

**МИНИСТЕРСТВО ТРАНСПОРТА И КОММУНИКАЦИЙ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ
УЧРЕЖДЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ТРАНСПОРТА»**

Кафедра «Экология и энергоэффективность в техносфере»

Р. Н. ВОСТРОВА, В. М. ЛАЗЕЕВ

ГИДРАВЛИКА ОТКРЫТОГО РУСЛА

Лабораторный практикум

Гомель 2016

МИНИСТЕРСТВО ТРАНСПОРТА И КОММУНИКАЦИЙ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ
УЧРЕЖДЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ТРАНСПОРТА»

Кафедра «Экология и энергоэффективность в техносфере»

Р. Н. ВОСТРОВА, В. М. ЛАЗЕЕВ

ГИДРАВЛИКА ОТКРЫТОГО РУСЛА

*Одобрено учебно-методической комиссией строительного
и методической комиссией заочного факультетов
в качестве лабораторного практикума для студентов
строительных специальностей*

Гомель 2016

УДК 556.556(076.5)
ББК 30.123
В78

Рецензент – заведующий кафедрой «Энергоэффективные технологии на транспорте» канд. техн. наук, доцент *В. М. Овчинников* (УО «БелГУТ»).

Вострова, Р. Н.

В78 Гидравлика открытого русла : лаб. практ. / Р. Н. Вострова, В. М. Лазеев ; М-во трансп. и коммуникаций Респ. Беларусь, Белорус. гос. ун-т трансп. – Гомель : БелГУТ, 2016. – 38 с.
ISBN 978-985-554-500-3

Рассмотрены теоретические вопросы, связанные с выполнением лабораторных работ по гидравлике открытого русла, дано описание экспериментальных установок, приведены порядок проведения опытов и обработки экспериментальных данных.

Предназначен для студентов, обучающихся по строительным специальностям.

УДК 556.556(076.5)
ББК 30.123

ISBN 978-985-554-500-3

© Вострова Р.Н., Лазеев В. М, 2016
© Оформление. УО «БелГУТ», 2016

ИНСТРУКЦИЯ
по охране труда для студентов,
выполняющих лабораторные и практические работы
на кафедре «Экология и энергоэффективность в техносфере»

Общие требования безопасности

1 К выполнению лабораторных работ в учебных аудиториях кафедры «Экология и энергоэффективность в техносфере» допускаются лица, прошедшие инструктаж по охране труда и ознакомившиеся с мерами безопасности при выполнении лабораторных работ.

2 При нахождении в учебных лабораториях кафедры и выполнении лабораторных работ студенты обязаны соблюдать правила внутреннего трудового распорядка. Не допускается курение в учебных лабораториях кафедры.

3 Приборы и оборудование должны содержаться в исправном состоянии, сохранности и чистоте.

4 Студенты должны немедленно сообщать преподавателю о замеченных неисправностях и нарушениях правил техники безопасности и пожарной безопасности.

5 Студенты, выполняющие лабораторные и практические работы, должны уметь оказывать первую помощь пострадавшим.

6 Лица, нарушающие требования настоящей инструкции и требования безопасности при выполнении лабораторных работ, отстраняются от выполнения работ и привлекаются к ответственности в соответствии с правилами внутреннего распорядка БелГУТа.

Требования безопасности перед началом работ

1 Перед началом выполнения лабораторных работ студенты должны ознакомиться с методическими указаниями, порядком выполнения работ и мерами безопасности.

2 После проверки состояния оборудования и приборов доложить об этом преподавателю.

3 С рабочего места должны быть убраны все ненужные и лишние предметы. Рабочее место должно быть удобно для обслуживания, проходы вокруг рабочего места должны быть свободными.

4 Приборы необходимо располагать так, чтобы было удобно производить необходимые переключения и выполнять наблюдения.

