

Министерство образования и науки Российской Федерации
—
САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

О.И.Зайцев Е.А. Локтионова В.Т.Орлов

Специальная гидравлика

Методические указания
к лабораторным работам

Санкт-Петербург
Издательство Политехнического университета
2013

ВВЕДЕНИЕ

Методические указания содержат описание пяти лабораторных работ, выполняемых студентами. Учебные лабораторные работы сопровождают теоретическое изучение следующих разделов специального курса гидравлики: «Гидравлический прыжок», «Истечение через водосливы», «Движение жидкости в пористых средах».

К каждой работе приводится описание соответствующей экспериментальной установки, состава работы, порядка выполнения опытов и обработки данных измерений.

Основной теоретический материал к этим работам изложен в учебнике А.Д. Гиргидова «Механика жидкости и газа (гидравлика)», рекомендованном Министерством образования Российской Федерации в качестве учебника для вузов [1].

Цель данного издания – дать возможность обучающимся самостоятельно подготовиться к проведению лабораторных работ. Предварительная подготовка облегчит процесс овладения измерительной аппаратурой и позволит оперативно провести измерения в лаборатории. Приведенные описания гидравлических явлений и представленные схемы течений помогут обратить внимание студентов на визуальные особенности потоков при выполнении лабораторных работ, а воспроизведение этих схем в масштабе по результатам измерений позволит облегчить процесс подготовки к экзамену по соответствующим разделам.

Указания предназначены для студентов строительных, энергетических и других специальностей, изучающих специальный курс гидравлики, а также могут быть полезны преподавателям при подготовке к лабораторным занятиям.

ИЗУЧЕНИЕ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО ПРЫЖКА И ПОСЛЕПРЫЖКОВОГО УЧАСТКА

Явление резкого увеличения глубины потока от величины h' , меньшей критической h_K , до величины h'' , большей h_K , называется *гидравлическим прыжком*. Глубины h' и h'' называются соответственно первой и второй сопряженными глубинами (рис.1).

Характерной особенностью гидравлического прыжка является наличие поверхностного вальца – водоворотной зоны, где вода насыщена пузырьками воздуха (аэрирована). Движение частиц жидкости здесь имеет неупорядоченный неустойчивый характер, и только в качестве расчетной модели валец представляют на схемах в виде водоворота с упорядоченными замкнутыми линиями тока. Горизонтальную проекцию вальца называют длиной гидравлического прыжка $l_{\text{п}}$, а вертикальную проекцию вальца (т.е. разность сопряженных глубин) – высотой прыжка $a = h'' - h'$.

Ниже вальца располагается так называемый транзитный поток, характеризующийся условием $Q = \text{const}$. При расширении транзитного турбулентного потока в пределах гидравлического прыжка распределение осредненной скорости в поперечном сечении становится неравномерным, и в конце прыжка (створ I-I на рис.1) скорость у свободной поверхности равна нулю, а максимальные ее значения оказываются вблизи дна. На формирование эпюры скорости в пределах прыжка оказывают влияние пульсационные скорости, которые при расширении потока существенно больше, чем при равномерном движении. На некотором расстоянии после прыжка (створ II-II рис.1) эпюры осредненной скорости и пульсационные скорости постепенно становятся такими же, как и при равномерном движении. Участок, на котором это происходит, называется послепрыжковым. Как показывают эксперименты, длина послепрыжкового участка $l_{\text{пп}} = (10 \dots 30) h''$.

Для цилиндрического русла с малым уклоном дна ($i \approx 0$), применяя закон изменения количества движения к объему отсека жидкости, ограниченного сечениями с глубинами h' и h'' , и пренебрегая силой внешнего трения о дно, получают основное уравнение гидравлического прыжка

$$\frac{\alpha_0^1 Q^2}{g\omega_1} + \omega_1 h_1^C = \frac{\alpha_0^2 Q^2}{g\omega_2} + \omega_2 h_2^C, \quad (1)$$

(где индексы 1 и 2 соответствуют сечениям с сопряженными глубинами h' и h'' , h_i^c – заглублиение центра тяжести живого сечения под свободной поверхностью). Из уравнения (1) для случая горизонтального прямоугольного русла можно получить формулы для определения сопряженных глубин h' и h''

$$h' = 0,5h'' \left[\sqrt{1 + 8 \left(\frac{h_k}{h''} \right)^3} - 1 \right], \quad (2)$$

$$h'' = 0,5h' \left[\sqrt{1 + 8 \left(\frac{h_k}{h'} \right)^3} - 1 \right]. \quad (3)$$

Для определения длины гидравлического прыжка можно рекомендовать эмпирическую формулу

$$l_{\Pi} \approx 5(h'' - h'). \quad (4)$$

Задачи работы – наблюдение за переходом потока из бурного состояния в спокойное при помощи гидравлического прыжка и визуальное ознакомление со структурой турбулентного потока в области гидравлического прыжка; освоение методики измерения глубин потока и местных осредненных скоростей течения с помощью измерительной иглы (рис.2) и прибора Пито (рис.3); построение эпюр осредненных скоростей течения, а также определение расхода воды Q_{Π} с помощью эпюры, построенной в створе П.

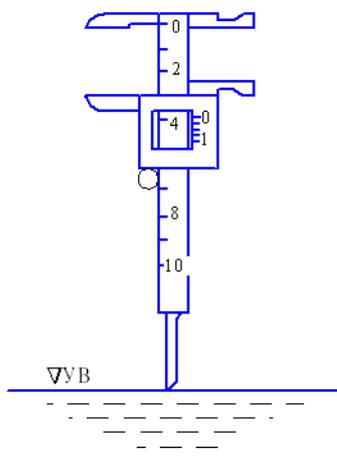


Рис. 2. Измерительная игла

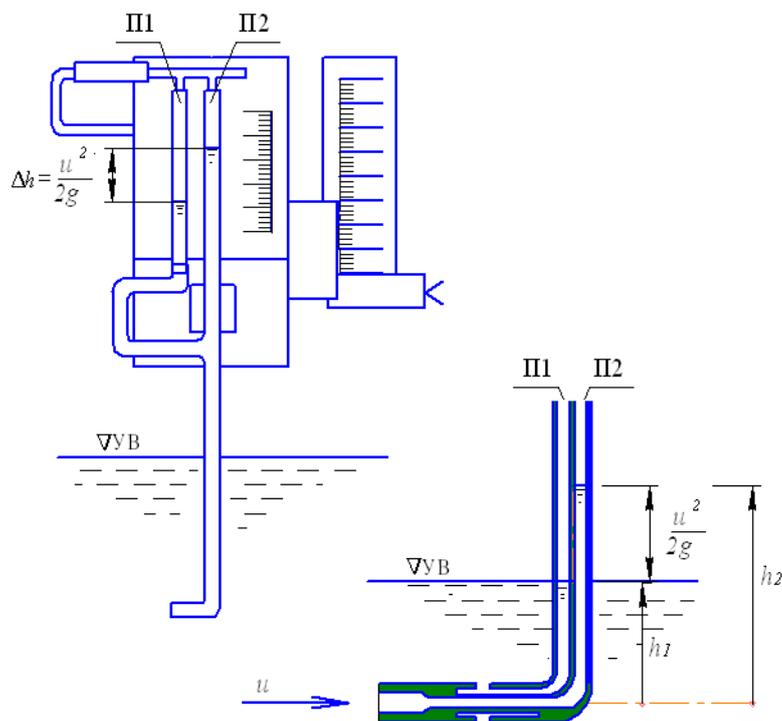


Рис.3. Прибор Пито

Описание экспериментальной установки

Экспериментальная установка (рис.4) представляет собой систему с замкнутым водооборотом и состоит из питающего бака 9 с погружным насосом 8, который подает воду по трубопроводу 10 в голову 2 гидравлического лотка 1, оборудованного в конце плоским затвором 3. Вытекающая из-под затвора вода вновь поступает в питающий бак.

Регулирование расхода воды в системе осуществляется с помощью задвижки 11, установленной на соединительном трубопроводе.

Гидравлический лоток 1, выполненный из прозрачного оргстекла, имеет ширину 25,5 см и длину 5,0 м.

В голове 2 лотка имеется система гасителей энергии в виде трех последовательно установленных решеток с отверстиями разных диаметров. Это позволяет получить на входе в лоток течение, близкое к равномерному однородному турбулентному потоку.

В гидравлическом лотке в качестве отдельных съемных модулей могут быть установлены модели водосливов. Плоский затвор 3 в конце лотка позволяет устанавливать необходимый уровень воды в лотке при заданном расходе.

