжка в прямоугольном русле

**Цель работы:** изучить явление гидравлического прыжка в прямоугольном русле, сформировать навыки выполнения гидравлических расчетов.

**Задание:** изучить структуру гидравлического прыжка, определить его вид, длину и потери энергии в прыжке. Сравнить опытные величины с вычисленными по формулам.

**Оборудование:** гидравлический лоток, мерная рейка, мерная лента, секундомер, затвор.

#### Порядок выполнения работы:

1. Опыты проводятся для двух видов прыжка: совершенного и несовершенного (прыжок-волна, волнистый прыжок) (рисунки 8, 9).

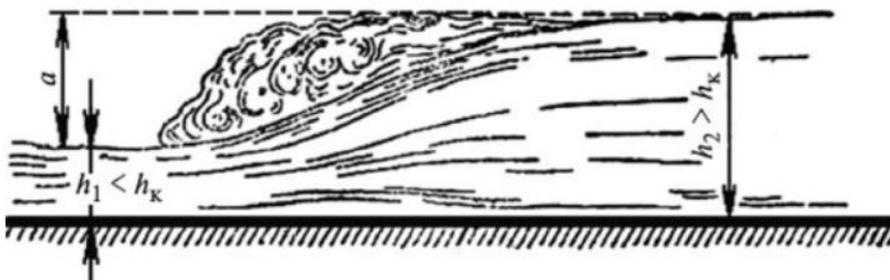


Рисунок 8 – Совершенный гидравлический прыжок:

$h_1$  – первая сопряженная глубина;  $h_2$  – вторая сопряженная глубина;

$h_k$  – критическая глубина;  $a$  – высота прыжка



Рисунок 9 – Несовершенный гидравлический прыжок (прыжок-волна, волнистый прыжок):

$h_1$  – первая сопряженная глубина;  $h_2$  – вторая сопряженная глубина;

$h_k$  – критическая глубина

При высоте прыжка  $a \geq h_1$  или  $\frac{h_2}{h_1} \geq 2$  прыжок называется *совершенным*.

В совершенном гидравлическом прыжке различаются две зоны – нижняя и верхняя. В нижней зоне движение поступательное, имеет форму расширяющейся в вертикальной плоскости струи. В верхней зоне совершенного прыжка образуется водяной валец, насыщенный воздухом (аэрированный), вращающийся над нижней зоной. Если переход бурного потока в спокойный происходит при  $a < h_1$  (или  $\frac{h_2}{h_1} < 2$ ), то прыжок будет *несовершенный*, или *волнистый*. *Волнистый гидравлический прыжок* (прыжок-волна) – гидравлический прыжок, характеризующийся отсутствием поверхностного водоворота (вальца) и наличием ряда волн на свободной поверхности потока ниже прыжка.

2. Измерить параметры потока (см. таблицы 10, 11). Первая сопряженная глубина, обозначаемая  $h_1$  или  $h'$ , измеряется в бурном потоке непосредственно перед прыжком, вторая сопряженная глубина, обозначаемая  $h_2$  ( $h''$ ), измеряется за прыжком, в сечении, за которым не происходит дальнейшего увеличения глубины (рисунки 8, 9).

3. Выполнить расчеты (6.1–6.15), результаты внести в таблицы 10, 11. Сравнить опытные величины с вычисленными по формулам.

4. Ответить на вопросы, приведенные в конце лабораторной работы.

#### **Алгоритм проведения опытов:**

1. Лоток, в котором предполагается исследовать гидравлический прыжок, должен иметь небольшой уклон дна  $i$  или  $i=0$  и стеклянные стенки для наблюдений за внутренней структурой прыжка. Опыты проводятся для двух видов прыжка: совершенного и несовершенного.

2. Через лоток пропускается произвольный расход  $Q$ , для определения которого необходимо определить время заполнения резервуара  $\tau$  до значения  $V=100$  л.

3. Гидравлический прыжок можно получить, пропуская поток или из-под затвора, или в свободном лотке (без водослива и затвора), если при

открытом концевом затворе лотка поток будет находиться в бурном состоянии. При наличии бурного потока в лотке частичное закрытие концевого затвора вызовет резкое местное возрастание глубин потока. Образуется прыжок, который при дальнейшем прикрытии затвора перемещается в лотке навстречу течению. Следует при этом прикрытии затвора отрегулировать так, чтобы прыжок устойчиво сформировался на участке, удобном для измерений и наблюдений.