Требования безопасности при выполнении работ

1 Включение приборов и экспериментальных установок производится после проверки преподавателем правильности сборки и подключения их к сети. Переключатели приборов при измерениях должны находиться в положениях, соответствующих режимам измерений.

2 Во избежание несчастных случаев запрещается выполнение работ, непредусмотренных тематикой занятий.

3 Не допускается:

- производить какие-либо переключения, не предусмотренные порядком выполнения работ, в приборах, находящихся под напряжением.

- проходить к рабочим местам, где выполняются другие работы, ходить по лаборатории и оставлять без наблюдения свое рабочее место.

- выполнять лабораторные работы одному студенту.

Требования безопасности в аварийных ситуациях

1 К аварийным ситуациям могут привести:

- неисправность оборудования и приборов;

- нарушение: изоляции токоведущих частей; порядка переключения приборов в рабочем режиме; правил пожарной безопасности.

2 При возникновении аварийных ситуаций студенты должны немедленно сообщать преподавателю и принять меры к ликвидации их последствий.

В случае возникновения пожара необходимо немедленно сообщить по тел. 101 и руководству кафедры и университета. Принять меры по ликвидации очага возгорания средствами пожаротушения.

Во избежание поражения электрическим током запрещается тушение оборудования и приборов, находящихся под напряжением, химическими пенными огнетушителями.

3 В случае необходимости нужно оказать первую медицинскую помощь пострадавшему. Аптечка с медикаментами находится в помещении лаборатории.

Требование безопасности по окончании работ

1 По окончании лабораторных работ необходимо отключить приборы и лабораторное оборудование от электрической сети.

2 После окончания работы следует привести в порядок свое рабочее место и доложить об этом преподавателю. Необходимо также доложить о недостатках, обнаруженных при выполнении работ.

ОБЩИЕ УКАЗАНИЯ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ

Выполнение лабораторных работ при изучении гидравлики должно способствовать более глубокому пониманию студентами физической сущности изучаемых гидравлических явлений, упрочению связи теории с экспериментами, а также приобретению навыков в научных исследованиях и в работе с научно-технической и справочной литературой.

К выполнению лабораторных работ допускаются студенты, предварительно ознакомившиеся с техникой безопасности и охраной труда, ее основным содержанием по методическим указаниям и рекомендуемой литературе. Уровень теоретической подготовки перед проведением лабораторной работы проверяется устным опросом.

Каждая работа содержит:

а) вводную часть, где в сжатой форме изложены сведения общего характера и основные теоретические положения, имеющие самое прямое отношение к рассматриваемым вопросам;

б) цель работы;

в) схему установки;

г) порядок выполнения работы и детально разработанные таблицы для упрощения и удобства обработки опытных данных;

д) основные контрольные вопросы, позволяющие студентам целенаправленно готовиться к защите отчета по каждой работе;

е) рекомендуемые литературные источники (их названия и другие сведения о них даны в списке литературы).

Экспериментальная часть работы проводится с разрешения преподавателя или технического персонала кафедры после ознакомления с лабораторной установкой «Открытый поток», измерительными приборами и методикой проведения опытов.

Отчет по каждой лабораторной работе выполняется студентом на специальном типографском бланке чернилами (пастой) и должен быть подписан им с указанием даты проведения лабораторной работы

В начале следующего лабораторного занятия студент сдает преподавателю законченный отчет по выполненной работе, без чего он не допускается к дальнейшим практическим занятиям.

Отчет по каждой лабораторной работе должен быть защищен студентом в установленные сроки. Студенты, не получившие зачет по лабораторным работам в часы, отведенные расписанием, должны получить его в дополнительное время на консультации. Студенты, пропустившие занятие в лаборатории, выполняют работу согласно графику, утвержденному заведующим кафедрой.

Лабораторная работа №1

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ФИЛЬТРАЦИИ ЛАБОРАТОРНЫМ СПОСОБОМ

Цель работы:

- ознакомиться с устройством установки Дарси;
- приобрести навыки измерения пьезометрических высот и расчета коэффициента фильтрации.