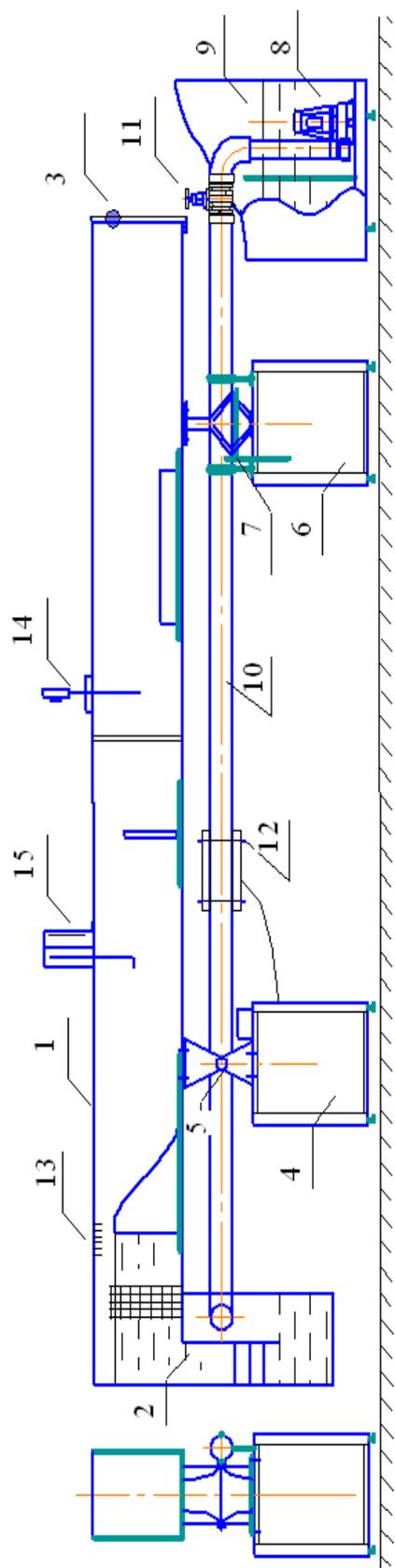


Рис.4. Схема гидравлического лотка

Гидравлический лоток опирается на две тумбы 4 и 6, причем опора на тумбу 4 выполнена в виде цилиндрического шарнира, а на тумбу 6 – в виде домкрата, что позволяет изменять в небольших пределах продольный уклон лотка.

Гидравлический лоток оборудован ультразвуковым автоматическим расходомером, установленным на соединительном трубопроводе 10. Информация о величине расхода выдается постоянно в процессе опыта в цифровом виде.

Для определения отметок уровней воды используются измерительные иглы 14 в виде стандартных электронных штангенциркулей (см. рис.2), закрепленных на кронштейнах из оргстекла.

Измерение горизонтальных координат каких-либо сечений потока осуществляется с помощью линейки, проложенной вдоль лотка.

Для определения осредненных скоростей в турбулентном потоке используется прибор Пито 15, укрепленный на подвижной вертикальной штанге и установленный на горизонтальной передвижной каретке. Каретка и штанга снабжены линейками с миллиметровой шкалой, что позволяет определять вертикальную и горизонтальную (поперек потока) координаты точки, в которой установлена трубка Пито.

Измерительный элемент трубки Пито (рис.3) представляет собой прикрепленное к вертикальной штанге длинное цилиндрическое тело, расположенное горизонтально навстречу потоку. На носике тела имеется отверстие (называемое динамическим), от которого внутри тела и вертикальной штанги проведена тонкая трубка. На цилиндрической поверхности тела на некотором удалении от носика имеется кольцевая щель (статическое отверстие), соединенная с другой вертикальной трубкой. Статическое и динамическое отверстия при помощи гибких шлангов соединены со стеклянными пьезометрическими трубками, смонтированными на щитке, оборудованном линейкой с миллиметровой шкалой. Разность уровней воды в пьезометрических трубках дает величину скоростного напора, отвечающего осредненной скорости в данной точке.

Гидравлический прыжок в лотке образуется при истечении через водослив практического профиля очертания Кригера-Офицерова. В напорном питающем баке 9 поддерживается постоянный уровень воды, при котором за водосливом устанавливается глубина меньше критической, а в конце лотка с помощью плоского затвора 3 фиксируется глубина больше критической. Уровень воды перед водосливом называют уровнем верхнего бьефа (УВБ), а

уровень воды в лотке за гидравлическим прыжком – уровнем нижнего бьефа (УНБ).

Содержание работы

1. Построение продольного профиля свободной поверхности потока при заданном расходе Q и соответствующей глубине воды в конце лотка h_H .
2. Определение по теоретической зависимости второй сопряженной глубины $h''_{\text{ТЕОР}}$ и сопоставление ее с глубиной $h''_{\text{ОП}}$, найденной из опыта.
3. Определение осредненных скоростей течения прибором Пито в двух створах (рис.1) по длине лотка и построение эпюр осредненных скоростей течения для каждой измерительной вертикали.
4. Определение средней скорости течения v для створа II-II и расхода Q_{II} .

Порядок проведения опытов

1. Наблюдайте визуально характерные признаки течения и структуры потока при его переходе из бурного состояния в спокойное в результате гидравлического прыжка.
2. Определите расход Q , считав показания с дисплея расходомера.
3. Снимите отсчеты по электронному нониусу измерительной иглы, отвечающие отметкам дна $\nabla_{\text{д}}$ и свободной поверхности $\nabla_{\text{п}}$ потока вдоль оси лотка, а по горизонтальной рейке на стенке лотка определите расстояние от начального сечения до сечения, в котором измеряется глубина. В бланке отчета в графе «Примечание» укажите, какие сечения относятся к кривой свободной поверхности типа c до гидравлического прыжка, какие – к прыжку и к послепрыжковому участку. Ориентировочно также определите длину гидравлического прыжка.
4. Определите с помощью прибора Пито осредненные скорости в двух створах (рис.1): а) в створе I-I, расположенном непосредственно за прыжком; б) в створе II-II, расположенном ниже по течению от створа I-I на расстоянии нескольких длин прыжка. Осредненные скорости течения в каждом створе измерьте в трех точках (1,2,3) вертикали, совпадающей с осью лотка. При этом точка 1 выбирается у дна; точка 2 – на расстоянии от дна, равном примерно половине глубины нижнего бьефа h_H ; точка 3 – вблизи свободной поверхности воды.

Для определения осредненных скоростей течения поместите прибор Пито в намеченную точку и установите по нониусу вертикальной штанги высотное

положение отверстий трубки Пито, а затем снимите отсчеты, отвечающие статическому и динамическому отверстиям прибора.

Результаты измерений запишите в соответствующие графы таблиц бланка отчета.

Обработка экспериментальных данных

1. Вычислите глубины потока вдоль его оси. Глубину h для данной вертикали определите по формуле

$$h = \nabla_{\text{П}} - \nabla_{\text{Д}},$$

где $\nabla_{\text{П}}$ – отсчет по нониусу измерительной иглы, соответствующий свободной поверхности; $\nabla_{\text{Д}}$ – отсчет по нониусу измерительной иглы, соответствующий дну лотка.

2. По результатам вычисления глубин потока и соответствующим им горизонтальным расстояниям постройте продольный профиль свободной поверхности наблюдаемого потока (в масштабе на миллиметровке).

3. Вычислите по формуле (3) вторую сопряженную глубину $h''_{\text{ТЕОР}}$, подставив в (3) глубину h' , найденную в процессе опыта. Критическую глубину $h_{\text{К}}$ определите по формуле

$$h_{\text{К}} = \sqrt[3]{\frac{\alpha Q^2}{gb^2}}, \quad (5)$$

где b – ширина лотка.

4. Установите расхождение в процентах между глубиной $h''_{\text{ТЕОР}}$ и глубиной $h''_{\text{ОП}}$ по формуле

$$\Delta h = \frac{h''_{\text{ТЕОР}} - h''_{\text{ОП}}}{h''_{\text{ОП}}} \cdot 100\%.$$

5. Вычислите осредненные скорости течения в трех точках створов I-I и II-II по формуле

$$u = \sqrt{2g\Delta h}, \quad (6)$$

где $\Delta h = \nabla_2 - \nabla_1$ – разность отсчетов по пьезометрам П_1 и П_2 , соответствующих динамическому и статическому отверстиям прибора Пито.

6. Определите среднюю скорость течения в живом сечении (створ II-II) по формуле

$$v = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n u_i, \quad (7)$$

где u_i – осредненная скорость в точке; n – число точек в живом сечении (в данном случае $n=3$).

7. Постройте по данным п.5 эпюры осредненных скоростей течения в створах I-I и II-II, как это показано на рис.1.

8. Определите расход воды в лотке по формуле

$$Q_{\Pi} = v \cdot \omega, \quad (8)$$

где v – средняя скорость, найденная по формуле (7), ω – площадь живого сечения в створе II-II, $\omega = h_{\Pi} \cdot b$.

9. Сопоставьте расход Q , найденный с помощью расходомера, с величиной расхода Q_{Π} , определенного по средней скорости. Расхождение в процентах между величинами Q и Q_{Π} определите по формуле