4. Измеряются сопряженные глубины  $h'$  и  $h''$  и длина прыжка  $l_{пр}$  – расстояние между сечениями с сопряженными глубинами.

**Алгоритм выполнения расчетов:**

1. Расход  $Q$  измеряется объёмным способом и определяется по формуле:

$$Q=V/\tau, \quad (6.1)$$

где  $V$  – объем жидкости,  $м^3$ ;  $\tau$  – время прохождения жидкости через данное поперечное сечение, с.

2. Определяются высота прыжка  $a$  и его вид (по значению  $\frac{h''}{h'}$ .)

Высотой прыжка называется разность между значениями сопряженных глубин (рисунок 8).

$$a = h'' - h' \quad (6.2).$$

3. Поток в открытом русле при глубине  $h' < h_{кр.}$  находится в бурном состоянии при этом параметр кинетичности  $\Pi_k > 1$ . Поток в спокойном состоянии имеет глубины  $h'' > h_{кр.}$ , параметр кинетичности  $\Pi_k < 1$ . Критическая глубина  $h_{кр}$  и параметр кинетичности  $\Pi_k$  для потока в прямоугольном русле определяются по формулам:

$$h_{кр} = \sqrt[3]{\frac{\alpha Q^2}{g b^2}}, \quad (6.3)$$

$$\Pi_k = \frac{\alpha Q^2 b}{g \omega^3}, \quad (6.4)$$

где  $a$  – коэффициент Кориолиса, принять равным 1,1;  $Q$  – расход,  $м^3/с$ ;  $g$  – ускорение свободного падения,  $м/с^2$ ;  $b$  – ширина русла, м;  $\omega$  – площадь живого сечения,  $м^2$ .

Для совершенного прыжка параметр кинетичности, вычисляемый для сечения перед прыжком  $\Pi_k \geq 3$  или для сечения за прыжком –  $\Pi_k \leq 0,375$ .

4. Механическая энергия, затрачиваемая на переход из бурного потока в спокойное состояние, может быть определена из уравнения Бернулли, составленного для сечений перед прыжком и за прыжком относительно плоскости дна потока (полагаемого горизонтальным на участке прыжка  $i = 0$ ).

$$h_{\text{тр}} = \left( h' + \frac{\alpha_1 v_1^2}{2g} \right) - \left( h'' + \frac{\alpha_2 v_2^2}{2g} \right), \quad (6.5)$$

где  $h_{\text{тр}}$  – потери удельной энергии в гидравлическом прыжке, м;  $\alpha_1, \alpha_2$  – коэффициенты Кориолиса в сечениях 1-1 и 2-2 соответственно;  $v_1, v_2$  – скорости в сечениях 1-1 и 2-2 соответственно, м/с.

Для прямоугольного русла из уравнения (6.5) и уравнения прыжка после преобразований получена формула потерь энергии в сечениях 1-1 и 2-2 гидравлического прыжка:

$$h_{\text{тр}} = \frac{(h'' - h')^3}{4h'h''}. \quad (6.6)$$

5. Потери энергии  $\mathcal{E}$  в гидравлическом прыжке, происходящем в единицу времени, равны  $\rho g Q h_{\text{тр}}$ .

6. Для определения длины  $l_{\text{пр}}$  совершенного гидравлического прыжка при нулевом уклоне предложен ряд формул:

формула Н. Н. Павловского

$$l_{\text{пр}} = 2,5(1,9h'' - h'), \quad (6.7)$$

формула М. Д. Чертоусова

$$l_{\text{пр}} = 10,3h'(\Pi'_k - 1)^{0,81}, \quad (6.8)$$

Формула Ф. И. Пикалова

$$l_{\text{пр}} = 4h'\sqrt{1 + 2\Pi'_k}, \quad (6.9)$$

формула Айвазяна, полученная для значений  $\Pi'_k \geq 3$

$$l_{\text{пр}} = \frac{80 + 8\sqrt{\Pi'_k}}{\Pi'_k}. \quad (6.10)$$

Волнистый прыжок изучен сравнительно мало. Длина волнистого прыжка может быть определена по формуле Г.Т. Дмитриева, полученной при исследованиях размыва песчаного дна под воздействием гидравлического прыжка:

$$l_{\text{пр}} = 10,6a = 10,6h'(\Pi'_k - 1). \quad (6.11)$$

7. Для определения расчетных значений при изучении совершенного гидравлического прыжка (таблица 11) можно использовать следующие зависимости:

$$h' = \frac{h''}{2} (\sqrt{1 + 8\Pi''_k} - 1), \quad (6.12)$$

$$h' = \frac{h''}{2} \left( \sqrt{1 + \left(\frac{h_{\text{кр}}}{h''}\right)^3} - 1 \right), \quad (6.13)$$

$$h'' = \frac{h'}{2} \left( \sqrt{1 + 8\left(\frac{h_{\text{кр}}}{h'}\right)^3} - 1 \right), \quad (6.14)$$

$$h'' = \frac{h'}{2} (\sqrt{1 + 8\Pi'_k} - 1) \quad (6.15)$$

где для прямоугольного русла  $\Pi_k = \frac{\alpha q^2}{gh^3}$ . Здесь  $q = \frac{Q}{b}$  – удельный расход, м<sup>3</sup>/с на 1м.

### **Требования к содержанию отчета по работе:**

Отчет по данной лабораторной работе должен содержать информацию о теме и цели работы, формулировку задания, все выполняемые расчеты и выводы по результатам опытов, в том числе в виде построенной в масштабе схемы совершенного гидравлического прыжка (с указанием сопряженных глубин  $h'$  и  $h''$ , критической глубины потока  $h_{\text{кр}}$ , высоты  $a$  и длины  $l_{\text{пр}}$  прыжка. Результаты расчетов оформляются в виде таблицы (таблица 10).

### **Перечень типовых вопросов для защиты лабораторной работы**

1. Условия возникновения гидравлического прыжка.
2. Формула, по которой определяется критическая глубина.
3. Дать определение термину «волнистый гидравлический прыжок».

4. Начертить схему совершенного гидравлического прыжка с указанием всех основных параметров потока.
5. В каком состоянии находится поток в открытом русле при первой сопряженной глубине?
6. Где измеряется вторая сопряженная глубина  $h''$  при исследовании совершенного гидравлического прыжка?
7. Какой прыжок наблюдается при высоте прыжка  $a \geq h'$  или  $\frac{h''}{h'} \geq 2$ ?
8. Как в данной лабораторной работе определялась высота гидравлического прыжка?
9. Характерные особенности совершенного гидравлического прыжка.
10. Зарисовать схему совершенного гидравлического прыжка.

Таблица 10 – Протокол исследований

| Измеренные значения        |                          |                             |                              |  | Вычисленные значения                 |                                      |                  |               |
|----------------------------|--------------------------|-----------------------------|------------------------------|--|--------------------------------------|--------------------------------------|------------------|---------------|
| Объем,<br>$V, \text{ м}^3$ | Время, $\tau, \text{ с}$ | Глубина,<br>$h', \text{ м}$ | Глубина,<br>$h'', \text{ м}$ | Длина<br>прыжка,<br>$l_{\text{пр}}, \text{ м}$ | Расход,<br>$Q, \text{ м}^3/\text{с}$ | Высота<br>прыжка $a,$<br>$\text{ м}$ | $\frac{h''}{h'}$ | Вид<br>прыжка |
| <i>1</i>                   | <i>2</i>                 | <i>3</i>                    | <i>4</i>                     | <i>5</i>                                       | <i>6</i>                             | <i>7</i>                             | <i>8</i>         | <i>9</i>      |
|                            |                          |                             |                              |  |                                      |                                      |                  |               |
|                            |                          |                             |                              |  |                                      |                                      |                  |               |

Таблица 10 – Протокол исследований (продолжение)

| Вычисленные значения   |                                    |                                     |   |   |   |
|--|------------------------------------|-------------------------------------|---|---|---|
| Критическая<br>глубина потока,<br>$h_{\text{кр}}, \text{ м}$ | Параметр<br>кинетичности, $\Pi'_k$ | Параметр<br>кинетичности, $\Pi''_k$ | Потери<br>напора,<br>$h_{\text{тр}}, \text{ м}$ | Потери<br>энергии,<br>$\mathcal{E}, \text{ Дж}$ | Длина прыжка,<br>$l_{\text{пр}}, \text{ м}$ |
| <i>10</i>  | <i>11</i>                          | <i>12</i>                           | <i>13</i>                                       | <i>14</i>                                       | <i>15</i>                                   |
|  |                                    |                                     |   |   |   |
|  |                                    |                                     |   |   |   |