Краткие сведения из теории

Начало изучения законов фильтрации подземных вод в горных породах относится к 1856 г., когда французский гидравлик Анри Дарси выполнил ряд экспериментов по фильтрации воды в пористых средах.

Под фильтрацией понимают движение воды в пористом пространстве грунта. Знание законов фильтрации необходимо при проектировании, строительстве и эксплуатации производственных, жилых и общественных зданий и сооружений, для определения притока грунтовой воды к котлованам строящихся зданий, дренажным и водозаборным устройствам, для расчётов осадки фундаментов и вычисления потерь воды через земляные плотины и дамбы.

Движение грунтовых вод так же, как и открытых потоков, может быть установившимся и не установившимся, равномерным и неравномерным, напорным и безнапорным. Режим движения грунтовых вод может быть ламинарным и турбулентным.

В работе рассматривается установившаяся напорная фильтрация при ламинарном режиме, описываемая законом Дарси, выражение которого можно представить в двух видах:

$$v = kJ \quad (1.1)$$

и

$$Q = \omega kJ. \quad (1.2)$$

Здесь v – скорость фильтрации,

$$v = \frac{Q}{\omega}, \quad (1.3)$$

где Q – действительный (фактический) фильтрационный расход;

ω – площадь поперечного сечения фильтрационного потока, складывающаяся из суммарной площади сечения пор ($\omega_{\text{пор}}$) и частиц скелета грунта ($\omega_{\text{ск}}$), т.е. $\omega = \omega_{\text{пор}} + \omega_{\text{ск}}$;

k – коэффициент фильтрации (коэффициент Дарси), м/с или м/сут.

Величину k определяют опытным путём (при постоянной температуре фильтрующей жидкости). Для проверки правильности результата можно взять величину коэффициента Дарси в справочной литературе [3, 4]. Величины коэффициента фильтрации грунтов даются при температуре $t = 10$ °С.

Для перехода от величины коэффициента k_t , полученной при температуре t , отличной от 10 °С, к величине его при 10 °С применяется формула

$$k_{10} = \frac{k_t}{\tau}, \quad (1.4)$$

где τ – температурная поправка, вычисляемая по эмпирической формуле [2]

$$\tau = 0,7 + 0,03t; \quad (1.5)$$

J – градиент (потеря) напора – отношение разности полных напоров $H_1 - H_2 = h_{1-2}$ в двух точках грунтового потока, лежащих на одной линии потока, к расстоянию между ними l_{1-2} , измеряемому по этой линии, т.е.

$$J_{1-2} = \frac{H_1 - H_2}{l_{1-2}} = \frac{h_{1-2}}{l_{1-2}}. \quad (1.6)$$

Экспериментально доказано, что скорость фильтрации пропорциональна градиенту напора.

Скорость движения жидкости в порах грунта

$$v_d = \frac{Q}{\omega_{\text{пор}}}. \quad (1.7)$$

Скорости v_d и v связаны между собой отношением

$$v_d = \frac{v}{n}, \quad (1.8)$$

где $n = \omega_{\text{пор}} / \omega$ – коэффициент пористости грунта.

Описание экспериментальной установки

Установка (рисунок 1) представляет собой вертикально расположенный цилиндр I с внутренним размером диаметра 15 см, заполненный гравием различной крупности ($d = 2,0 \dots 5,0$ мм). Толщина слоя – 15 см. На границах расположения гравийной засыпки 4 имеются штуцеры, к которым через резиновые шланги подсоединены стеклянные пьезометры 2 и 7 для измерения напоров.