$$\Delta Q = \frac{Q - Q_{\Pi}}{Q_{\Pi}} \cdot 100\%.$$

Лабораторная работа 2

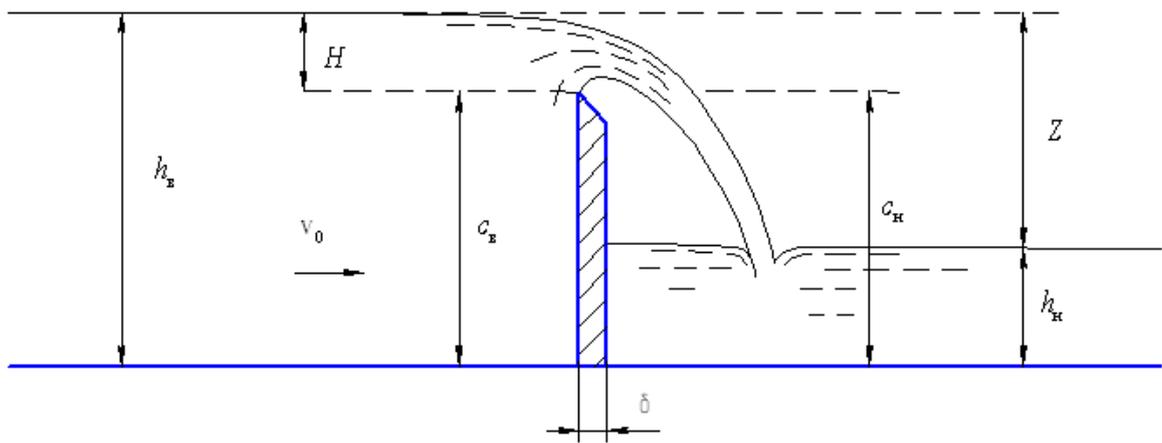
ИЗУЧЕНИЕ ИСТЕЧЕНИЯ ВОДЫ

ЧЕРЕЗ ВОДОСЛИВ С ТОНКОЙ СТЕНКОЙ

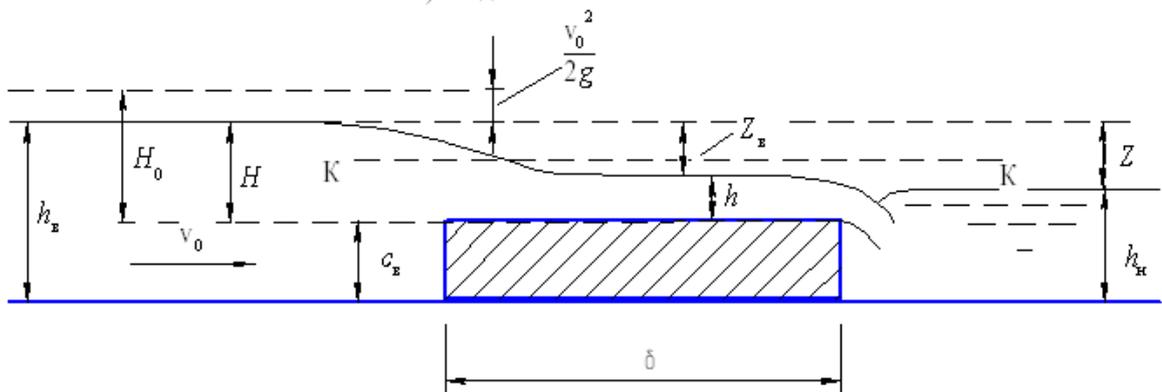
Стенка, в которой имеется водосливное отверстие с безнапорным истечением жидкости, называется водосливной стенкой или просто *водосливом*.

Рассматривая истечение воды через водосливы, пользуются следующими терминами и обозначениями (рис. 5): участок потока перед водосливом называется верхним бьефом, участок за водосливом – нижним бьефом; H – геометрический напор на водосливе; H_0 – полный напор на водосливе, $H_0 = H + v_0^2/2g$; v_0 – скорость подхода, т.е. средняя скорость в сечении верхнего бьефа с глубиной h_B ; δ – толщина водосливной стенки; c_B и c_H – высота водосливной стенки соответственно со стороны верхнего и нижнего бьефов; Z – геометрический перепад на водосливе; Z_0 – полный перепад на водосливе, $Z_0 = Z + v_0^2/2g$; b – ширина водосливного отверстия (размер, перпендикулярный плоскости чертежа на рис.5).

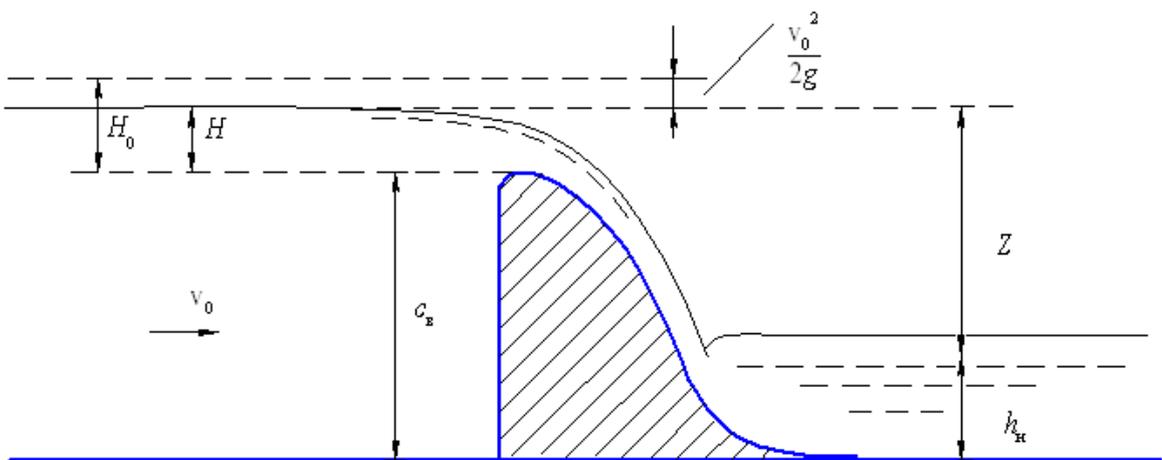
Водосливы классифицируются по нескольким признакам:



а) водослив с тонкой стенкой



б) водослив с широким порогом



в) водослив практического профиля очертания Кригера-Офицера

Рис.5. Схемы истечения через неподтопленные водосливы

1. В зависимости от формы отверстия водосливы бывают: прямоугольные, треугольные, трапециевидные, параболические и др.
2. В зависимости от формы и отношения толщины стенки δ к напору H различают:

а) водосливы с тонкой стенкой (рис.5,а), которым соответствует $\delta / H \leq 0,5$;

б) водосливы с широким порогом (рис.5,б), которым соответствует $2 \leq \delta / H \leq 8$;

в) водосливы практического профиля – все остальные водосливы, не относящиеся к первым двум видам. Один из водосливов практического профиля (стенка Кригера-Офицерова) показан на рис.5, в.

3. В зависимости от влияния нижнего бьефа на истечение воды через водослив различают:

а) водосливы неподтопленные, когда Q и H не зависят от глубины в нижнем бьефе h_H ;

б) водосливы подтопленные, когда Q и H зависят от глубины в нижнем бьефе h_H .

4. В зависимости от степени свободы доступа воздуха под струю воды, переливающейся через водосливную стенку, различают *водосливы с тонкой стенкой*:

а) со свободным истечением, когда в пространство под струю обеспечен свободный доступ воздуха и давление под струей равно атмосферному давлению;

в) с несвободным истечением, когда в подструйное пространство доступ воздуха затруднен, и давление под струей меньше атмосферного.

Прямоугольный водослив с вертикальной тонкой стенкой без бокового сжатия, со свободным истечением и неподтопленный называется *нормальным* водосливом.

Расход воды для нормального водослива с тонкой стенкой определяется по формуле

$$Q = m_{OH} b \sqrt{2g} H^{3/2}, \quad (9)$$

где m_{OH} – коэффициент расхода нормального водослива, учитывающий скорость подхода v_0 .

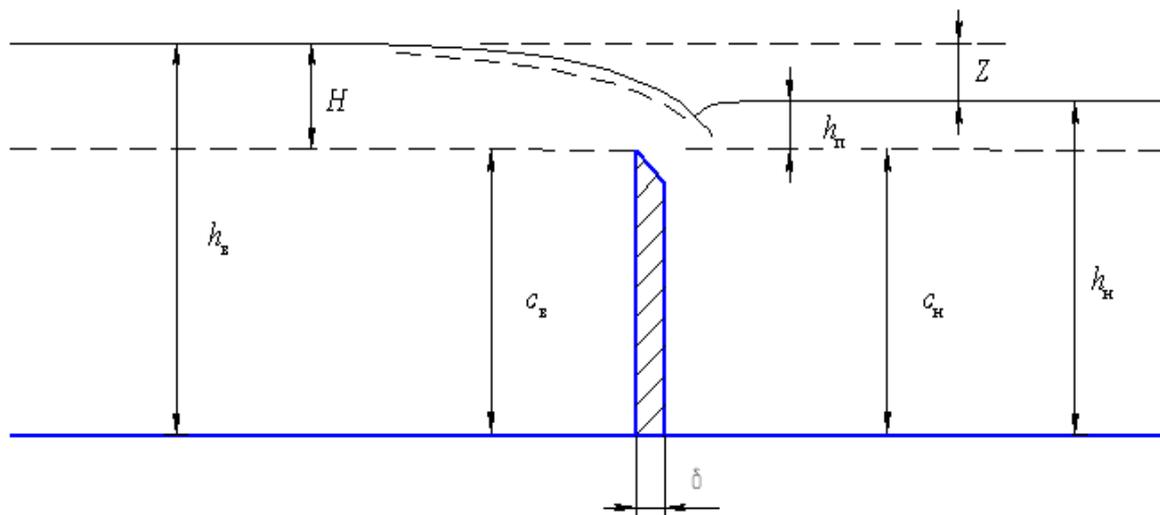
Коэффициент расхода m_{OH} может быть вычислен по эмпирической зависимости

$$m_{OH} = 0,402 + 0,054 \sqrt{H / c_B}. \quad (10)$$

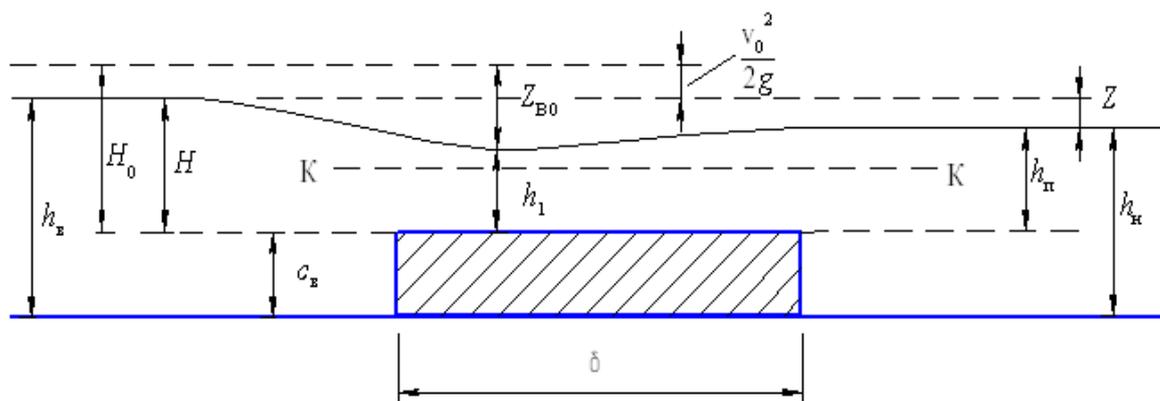
Водослив с тонкой стенкой будет подтопленным (рис.6, а) при соблюдении двух условий:

а) высота подтопления $h_{II} > 0$;

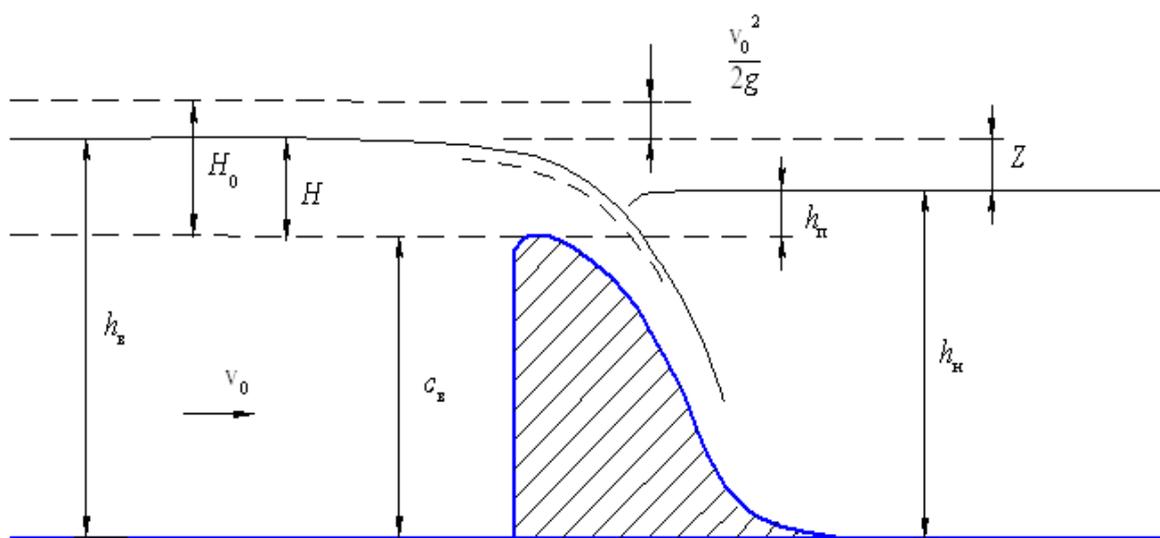
б) в нижнем бьефе за водосливом спокойное состояние потока (нет гидравлического прыжка).



а) водослив с тонкой стенкой



б) водослив с широким порогом



в) водослив практического профиля очертания Кригера-Офицера

Рис.6. Схемы истечения через подтопленные водосливы

В случае подтопленного водослива с тонкой стенкой расход через водослив определяется по формуле

$$Q = m_0 b \sqrt{2g} H^{3/2}, \quad (11)$$

в которой $m_0 = \sigma_{\Pi} \cdot m_{0H}$.

Коэффициент подтопления σ_{Π} вычисляется по эмпирической формуле

$$\sigma_{\Pi} = 1,05 \left(1 + 0,2 \frac{h_{\Pi}}{c_H} \right) \sqrt[3]{\frac{Z}{H}}. \quad (12)$$

Описание экспериментальной установки

Для изучения истечения воды через водосливы используется экспериментальная установка, схема которой представлена на рис.4.

В горизонтальный лоток прямоугольного поперечного сечения последовательно устанавливаются изучаемые водосливы. Прозрачные боковые стенки лотка позволяют наблюдать за характером истечения воды через водосливы.

Для измерения отметок дна, уровней воды, отметки гребня водослива служит игла 14, которая может перемещаться по длине лотка.

Расход воды определяется автоматическим ультразвуковым расходомером, который расположен на трубопроводе, подающем воду в голову лотка.

Для создания и поддержания нужной отметки уровня воды в нижнем бьефе исследуемого водослива используется плоский затвор 3 в конце лотка.

Содержание работы

1. Наблюдение за характером истечения воды через неподтопленный и подтопленный водослив с тонкой стенкой.

2. Проведение измерений отметок свободной поверхности и дна лотка по длине потока для неподтопленного и подтопленного водосливов.

3. Обработка опытных данных с целью получения:

а) коэффициентов расхода m для неподтопленного и подтопленного водослива с тонкой стенкой;

б) коэффициента подтопления σ_{Π} для подтопленного водослива с тонкой стенкой.

4. Сопоставление определенных из опытов коэффициентов с найденными в справочной литературе.

5. Построение по данным опытов картины истечения воды через исследуемые водосливы.

Порядок проведения опытов

1. Определите расход воды Q , считав показания дисплея автоматического расходомера.

2. Изменяя открытие затвора, расположенного в конце лотка, создайте такие условия истечения воды через водослив, чтобы он работал как неподтопленный.

Примечание. При проведении опытов с неподтопленным водосливом с тонкой стенкой атмосферное давление под струей обеспечивайте подводом воздуха под струю через специальную трубку.

3. При помощи измерительной иглы определите следующие отметки:

- а) гребня водослива ∇ Гр.вод.;
- б) дна лотка в верхнем бьефе ∇ ДВБ;
- в) дна лотка в нижнем бьефе ∇ ДНБ;
- г) уровня воды в верхнем бьефе ∇ УВБ;
- д) уровня воды в нижнем бьефе ∇ УНБ;
- е) уровня воды на гребне водослива ∇ УГр.вод.

Результаты измерений запишите в бланк отчета.

4. Не изменяя расхода, затвором в конце лотка увеличьте глубину в нижнем бьефе до величины, при которой водослив становится подтопленным. Проведите измерение иглой соответствующих отметок свободной поверхности в пределах водослива.

Примечание. Переход водослива от неподтопленного к подтопленному можно установить следующим образом. В верхнем бьефе неподтопленного водослива установите измерительную иглу так, чтобы ее острие касалось поверхности воды. После этого, постепенно повышайте уровень воды нижнего бьефа до тех пор, пока острие измерительной иглы не начнет подтапливаться поднимающимся уровнем воды в верхнем бьефе.

5. Вентилем 11 измените величину расхода Q и проведите измерение отметок свободной поверхности для случая неподтопленного и подтопленного водослива в соответствии с указанной выше методикой проведения опытов.

Обработка экспериментальных данных

1. Для каждого из проведенных опытов вычислите глубину воды в верхнем бьефе изучаемого водослива

$$h_B = \nabla_{УВБ} - \nabla_{ДВБ}.$$

2. Вычислите геометрический напор на водосливе

$$H = \nabla_{УВБ} - \nabla_{Гр.вод.}$$

3. Найдите коэффициент расхода $(m_{ОН})_{ОП}$ для неподтопленного водослива с тонкой стенкой по формуле (9).

4. Найдите коэффициент расхода $(m_{ОН})_{ОП}$ для подтопленного водослива с тонкой стенкой по формуле (11).

5. Определите коэффициент подтопления

$$\sigma_{П \rightarrow ОП} = m_{ОП} / m_{ОН}.$$

6. Вычислите коэффициент расхода $(m_{ОН})_{ЛИТ}$ по формуле (10).

7. Найдите высоту подтопления

$$h_{П} = \nabla_{УНБ} - \nabla_{Гр.вод.}$$

и вычислите коэффициент подтопления $\sigma_{П \rightarrow ЛИТ}$ по зависимости (12).

6. Найдите расхождение в процентах между экспериментальными величинами и величинами, найденными по справочным данным, по формулам

$$\Delta m = \frac{m_{ЛИТ} - m_{ОП}}{m_{ОП}} 100\%; \quad \Delta \sigma_{П} = \frac{\sigma_{П \rightarrow ЛИТ} - \sigma_{П \rightarrow ОП}}{\sigma_{П \rightarrow ОП}} 100\%,$$

где индексы <лит> и <оп> отвечают величинам, взятым из литературных источников и полученным на основании опытов.

7. На листе миллиметровки в масштабе для одного из расходов покажите картину истечения через неподтопленный и подтопленный водослив с тонкой стенкой.

Лабораторная работа 3

ИЗУЧЕНИЕ ИСТЕЧЕНИЯ ВОДЫ

ЧЕРЕЗ ВОДОСЛИВ С ШИРОКИМ ПОРОГОМ

Водослив с широким порогом, как определено выше, отвечает условию $2 \leq \delta / H \leq 8$. В данной работе изучается истечение воды через прямой прямоугольный неподтопленный (рис.5,б) и подтопленный (рис.6,б) водосливы без бокового сжатия.

Расход воды, переливающейся через прямоугольный неподтопленный водослив с широким порогом находят по формуле

$$Q = mb\sqrt{2gH_0^{3/2}}, \quad (13)$$

где m – коэффициент расхода водослива с широким порогом, зависящий от очертания входной грани водослива, b – ширина водослива (в данном случае – ширина лотка), H_0 – напор на водосливе с учетом скорости подхода.