Таблица 11 – Расчетные значения при изучении совершенного гидравлического прыжка

| Измеренные значения    |                         |                          | Вычисленные значения             |                                |
|------------------------|-------------------------|--------------------------|----------------------------------|--------------------------------|
| Объем, $V, \text{м}^3$ | Время, $\tau, \text{с}$ | Глубина, $h', \text{м}$  | Расход, $Q, \text{м}^3/\text{с}$ | Параметр кинетичности, $П'_k$  |
| <i>1</i>               | <i>2</i>                | <i>3</i>                 | <i>4</i>                         | <i>5</i>                       |
|                        |                         |                          |                                  |                                |
| Объем, $V, \text{м}^3$ | Время, $\tau, \text{с}$ | Глубина, $h'', \text{м}$ | Расход, $Q, \text{м}^3/\text{с}$ | Параметр кинетичности, $П''_k$ |
| <i>1</i>               | <i>2</i>                | <i>3</i>                 | <i>4</i>                         | <i>5</i>                       |
|                        |                         |                          |                                  |                                |

Таблица 11 – Расчетные значения при изучении совершенного гидравлического прыжка (продолжение)

| Вычисленные значения     |                                |  |                                       |   |
|--------------------------|--------------------------------|--|---------------------------------------|---|
| Глубина, $h'', \text{м}$ | Параметр кинетичности, $П''_k$ | Потери напора, $h_{\text{тр}}, \text{м}$ | Потери энергии, $\text{Э}, \text{Дж}$ | Длина прыжка, $l_{\text{пр}}, \text{м}$ |
| <i>6</i>                 | <i>7</i>                       | <i>8</i>                                 | <i>9</i>                              | <i>10</i>                               |
|                          |                                |  |                                       |   |
| Глубина, $h', \text{м}$  | Параметр кинетичности, $П'_k$  | Потери напора, $h_{\text{тр}}, \text{м}$ | Потери энергии, $\text{Э}, \text{Дж}$ | Длина прыжка, $l_{\text{пр}}, \text{м}$ |
| <i>6</i>                 | <i>7</i>                       | <i>8</i>                                 | <i>9</i>                              | <i>10</i>                               |
|                          |                                |  |                                       |   |

## Список рекомендуемой литературы

1. СП 33-101-2003. Определение основных расчетных гидрологических характеристик.
2. СП 58.13330.2019. Гидротехнические сооружения. Основные положения.
3. СП 80.13330.2016. Гидротехнические сооружения речные.
4. СП 290.1325800.2016 Водопрпускные гидротехнические сооружения (водосбросные, водоспускные и водовыпускные). Правила проектирования.
5. Беспалова, Л. А. Гидрология: учеб. пособие / Л. А. Беспалова, Е. В. Беспалова. – Ростов-на-Дону: ЮФУ, 2022. – 163 с.
6. Моргунов, К. П. Гидравлика гидротехнических сооружений / К. П. Моргунов. – 2-е изд., стер. – Санкт-Петербург: Лань, 2022. – 312 с.
7. Рудиков, Д. А. Гидравлика и гидрология: учеб. пособие / Д. А. Рудиков. – Ростов-на-Дону: РГУПС, 2021. – 118 с.
8. Чунюк, Д. Ю. Расчёт основания напорного гидротехнического сооружения: учеб.-метод. пособие / Д. Ю. Чунюк, Е. С. Гусева. – Москва: МИСИ – МГСУ, 2020. – 61 с.
9. Штеренлихт, Д. В. Гидравлика: учебник / Д. В. Штеренлихт. – 5-е изд., стер. – Санкт-Петербург: Лань, 2022. – 656 с.
10. Юрченко, А. Н. Эксплуатация и безопасность гидротехнических сооружений: учеб. пособие / А. Н. Юрченко. – Москва: МИСИ – МГСУ, 2022. – 58 с.