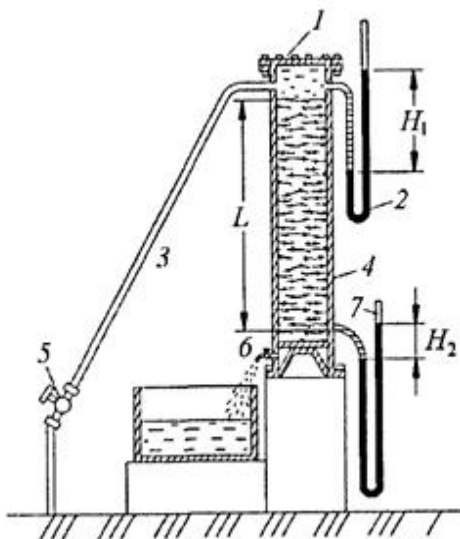


Рисунок 1 – Экспериментальная установка цилиндра Дарси

Вода в цилиндр поступает из системы водопровода 5 по трубе 3. Внизу цилиндра, через отверстие 6 вода вытекает в мерный резервуар, с помощью которого можно определить объем W , м³, поступающий в единицу времени t , с. Время измеряется секундомером, температура воды – термометром.

Порядок проведения опытов и обработка опытных данных

1 Сущность опыта сводится к определению расхода воды Q , профильтровавшейся через фильтр на участке L , и напоров H_1 и H_2 на границах участка фильтрации:

$$Q = W/t,$$

где Q – количество фильтрующей воды (расход) в единицу времени, см³/с, м³/сут;

W – объем жидкости в мерном резервуаре, м³;

t – время заполнения резервуара, с.

2 Определить скорость движения воды по формуле (1.3).

3 Определить скорость движения фильтрационного потока v_d по формуле (1.9), принимая коэффициент пористости гравия $n = 0,3 \dots 0,4$ [1, 3, 4].

4 Определить разницу уровней в показаниях пьезометров $H_1 - H_2$.

5 Определить пьезометрический уклон J_{1-2} по формуле (1.6).

6 Решить уравнение Дарси относительно коэффициента Дарси

$$k = v / J.$$

7 Проверить результат эксперимента по определению коэффициента Дарси со справочными данными, полученными с применением формулы (1.4):

$$kt_t = k_{10} \tau.$$

8 Внести результаты эксперимента в таблицу 1.1.

9 Начертить график $v = f(J)$.

10 Написать заключение по результатам работы.

Таблица 1.1 – Результаты эксперимента по определению коэффициента Дарси

Наименование и обозначение измеряемых величин		1	2	3	4	5
Напоры (отметки уровней воды в пьезометрах), м $H_i = z_i + p_i / \rho g$	H_1					
	H_2					
Объем профильтровавшей воды W , м ³						
Расстояние между точками установки пьезометров l , м						
Продолжительность фильтрации t , с						
Температура воды t , °С						
Коэффициент фильтрации k , м/с						

Контрольные вопросы

- 1 Напишите и поясните закон Дарси.
- 2 Напишите зависимость, связывающую скорость фильтрации с действительной средней скоростью движения жидкости в порах грунта.
- 3 Изобразите график $v = f(J)$.
- 4 Сформулируйте понятие пьезометрического уклона и поясните, как определяется его величина.
- 5 Объясните, почему величина коэффициента фильтрации грунта зависит от температуры фильтрующей жидкости.

Лабораторная работа №2

ОЦЕНКА ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ПОТОКА, ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФОРМ ЛИНИЙ СВОБОДНОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Цель работы:

- определить нормальную и критическую глубину потока;
- построить гидравлические оси;
- оценить энергетическое состояние потока;
- определить форму кривых свободной поверхности потока по данным измерения его глубин;
- проверить соответствие найденных опытным путем форм кривых свободной поверхности теоретическим.

Краткие сведения из теории

Как правило, в открытых руслах наблюдается неравномерное движение воды. Любая преграда в русле, изменение уклона дна, неровности дна и нарушают равномерное движение и обуславливают переход его в неравномерное. В призматических руслах с уклонами дна $i \leq 0$ и в непризматических руслах равномерное движение физически невозможно.