Водослив с широким порогом считают подтопленным, если выполняется критерий

$$h_{\Pi} > 0,75 \dots 0,85 H_0.$$

Формула для расчета расхода через подтопленный водослив с широким порогом имеет вид

$$Q = \varphi_{\Pi} b h_1 \sqrt{2g(H_0 - h_1)} = \varphi_{\Pi} b h_1 \sqrt{2g(Z_B)_0}, \quad (14)$$

где φ_{Π} – коэффициент скорости для подтопленного водослива с широким порогом; h_1 – глубина воды на пороге водослива.

Описание экспериментальной установки

Для изучения истечения воды через водослив с широким порогом используется та же экспериментальная установка и то же измерительное оборудование, что и в работе 2. Общая схема установки представлена на рис.4.

Содержание работы

1. Проведение серии опытов для исследуемого водослива с измерением отметок свободной поверхности и дна лотка по длине потока в пределах водослива.
2. Обработка опытных данных с целью получения:
 - а) коэффициента расхода m для неподтопленного водослива с широким порогом; б) коэффициента скорости φ_{Π} для подтопленного водослива с широким порогом.
3. Сопоставление определенных из опытов коэффициентов с найденными в справочной литературе.
4. Построение по данным опытов картины истечения воды через исследуемые водосливы.

Порядок проведения опытов

1. Определите расход воды Q , считав показания с дисплея автоматического расходомера.
2. С помощью затвора, расположенного в конце лотка, создайте такие условия истечения воды через водослив, чтобы он работал как неподтопленный.

3. При помощи измерительной иглы определите следующие отметки:

- а) гребня водослива ∇ Гр.вод.;
- б) дна лотка в верхнем бьефе ∇ ДВБ;
- в) дна лотка в нижнем бьефе ∇ ДНБ;
- г) уровня воды в верхнем бьефе ∇ УВБ;
- д) уровня воды в нижнем бьефе ∇ УНБ;
- е) уровня воды на гребне водослива ∇ У Гр.вод.

Результаты измерений запишите в бланк отчета.

4. Не изменяя расхода, затвором в конце лотка увеличьте глубину в нижнем бьефе до величины, при которой водослив становится подтопленным. Наблюдайте в ходе подъема уровня воды в нижнем бьефе изменение картины течения в пределах водосливной стенки.

5. Проведите измерение иглой соответствующих отметок свободной поверхности в пределах водослива.

Примечание. Переход водослива от неподтопленного к подтопленному зафиксируйте таким же образом, как и в работе 2, установив измерительную иглу в верхнем бьефе неподтопленного водослива.

6. Вентилем 11 измените величину расхода Q и проведите измерение отметок свободной поверхности для случаев неподтопленного и подтопленного водослива в соответствии с указанной выше методикой проведения опытов.

Обработка экспериментальных данных

1. Вычислите глубину воды в верхнем бьефе изучаемого водослива

$$h_B = \nabla \text{УВБ} - \nabla \text{ДВБ}.$$

2. Определите площадь живого сечения потока в верхнем бьефе изучаемого водослива $\omega_{\text{ВБ}} = h_B b$.

3. Найдите скорость подхода к водосливу $v_0 = Q/\omega_{\text{ВБ}}$ и скоростной напор $v_0^2/2g$.

4. Вычислите геометрический напор на водосливе

$$H = \nabla \text{УВБ} - \nabla \text{Гр.вод.}$$

и полный напор с учетом скорости подхода

$$H_0 = H + v_0^2/2g.$$

5. Найдите коэффициент расхода m для неподтопленного водослива с широким порогом по формуле (13).

6. Вычислите глубину воды на пороге для подтопленного водослива

$$h_1 = \nabla \Upsilon \text{ Гр.вод.} - \nabla \text{ Гр.вод.}$$

7. Найдите для подтопленного водослива перепад уровней свободной поверхности в верхнем бьефе и на пороге водослива

$$Z_B = H - h_1$$

и определите его с учетом скорости подхода

$$\zeta_{B \rightarrow \sigma} = Z_B + \frac{v_0^2}{2g}.$$

8. Вычислите коэффициент скорости φ_{Π} для подтопленного водослива по формуле (14).

9. Коэффициенты расхода m и скорости φ_{Π} сопоставьте с соответствующими коэффициентами, рекомендуемыми в литературе.

Расхождение в процентах между экспериментальными величинами и величинами, найденными в справочной литературе, вычислите по формулам

$$\Delta m = \frac{m_{\text{лит}} - m_{\text{оп}}}{m_{\text{оп}}} 100\%; \quad \Delta \varphi_{\Pi} = \frac{\varphi_{\Pi \text{ лит}} - \varphi_{\Pi \text{ оп}}}{\varphi_{\Pi \text{ оп}}} 100\%,$$

где индексы <лит> и <оп> отвечают величинам, взятым из литературных источников и полученным на основании опытов.

10. На листе миллиметровки в масштабе для одного из расходов покажите картину истечения через изучаемый водослив (неподтопленный и подтопленный).

Лабораторная работа 4

ИЗУЧЕНИЕ ИСТЕЧЕНИЯ ВОДЫ

ЧЕРЕЗ ВОДОСЛИВ ПРАКТИЧЕСКОГО ПРОФИЛЯ

Водосливы практического профиля, как известно, характеризуются большим многообразием. В данной работе исследуется водослив практического профиля очертания Кригера–Офицерова, представленный на рис. 5, в и б, в.

Для расчета водослива практического профиля пользуются формулой

$$Q = \sigma_{\Pi} \varepsilon m b \sqrt{2g} H_0^{3/2}, \quad (15)$$

где σ_{Π} – коэффициент подтопления, определяемый по графику $\sigma_{\Pi} = f(h_{\Pi}/H_0)$, имеющемуся в справочной литературе; ε – коэффициент бокового сжатия; m – коэффициент расхода водослива.

Коэффициент расхода m водослива со стенкой практического профиля зависит от размеров и формы поперечного сечения стенки, а также от вели-

чины отношения напора H к профилирующему напору $H_{\text{ПРОФ}}$ ($H_{\text{ПРОФ}}$ – напор, при котором нижняя поверхность тока при истечении через водослив совпадает с нижней гранью водосливной стенки, давление на которой сохраняется атмосферным) и определяется при помощи обобщенной формулы

$$m = m_r \sigma_H \sigma_\Phi, \quad (16)$$

где m_r – приведенный коэффициент расхода, найденный при профилирующем напоре $H_{\text{ПРОФ}}$; σ_H – коэффициент полноты напора, учитывающий изменение m при отклонении напора H от величины $H_{\text{ПРОФ}}$ $\sigma_H = f(H/H_{\text{ПРОФ}}, \alpha_B)$ здесь α_B – угол наклона верховой грани водослива к горизонту; σ_Φ – коэффициент формы, зависящий от α_B , α_H и a/c_B (обозначения понятны из рис. 5, в). В данном случае приведенный коэффициент расхода $m_r = 0,504$, а коэффициент формы – $\sigma_\Phi = 1,0$.

В данной работе изучается истечение воды через неподтопленный водослив без бокового сжатия: $\varepsilon = 1$.

Описание экспериментальной установки

Для изучения истечения воды через водосливы используется экспериментальная установка, схема которой представлена на рис.4.

Для измерения отметок дна, уровней воды, отметки гребня водослива служит измерительная игла, которая перемещается по длине лотка.

Расход воды, поступающей в лоток, определяется ультразвуковым автоматическим расходомером, расположенным на трубопроводе, подающем воду в голову лотка. Для создания и поддержания нужной отметки уровня воды в нижнем бьефе исследуемого водослива используется плоский затвор в конце лотка.

Содержание работы

1. Проведение серии опытов для исследуемых водосливов с измерением отметок свободной поверхности, гребня водослива и дна лотка по длине потока.

2. Обработка опытных данных с целью получения:

а) коэффициента расхода m для неподтопленного водослива практического профиля; б) коэффициента полноты напора σ_H ; в) коэффициента подтопления $\sigma_{\text{П}}$ для подтопленного водослива практического профиля.

3. Сопоставление определенных из опытов коэффициентов с найденными в справочной литературе.

4. Построение по данным опытов картины истечения воды через исследуемые водосливы.

Порядок проведения опытов

1. Пользуясь автоматическим расходомером, определите расход воды Q в лотке.

2. Изменяя открытие затвора, расположенного в конце лотка, создайте такие условия истечения воды через водослив, чтобы он работал как неподтопленный.

3. При помощи измерительной иглы определите следующие отметки:

- а) дна лотка в верхнем бьефе ∇ ДВБ;
- б) уровня воды в верхнем бьефе ∇ УВБ;
- в) гребня водослива ∇ Гр.вод.;
- г) уровня воды на гребне водослива ∇ У Гр.вод.;
- д) свободной поверхности в пределах водосливной грани;
- е) дна лотка в нижнем бьефе ∇ ДНБ;
- ж) уровня воды в нижнем бьефе ∇ УНБ.

Результаты измерений запишите в бланк отчета.

4. Не изменяя расхода, затвором в конце лотка увеличьте глубину в нижнем бьефе до величины, при которой водослив становится подтопленным. Проведите измерение иглой соответствующих отметок свободной поверхности вдоль потока:

- а) уровня воды в верхнем бьефе ∇ УВБ;
- б) уровня воды на гребне водослива ∇ У Гр.вод.;
- в) уровня воды в нижнем бьефе ∇ УНБ.

Примечание. Переход водослива от неподтопленного к подтопленному можно установить таким же образом, как и в работах 2 и 3.

5. Задвижкой II измените величину расхода Q и проведите измерение отметок свободной поверхности для случаев неподтопленного и подтопленного водослива в соответствии с указанной выше методикой проведения опытов.