## ПРИЛОЖЕНИЯ

### Приложение А

#### Коэффициенты шероховатости естественных водотоков<sup>1</sup>

| Характеристика русла  | Коэффициенты шероховатости $n$ естественных водотоков |
|---|---|
| Естественное русло в благоприятных условиях (чистое, прямое, незасоренное, земляное, со свободным течением)   | 0,025–0,033   |
| То же, с камнями  | 0,03–0,04   |
| Периодические потоки (большие и малые) при хорошем состоянии поверхности и формы ложа   | 0,033   |
| Земляные русла сухих логов в относительно благоприятных условиях  | 0,04  |
| Русла периодических водотоков, несущих во время паводка заметное количество наносов с крупногалечниковым или покрытым растительностью ложем, периодические водотоки, сильно засоренные и извилистые | 0,05  |
| Чистое извилистое ложе с небольшим числом промоин и отмелей   | 0,033–0,045   |
| То же, но слегка заросшее и с камнями   | 0,035–0,05  |
| Заросшие участки рек с очень медленным течением и глубокими промоинами  | 0,05–0,08   |
| Заросшие участки рек болотного типа (заросли, кочки, во многих местах почти стоячая вода и пр.)   | 0,075–0,15  |
| Поймы больших и средних рек, сравнительно разработанные, покрытые растительностью (трава, кустарники)   | 0,05  |
| Значительно заросшие поймы со слабым течением и большими глубокими промоинами   | 0,08  |
| То же, с неправильным косоструйным течением и большими заводами и др.   | 0,1   |
| Поймы лесистые со значительными мертвыми пространствами, местными углублениями, озерами и др.   | 0,133   |
| Глухие поймы, сплошные заросли (лесные, таежного типа)  | 0,2   |

<sup>1</sup> СП 100.13330.2016 Мелиоративные системы и сооружения.

## Приложение Б

Таблица Б.1 – Величина коэффициента подтопления  $\sigma$  для водослива с широким порогом по Н. Н. Павловскому

| $\frac{h_{\Pi}}{H_0}$ | $\sigma$ | $\frac{h_{\Pi}}{H_0}$ | $\sigma$ | $\frac{h_{\Pi}}{H_0}$ | $\sigma$ |
|-----------------------|----------|-----------------------|----------|-----------------------|----------|
| до 0,7                | 1,000    | 0,90                  | 0,739    | 0,980                 | 0,360    |
| 0,75                  | 0,974    | 0,92                  | 0,676    | 0,990                 | 0,257    |
| 0,80                  | 0,928    | 0,94                  | 0,598    | 0,995                 | 0,183    |
| 0,83                  | 0,889    | 0,95                  | 0,552    | 0,997                 | 0,142    |
| 0,85                  | 0,855    | 0,96                  | 0,499    | 0,998                 | 0,116    |
| 0,87                  | 0,815    | 0,97                  | 0,436    | 0,999                 | 0,082    |

Таблица Б.2 – Значения коэффициента скорости  $\varphi$  для неподтопленного водослива с широким порогом без бокового сжатия по результатам исследований, выполненных Д. И. Куминым

|           |      |      |      |      |      |
|-----------|------|------|------|------|------|
| $t$       | 0,30 | 0,32 | 0,34 | 0,36 | 0,38 |
| $\varphi$ | 0,94 | 0,96 | 0,97 | 0,98 | 1,00 |

Таблица Б.3 – Значения коэффициента скорости  $\varphi$  для подтопленного водослива с широким порогом без бокового сжатия по результатам исследований, выполненных Д. И. Куминым

|           |             |      |      |      |      |
|-----------|-------------|------|------|------|------|
| $t$       | 0,30        | 0,32 | 0,34 | 0,36 | 0,38 |
| $\varphi$ | 0,76; 0,78* | 0,84 | 0,90 | 0,96 | 0,99 |

\* при  $h/H_0 < 0,95$

Локальный электронный методический материал

Ахмедова Наталья Равиловна

## ГИДРОЛОГИЯ И ГИДРОТЕХНИЧЕСКИЕ СООРУЖЕНИЯ

Редактор С. Кондрашова

Корректор Т. Звада

Уч.-изд. л. 2,6. Печ. л. 3,0.

Издательство федерального государственного бюджетного  
образовательного учреждения высшего образования  
«Калининградский государственный технический университет»  
236022, Калининград, Советский проспект, 1