При неравномерном движении по длине потока наблюдается или изменение средней скорости течения, или перераспределение скоростей по живому сечению, что обуславливает появление сил инерции и нарушает равновесие сил, действующих в потоке. Глубина потока h при неравномерном движении обычно изменяется вдоль русла.

Основное дифференциальное уравнение установившегося неравномерного плавно изменяющегося движения жидкости в призматическом русле любой правильной формы имеет вид

$$\frac{dh}{dl} = \frac{i - \frac{Q^2}{K^2}}{1 - \frac{Q^2 B}{g\omega^3}} \quad (2.1)$$

где dh – бесконечно малое изменение глубины потока на бесконечно малом пути его dl , м;

i – уклон дна русла;

Q – расход протекающей жидкости, м³/с;

K – модуль расхода в рассматриваемом сечении потока глубиной h , м³/с,

$$K = \omega C \sqrt{R}. \quad (2.2)$$

На основе анализа уравнения (2.1) исследуются кривые свободной поверхности потока, а его интегрирование дает возможность рассчитывать и строить кривые свободной поверхности в призматических руслах любой правильной формы.

При оценке энергетического состояния потока и исследовании кривых свободной поверхности в призматических руслах используются понятия нормальной и критической глубин, а также критического уклона дна русла.

Нормальной глубиной h_0 называется глубина наполнения призматического русла с положительным (прямым) уклоном дна, при которой пропуск расхода осуществляется при равномерном движении. При рассмотрении неравномерного движения под нормальной глубиной понимается воображаемая глубина наполнения, которая установилась бы в русле, если движение было равномерным.

Нормальную глубину определяют с помощью уравнения Шези

$$Q = \omega C \sqrt{Ri}, \quad (2.3)$$

где Q – расход воды, м³/с;

ω – площадь живого сечения потока, м²;

C – коэффициент Шези, м^{0,5}/с;

R – гидравлический радиус, представляющий собой отношение площади живого сечения ω к смоченному периметру χ , м, т.е.

$$R = \omega / \chi; \quad (2.4)$$

$i = \sin \theta$ – продольный уклон дна русла, равный гидравлическому уклону, а также и пьезометрическому (уклону свободной поверхности потока).

Тогда h_0 найдем из условия

$$\frac{Q}{\sqrt{i}} = \omega C \sqrt{R}. \quad (2.5)$$

Нормальная глубина h_0 зависит от уклона дна i и коэффициента шероховатости n русла.

Критической глубиной h_k называется глубина, отвечающая минимальному значению удельной энергии сечения. Последняя представляет собой полную удельную энергию в данном сечении безнапорного потока, отсчитываемую от плоскости сравнения, проходящей через наинизшую точку живого сечения.

Критическая глубина h_k для призматического русла любой правильной формы определяется из основного уравнения критического состояния потока:

$$\frac{\omega_k^3}{B_k} = \frac{\alpha Q^2}{g}, \quad (2.6)$$

где α , ω_k – коэффициент Кориолиса, площадь живого сечения, м²,

B_k – ширина потока поверху, отвечающая критической глубине, м.

Критическая глубина зависит от расхода и формы русла, но (в отличие от нормальной) не зависит ни от уклона дна русла ни от его шероховатости. В случае прямоугольного русла критическая глубина определяется по формуле, полученной из уравнения (2.6):

$$h_k = \sqrt[3]{\frac{\alpha q^2}{g}}, \quad (2.7)$$

где $q = Q/B$ – удельный расход воды (расход, приходящийся на единицу ширины русла), м²/с.

При заданном расходе в призматическом русле, для которого $\omega = f(h)$, удельная энергия сечения является функцией только глубины потока, т. е. $\mathcal{E} = f(h)$.

График энергии изображен на рисунке 2.1 [2], из которого видно, что одному и тому же значению \mathcal{E} могут соответствовать два различных значения глубины потока h , одно из которых больше критической глубины, а другое – меньше критической глубины.