Обработка экспериментальных данных

1. Вычислите глубину воды в верхнем бьефе изучаемых водосливов

$$h_B = \nabla \text{УВБ} - \nabla \text{ДВБ}.$$

2. Определите площадь живого сечения потока в верхнем бьефе изучаемых водосливов $\omega_{\text{ВБ}} = h_B \cdot b$.

3. Найдите скорость подхода к водосливу $v_0 = Q/\omega_{\text{ВБ}}$ и скоростной напор $v_0^2/2g$.

4. Вычислите геометрический напор на водосливе $H = \nabla_{\text{УВБ}} - \nabla_{\text{Гр.вод.}}$, и полный напор с учетом скорости подхода для водослива практического профиля $H_0 = H + v_0^2/2g$.

5. Найдите коэффициент расхода $m_{\text{оп}}$ для неподтопленного водослива практического профиля по формуле (15) при $\sigma_{\text{п}} = 1$ и $\varepsilon = 1$.

6. Определите коэффициент полноты напора $(\sigma_H)_{\text{оп}}$ для неподтопленного водослива по формуле (16).

7. Установите литературное значение коэффициента полноты напора $(\sigma_H)_{\text{лит}}$ по данным [1, с. 269, табл.13.1] или по данным [2, с. 44, табл. 8.5].

8. Вычислите литературное значение коэффициента расхода $m_{\text{лит}}$ для неподтопленного водослива практического профиля по формуле (16)

$$m_{\text{лит}} = 0,504 \cdot \sigma_{H \text{ лит}} \cdot 1.$$

9. Найдите расхождение в процентах между экспериментальными величинами и величинами, найденными по справочным данным, по формулам

$$\Delta m = \frac{m_{\text{лит}} - m_{\text{оп}}}{m_{\text{оп}}} 100\%; \quad \Delta \sigma_H = \frac{\sigma_{H \text{ лит}} - \sigma_{H \text{ оп}}}{\sigma_{H \text{ оп}}} 100\%,$$

где индексы <лит> и <оп> отвечают величинам, взятым из литературных источников и полученным на основании опытов.

10. На листе миллиметровки в масштабе для одного из расходов покажите картину истечения через изучаемый водослив, при этом очертание водосливной стенки выполните, используя данные [2, глава 8, с. 85-86].

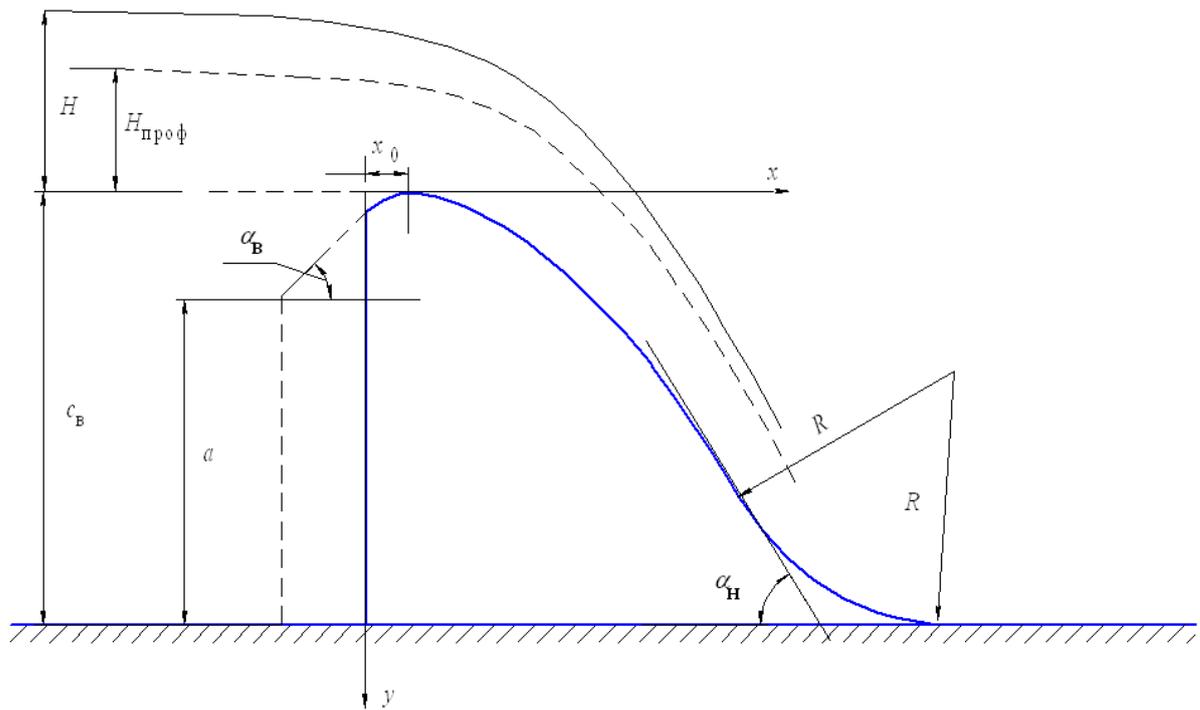


Рис.7. Водосливная стенка очертания Кригера-Офицерова

Т а б л и ц а

Приведенные координаты гребня водосливной стенки

x	y	x	y	x	y	x	y	x	y
0,0	0,126	1,0	0,256	1,8	0,987	2,6	2,122	3,4	3,609
0,3	0,000	1,2	0,394	2,0	1,235	2,8	2,462	3,6	4,031
0,5	0,027	1,4	0,564	2,2	1,508	3,0	2,824	3,8	4,471
0,7	0,100	1,6	0,764	2,4	1,894	3,2	3,207	3,9	4,698

Для построения профиля водослива Кригера–Офицерова (рис. 7) в таблице даны приведенные координаты очертания гребня. Координаты даны для $H_{\text{ПРОФ}}=1,0$. При других величинах $H_{\text{ПРОФ}}$ эти координаты следует умножить на $H_{\text{ПРОФ}}$. Абсцисса x_0 равна $0,3 H_{\text{ПРОФ}}$. Для установленной в лотке водосливной стенки $H_{\text{ПРОФ}}=6\text{см}$, $\alpha_B = 90^0$, $\alpha_H = 60^0$, сопрягающий радиус $R = 10,5\text{см}$ (обозначения приведены на рис.7).

ИЗУЧЕНИЕ ФИЛЬТРАЦИИ В ОСНОВАНИИ ГИДРОТЕХНИЧЕСКОГО СООРУЖЕНИЯ С ПОМОЩЬЮ МЕТОДА ЭГДА

Метод ЭГДА (электродинамической аналогии) основан на математической аналогии между фильтрацией воды в грунте и постоянным электрическим током в проводнике.

Аналогия между величинами, описывающими различные по физической природе явления, легко устанавливается при сопоставлении основных законов фильтрации и электрического тока.

Сравнивая закон Дарси

$$u = -k \frac{dH}{dS}, \quad (17)$$

(здесь u – скорость фильтрации; k – коэффициент фильтрации; S – длина пути фильтрации; H – напор) и закон Ома

$$i = -c \frac{dU}{dS}, \quad (18)$$

(где i – плотность электрического тока; c – коэффициент электропроводности; S – длина проводника; U – электрический потенциал), можно отметить, что скорость фильтрации соответствует плотности электрического тока, напор – электрическому потенциалу, а коэффициент фильтрации – удельной проводимости.

Соответствующие друг другу величины H и U удовлетворяют уравнению Лапласа

$$\frac{\partial^2 H}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 H}{\partial z^2} = 0 \quad \text{и} \quad \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} = 0.$$

Таким образом, если из электропроводного материала создать модель области фильтрации и обеспечить на ее границах соответствующие граничные условия, то распределение электрического потенциала U в этой области дает распределение напора H в области фильтрации. Метод ЭГДА по сути представляет собой экспериментальный метод решения уравнения Лапласа в заданной области (например, представленной на рис.8).

Задачи работы – приобретение практических навыков в изготовлении модели области фильтрации, построении гидродинамической сетки движения грунтовых вод при помощи экспериментального метода ЭГДА и решении по ней практических задач.