Если глубина потока больше критической ($h > h_k$), поток находится в спокойном состоянии. В этом случае кинетическая энергия потока мала, по сравнению с потенциальной, поэтому параметр кинетичности $П_k$ (число Фруда Fr_h , вычисленное через среднюю глубину $h = \omega / B$) меньше единицы.

При спокойном состоянии потока удельная энергия сечения с увеличением глубины потока возрастает.

Если глубина потока меньше критической ($h < h_k$), поток находится в бурном состоянии. В этом случае удельная энергия сечения с ростом глубины потока убывает.

Если $h = h_k$, поток находится в критическом состоянии, при этом удельная энергия сечения \mathcal{E} принимает минимальное значение.

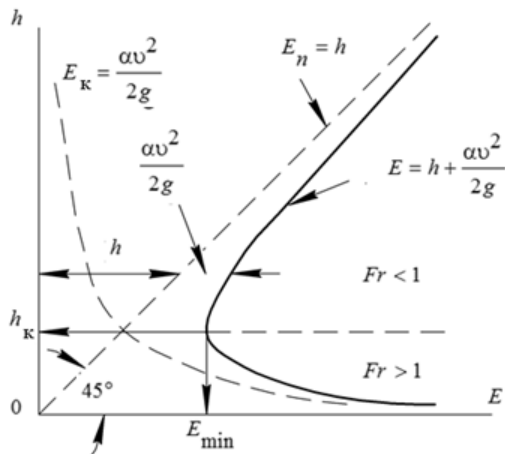


Рисунок 2.1 – График удельной энергии сечения

Таким образом, используя понятие критической глубины, можно классифицировать потоки по их энергетическому состоянию.

Критическим уклоном i_k называется такой уклон дна призматического русла, при котором заданный расход пропускается при нормальной глубине, равной критической, т. е. при $h_0 = h_k$. Поэтому величину критического уклона находят из формулы Шези.

$$i_k = \frac{Q^2}{\omega_k C_k^2 R_k} \quad (2.8)$$

Критический уклон может быть вычислен для любого призматического русла, независимо от того, имеет ли это русло уклон дна $i < 0$ или $i > 0$.

Если $i < i_k$, нормальная глубина больше критической ($h_0 > h_k$). Если же $i > i_k$, то $h_0 < h_k$. При $i = i_k$ $h_0 = h_k$.

При исследовании кривой свободной поверхности на чертеж наносятся гидравлические оси: линии дна, линии нормальной глубины ($N - N$) и критической глубины ($K - K$).

Эти линии в зависимости от уклона дна русла могут занимать различное положение относительно друг друга (рисунок 2.2) [2]: при $i < i_k$ линия $N - N$ расположена выше линии $K - K$; при $i > i_k$ линия $N - N$ расположена ниже линии $K - K$; при $i = i_k$ линии $N - N$ и $K - K$ сливаются.

В руслах с горизонтальным дном ($i = 0$) и с обратным уклоном дна ($i < 0$) уравнение равномерного движения теряет физический смысл, следовательно, не имеет физического смысла и понятие о нормальной глубине. Критическая же глубина и в этих случаях сохраняет свое значение, так как не зависит от уклона дна. Поэтому при уклоне дна $i \leq 0$ имеет только линию $K - K$.

Линии $N - N$ и $K - K$ разбивают всю возможную область движения при уклоне дна русла $i > i_k$ и $i < i_k$ на три зоны («а», «в», «с»), при $i = i_k$ – на две («а» и «с»). При $i \leq 0$ линия $K - K$ разделяет две зоны («в» и «с»).

Зона «а» – зона, где глубины потока h больше и нормальной h_0 и критической h_k , т. е. $h_k < h < h_0$ (эта зона существует только в руслах с прямым уклоном дна).

Зона «в» – зона, где глубины потока h находятся в пределах между нормальной и критической глубинами. При этом, когда $i < i_k$, $h_k < h < h_0$; если же $i > i_k$, $h_k > h > h_0$.

Зона «с» – зона, где глубины потока h меньше и нормальной, и критической глубины, т. е. $h_k > h < h_0$.

Из рисунка 2.2 видно, что зоны «а» и «с» – это зоны кривых подпора. Следовательно, если кривая свободной поверхности потока располагается в любой из этих зон, глубина потока вниз по течению возрастает.

Зона «в» – это зона кривых спада. При расположении кривых свободной поверхности в этой зоне глубина потока вниз по течению уменьшается.

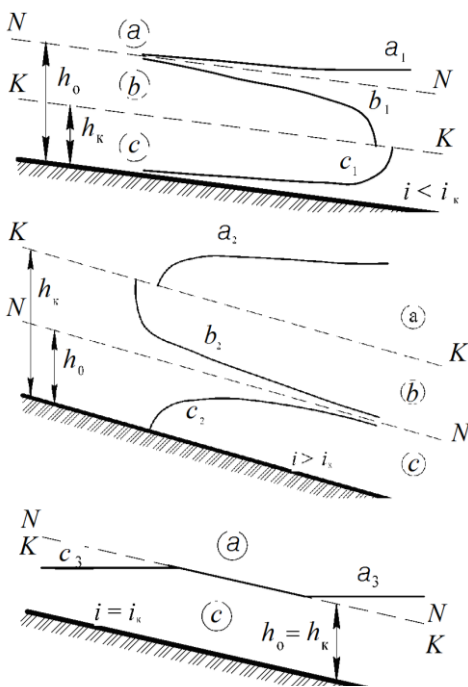


Рисунок 2.2 – Кривые свободной поверхности потока

Описание экспериментальной установки

Опытная установка «Открытый поток» (рисунок 2.3) представляет собой остекленный лоток 1 прямоугольного сечения с переменным уклоном дна, питательный бак 5. Циркуляция воды в установке обеспечивается насосом 4. Расход воды регулируется задвижкой 3.

Создание в лотке потока с различными формами кривых свободной поверхности осуществляется путем изменения расхода задвижкой 3 и плоским затвором 6. Для измерения расхода используется расходомер 2. Глубины потока определяются с помощью мерной иглы или по шкале, нанесенной на стенку остекленного лотка. Местоположение сечений потока определяется также по шкале на стенке лотка.

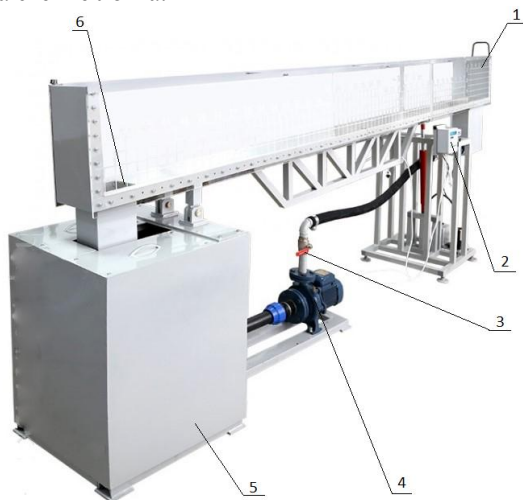


Рисунок 2.3 – Лабораторная установка «Открытый поток»

Порядок проведения опытов

1 При уклоне дна лотка $i = 0$ включить центробежный насос 4, открыть полностью задвижку 3 и затвор 6. Затем определить расход при помощи расходомера 2 (см. рисунок 2.3).

2 Для найденного расхода Q и известной ширины лотка B вычислить по формуле (2.7) критическую глубину h_k , а по формуле (2.8) – критический уклон i_k .

3 Отметить на стенке лотка положение линии критической глубины $K - K$, ориентируясь на неё, отрегулировать открытия затворов так, чтобы глубины потока в лотке были меньше критической, после чего измерить глубины потока не менее чем в пяти-шести сечениях по шкале на стенке лотка. Результаты измерений и вычислений записать в таблицу 2.1.