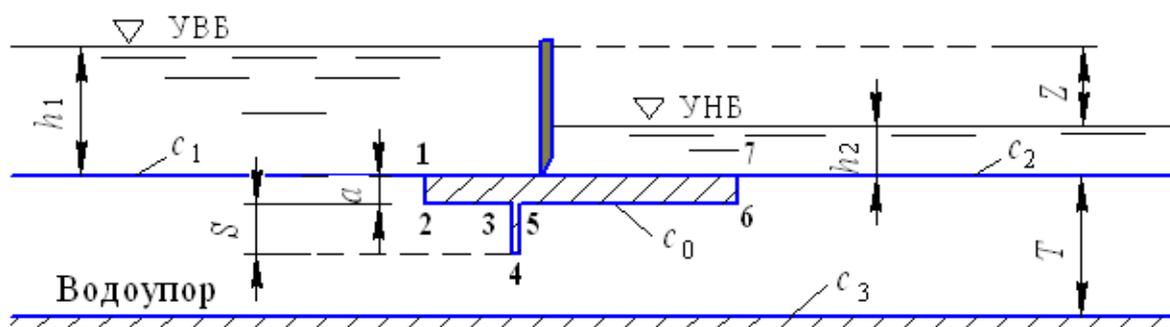


Рис.8. Действительная схема сооружения и области фильтрации

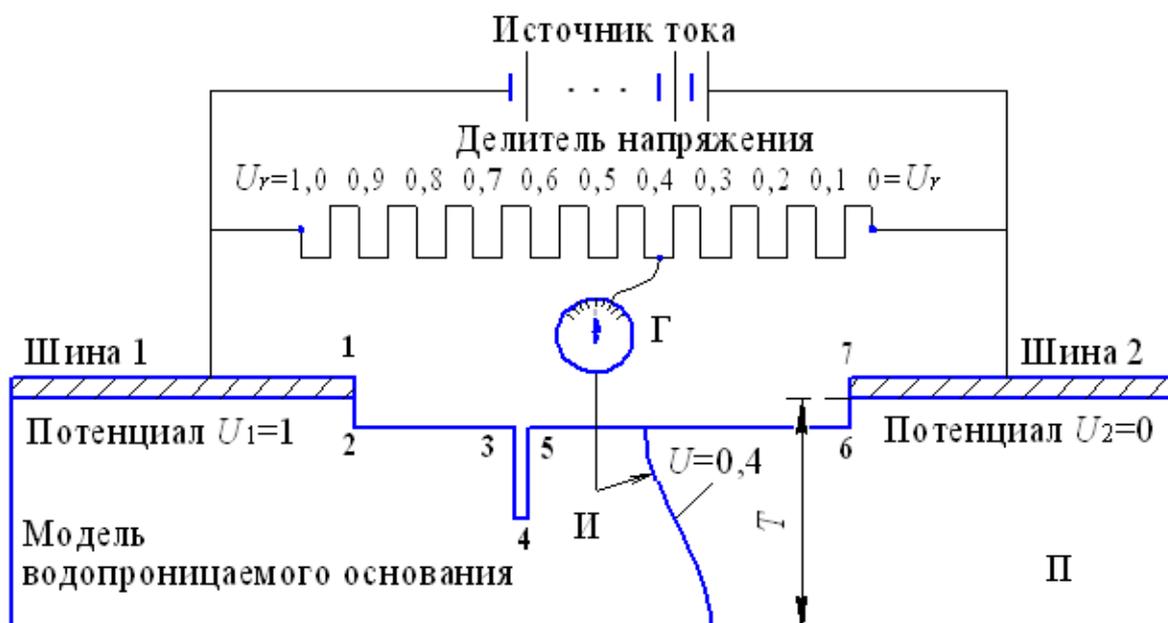


Рис.9. Электрическая схема

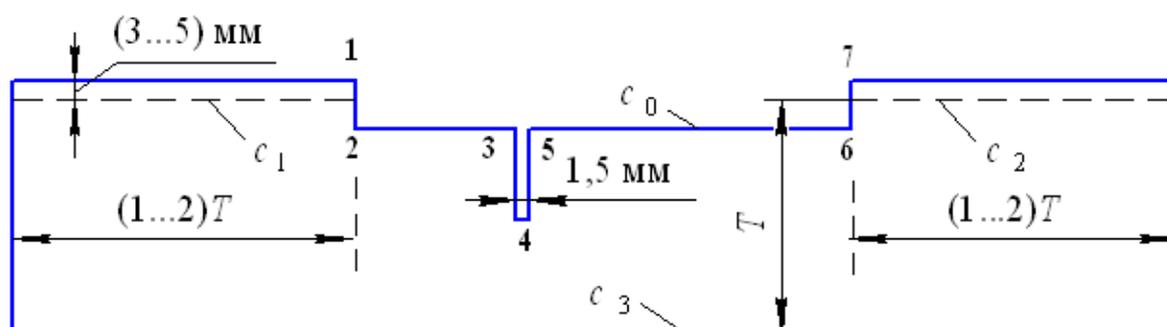


Рис.10. Модель области фильтрации

Описание экспериментальной установки

Для построения по методу ЭГДА гидродинамической сетки движения используют экспериментальную установку (рис. 9), состоящую из:

а) электропроводящей модели (пластины П), геометрически подобной действительной области фильтрации;

б) прибора ЭГДА – электрического устройства, позволяющего устанавливать потенциалы U_1 и U_2 на шинах 1 и 2 и измерять величину электрического потенциала в любой точке модели.

Электрическая схема прибора ЭГДА имеет две цепи: питающую, которая обеспечивает постоянный ток в электропроводящей модели, и измерительную, которая служит для измерения электрических потенциалов в отдельных точках электропроводящей модели.

В питающую цепь входит выпрямитель, подключенный к сети переменного тока через понижающий трансформатор. Напряжение с выпрямителя подается на шины, подключенные к электропроводящей модели. Измерительная цепь, выполненная по схеме мостика Уитстона, включает в себя электропроводящую модель П области фильтрации и потенциометрический делитель напряжения, состоящий из сопротивлений, декады и реохорда измерительного устройства. В диагональ мостика включен гальванометр Г (микроамперметр), соединенный последовательно с измерительной иглой И (щупом), с помощью которых измеряют электрический потенциал в любой точке модели.

Содержание работы

1. Изготовление модели области фильтрации из электропроводной (графитовой) бумаги для заданной схемы подземного контура бетонной плотины.

2. Измерение электрических потенциалов в отдельных точках электропроводящей модели и построение линий равного электрического потенциала.

3. Перенос линий равного потенциала (линий равного напора) с модели на схему сооружения.

4. Построение линий тока.

5. Решение практических задач по гидродинамической сетке:

а) построение эпюры противодавления и определение величины силы противодавления F , действующей на горизонтальные участки подземного контура сооружения со стороны фильтрационного потока, а также установление линии действия силы F для единицы длины плотины;

- б) определение скорости фильтрации на поверхности дна нижнего бьефа и построение эпюры выходных скоростей;
- в) определение максимального выходного пьезометрического уклона (выходного градиента напора) на поверхности дна нижнего бьефа ($J_{\text{ВЫХ}}$)_{МАКС}; г) определение удельного фильтрационного расхода q .

6. Сопоставление величин F , ($J_{\text{ВЫХ}}$)_{МАКС}, q , полученных по методу ЭГДА, с величинами, найденными теоретическим расчетом по методу коэффициентов сопротивления.

Порядок проведения опытов

1. Изготовьте из электропроводной бумаги модель исследуемого водопроницаемого основания, для чего нанесите на лист этой бумаги в выбранном масштабе очертание подземного контура в соответствии с исходными данными. На участках c_1 и c_2 (рис.10) оставьте для зажима в шинах дополнительные полоски электропроводной бумаги шириной 3...5 мм. С учетом этого вырежьте лист электропроводной бумаги по намеченному контуру, а также отрежьте бумагу по линии водоупора c_3 . Шпунт (контур 3-4-5) моделируется в виде выреза соответствующей глубины шириной 1,0 ...1,5 мм.

2. Прикрепите металлические шины 1 и 2 к границам c_1 и c_2 модели, плотно прижимая их к указанным выше дополнительным полоскам бумаги крайними зажимами.

3. Подготовленную модель с шинами подключите к прибору ЭГДА, для чего левую шину (участок c_1) соедините проводом с гнездом 100%, а правую шину (участок c_2) – с гнездом 0% (соединительные провода прикрепите к средним зажимам на шинах). Щуп присоедините к гнезду "игла". Затем включите тумблер "сеть" (при этом шинам 1 и 2 сообщаются потенциалы U_1 и U_2 и загорается контрольная лампочка), а также тумблер "гальванометр".

4. Постройте линии равного электрического потенциала путем измерения электрических потенциалов в отдельных точках электропроводящей модели. Потенциалы измеряйте между линией c_1 , которой отвечает $U=100\%$ (или $U=1$) и линией c_2 , которой отвечает $U=0\%$ (или $U=0$), принимая шаг изменения потенциала $\Delta U=10\%$ (или $\Delta U=0,1$). При этом поступайте следующим образом:

- 1) установите переключатель декад в положение, отвечающее показанию 90% (0,9);
- 2) найдите на электропроводной бумаге ряд точек, имеющих потенциал 90% (0,9), что соответствует показаниям гальванометра равным нулю; первую

точку определите на подземном контуре, а последнюю – на границе модели; соединив эти точки плавной кривой, получите линию равного потенциала со значением 90% (0,9);

3) установите переключатель декад в положение, отвечающее показанию 80% (0,8), и постройте, как было указано в п.2), линию равного потенциала 80% и т.д. Построив линии равного потенциала 90, 80, 70,, 10% (0,9...0,1), получите всего 11 линий (вместе с линиями c_1 и c_2);

4) найдите значения потенциалов в точках перелома подземного контура сооружения. Для приведенного на рис. 8 подземного контура таких точек оказывается пять (2, 3, 4, 5 и 6). Установите острие иглы в рассматриваемую точку на модели, переключатель декад – в положение, соответствующее ближайшей справа линии равного потенциала и, вращая ручку реохорда, добейтесь того, чтобы стрелка гальванометра давала нулевой отсчет; суммируя показания переключателя декад и отсчет по реохорду, найдите искомый потенциал в указанной точке.

Обработка экспериментальных данных

1. Выполните на миллиметровке чертеж заданной схемы сооружения в том же масштабе, что и электропроводящая модель. Перенесите линии равного потенциала с электропроводной бумаги на чертеж сооружения. Эти линии принимают за линии равного приведенного напора ($Hr_1 = 1.0$; $Hr_2 = 0.9$;, $Hr_{11} = 0$).

2. Найдите действительные наименования данных линий по формуле

$$H = h_2 + Z \cdot Hr_i, \quad (19)$$

где h_2 – глубина воды в нижнем бьефе; Hr_i – приведенный напор; Z – действительный напор на сооружении, $Z = h_1 - h_2$. По этой же формуле найдите действительные напоры в точках перелома подземного контура (2, 3, 4, 5 и 6).

3. Постройте графически линии тока, проводя их так, чтобы они при пересечении с линиями равного напора образовывали ортогональную и квадратичную сетку (рис.11). Для выполнения этого условия положение линий тока может уточняться в ходе построения сетки движения.

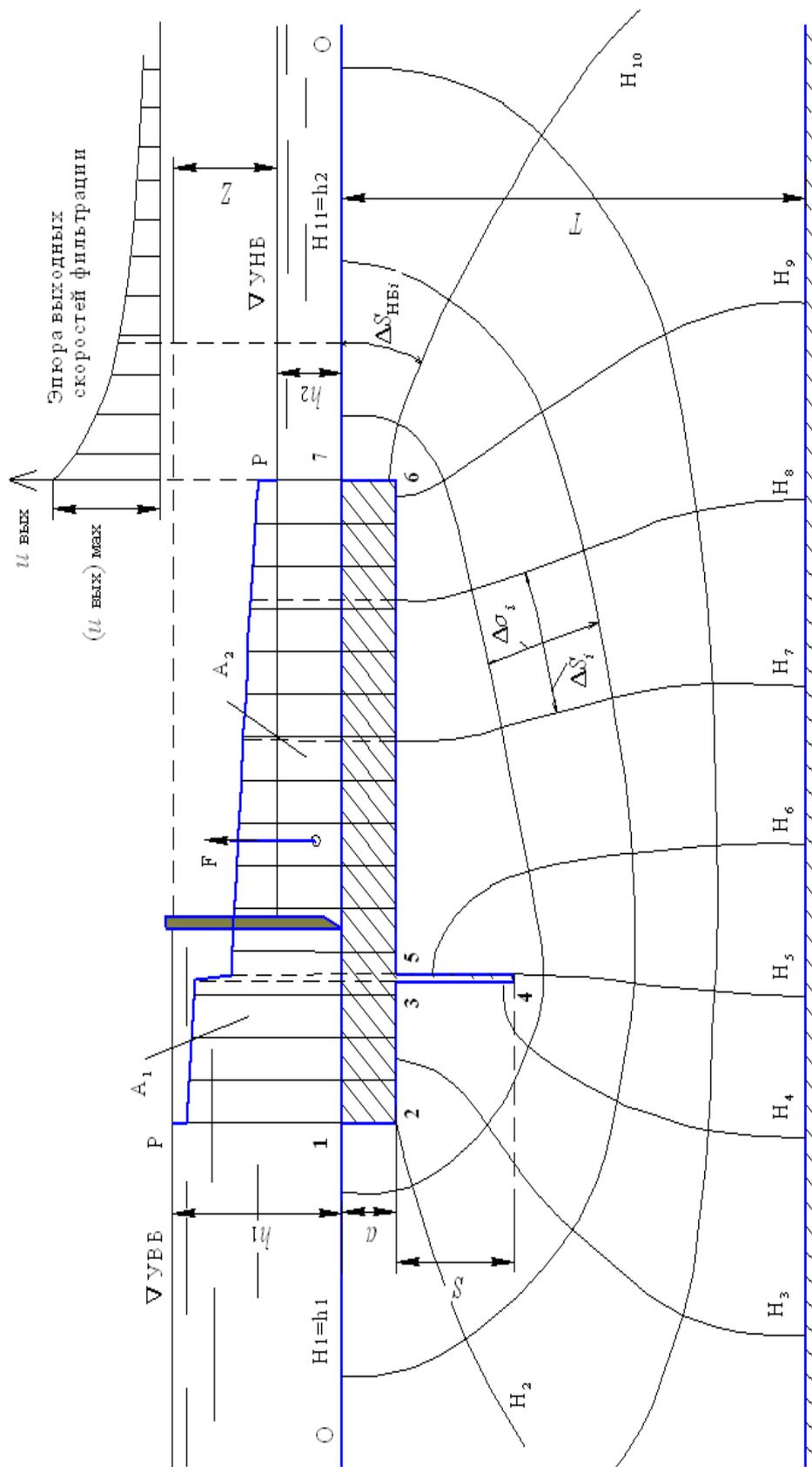


Рис. 11. Гидродинамическая сетка. Эпюры противодавления и выходных скоростей фильтрации

4. Постройте эпюру противодействия, действующего на подошву плотины. Эпюра противодействия строится в следующей последовательности.

Из каждой точки основания сооружения, к которой подходит линия равного напора, проведите вертикальные линии и от плоскости сравнения О-О (см. рис.11) отложите на них численное значение напора, соответствующее данной линии (в масштабе). Соединив концы вертикальных отрезков ломаной линией, получите эпюру противодействия, ограниченную сверху построенной пьезометрической линией, снизу водонепроницаемой поверхностью флютбета, а с боковых сторон – вертикалями, проведенными из крайних точек подземного контура до свободной поверхности соответственно верхнего и нижнего бьефов (эпюра показана на рис.11 вертикальной штриховкой).

5. Определите силу противодействия F , действующую на подошву плотины, для одной единицы длины плотины по формуле

$$F = (A_1 + A_2) \gamma b,$$

где A_1 и A_2 – площади участков I и II эпюры противодействия; γ – удельный вес воды; b – размер, перпендикулярный плоскости чертежа ($b=1,0$ м). Линию действия силы противодействия F установите графически, определив центр тяжести эпюры противодействия.

6. Вычислите величины выходных скоростей фильтрации. Для этого на поверхности дна нижнего бьефа наметьте ряд точек. По чертежу с учетом масштаба найдите расстояние $\Delta S_{\text{НБ}}$ между линиями равного напора $H_{11} = h_2$ и H_{10} . Вычислите пьезометрические уклоны в намеченных точках линии дна нижнего бьефа

$$J_{\text{ВЫХ}} = (H_{10} - H_{11}) / \Delta S_{\text{НБ}}$$

и найдите скорости фильтрации в них по формуле Дарси

$$u_{\text{ВЫХ}} = k \cdot J_{\text{ВЫХ}},$$

где величина коэффициента фильтрации k задана.

7. Постройте эпюру скоростей фильтрации на поверхности дна нижнего бьефа. При построении эпюры найденные значения $u_{\text{ВЫХ}}$ в масштабе отложите по вертикалям, проходящим через соответствующие точки дна нижнего бьефа (см. график в верхней правой части рис.11).

8. Определите удельный фильтрационный расход q . Для этого выберите участок области фильтрации, ограниченный двумя соседними линиями равного напора сравнительно малой кривизны (например, H_7 и H_8 на рис.11), которые, начинаясь на подземном контуре, заканчиваются на водоупоре. Для каждого отсека грунта, образованного линиями равного напора и линиями тока, определите по чертежу (в масштабе) длину ΔS_i вспомогательной линии

тока, проведенной через центр отсека и ограниченной линиями равного напора. Определите средний пьезометрический уклон для каждого отсека грунта $J_i = (H_7 - H_8) / \Delta S_i$. Зная J_i , вычислите скорость фильтрации для данного отсека грунта $u_i = k \cdot J_i$. По чертежу найдите ширину каждого отсека грунта, т.е. длину отрезка $\Delta \sigma_i$ линии равного напора, проходящей через центр отсека, ограниченного соседними линиями тока. Определите удельный фильтрационный расход для данного отсека грунта $\delta q_i = u_i \cdot \Delta \sigma_i$ и вычислите полный удельный фильтрационный расход q как сумму величин δq_i для всех отсеков грунта $q = \sum_{i=1}^n \delta q_i$ между выбранными линиями равного напора (от подземного контура до водоупора).

9. Сопоставьте величины F , $(J_{\text{ВЫХ}})_{\text{МАКС}}$ и q , определенные экспериментально, с соответствующими величинами, найденными теоретически методом коэффициентов сопротивления. Расхождение в процентах между экспериментальными значениями и значениями, определенными теоретическим расчетом, подсчитайте по зависимостям

$$\Delta F = \frac{F_{\text{ТЕОР}} - F_{\text{ОП}}}{F_{\text{ОП}}} \cdot 100\%;$$

$$\Delta (J_{\text{ВЫХ}})_{\text{МАКС}} = \frac{(J_{\text{ВЫХ}})_{\text{МАКС ТЕОР}} - (J_{\text{ВЫХ}})_{\text{МАКС ОП}}}{(J_{\text{ВЫХ}})_{\text{МАКС ОП}}} \cdot 100\%;$$

$$\Delta q = \frac{q_{\text{ТЕОР}} - q_{\text{ОП}}}{q_{\text{ОП}}} \cdot 100\%.$$

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Гиргидов А.Д.** Механика жидкости и газа (гидравлика): учебник для вузов / А.Д. Гиргидов. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2007. – 545 с.
2. **Кожевникова Е.Н.** Механика жидкости и газа (гидравлика): справочник / Е.Н. Кожевникова, А.И. Лаксберг, Е.А. Локтионова, М.Р. Петриченко. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2007. – 90 с.
3. **Орлов В.Т.** Фильтрация воды в гидротехнических сооружениях. СПб.: Изд. СПбГТУ, 1994. – 92 с.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	2
<i>Лабораторная работа 1.</i> Изучение гидравлического прыжка и послепрыжкового участка	3
<i>Лабораторная работа 2.</i> Изучение истечения воды через водослив с тонкой стенкой.....	11
<i>Лабораторная работа 3.</i> Изучение истечения воды через водослив с широким порогом.....	17
<i>Лабораторная работа 4.</i> Изучение истечения воды через водослив практического профиля.....	20
<i>Лабораторная работа 5.</i> Изучение фильтрации в основании гидротехнического сооружения методом ЭГДА.....	25
Библиографический список	32