4 Далее затворами создать в лотке поток с глубинами h больше критической глубины h_k , произвести измерения глубин и расстояний, как и в предыдущем опыте, и занести полученные данные в таблицу 2.1.

5 Не изменяя расхода, создать прямой уклон дна русла ($i > 0$). Вычислить для этого уклона дна нормальную глубину h_0 из формулы (2.2). Затем выполнить еще два опыта (3-й и 4-й), аналогичные предыдущим, причем в третьем опыте глубины потока h должны быть больше нормальной h_0 , а в четвертом – меньше нормальной, но в обоих случаях больше критической, т. е. $h_0 > h > h_k$.

6 Результаты измерений и вычислений представить в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Результаты эксперимента по определению энергетического состояния потока

Наименование измеряемых и вычисляемых величин	Численные значения величин			
	№ опыта			
	1	2	3	4
Расход воды Q , м ³ /с				
Ширина лотка B , м				
Критическая глубина h_k , м				
Критический уклон i_k				
Нормальная глубина (с помощью формулы Шези) h_0 , м				
Глубина потока в произвольном сечении h , м				
Соотношение между глубинами h , h_0 и h_k				
Энергетическое состояние потока (спокойное, бурное, критическое)				
Угол дна лотка: $>0, =0, <0$				
Глубины потока h в сечении, м				

Обработка экспериментальных данных

1 Определение энергетического состояния потока:

- определить расход потока опытным путем для горизонтального дна прямого и обратного уклонов дна;
- определить нормальную и критическую глубину для каждого случая уклона дна.

2 Исследование формы кривой свободной поверхности потока:

- установить энергетическое состояние потока (по соотношению между известными глубинами h и h_k); если $h > h_k$, поток в спокойном состоянии, в противном случае – в бурном;

– выяснить, будет ли кривая свободной поверхности кривой спада или кривой подпора (для этого достаточно, исходя из соотношения между глубинами h , h_0 и h_k или между h и h_k , определить знак производной dh/dl в уравнении (2.1); если $dh/dl > 0$, т. е. имеет знак «плюс», кривая свободной поверхности представляет собой кривую подпора; в противном случае – кривую спада;

– выяснить, убывает или возрастает удельная энергия сечения \mathcal{E} по пути движения потока [с помощью графика $\mathcal{E} = f(h)$].

– установить форму (кривизну) кривой свободной поверхности [для этого необходимо выяснить, к чему стремится dh/dl в уравнении (2.1) при стремлении h к крайним значениям];

– начертить линию свободной поверхности.

3 Написать выводы по результатам работы.

Контрольные вопросы

1 Дайте определение линии критической и нормальной глубины, критическому уклону.

2 Как определить энергетическое состояние потока?

3 Начертите график удельной энергии сечения.

4 Что происходит с удельной энергией сечения при возрастании глубины потока при спокойном и бурном состояниях потока?

5 Как определяется нормальная глубина потока h_0 ?

6 Как определяется критическая глубина h_k ?

7 Как определяется критический уклон i_k дна русла?

Лабораторная работа №3

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА РАСХОДА ПРЯМОУГОЛЬНОГО ВОДОСЛИВА С ТОНКОЙ СТЕНКОЙ

Цель работы:

– определить для прямоугольного водослива с тонкой стенкой по опытными данным:

– величину коэффициента расхода m_0 и сравнить её с величиной, вычисленной по формуле (3.2);

– величину коэффициента подтопления σ_n и сравнить её с величиной, вычисленной по формуле (3.4).

Краткие сведения из теории

Нормальным водосливом называется неподтопленный прямоугольный водослив с тонкой стенкой при свободном истечении (в пространство под струю обеспечен доступ атмосферного воздуха) и отсутствии бокового сжатия (рисунок 3.1) [1].

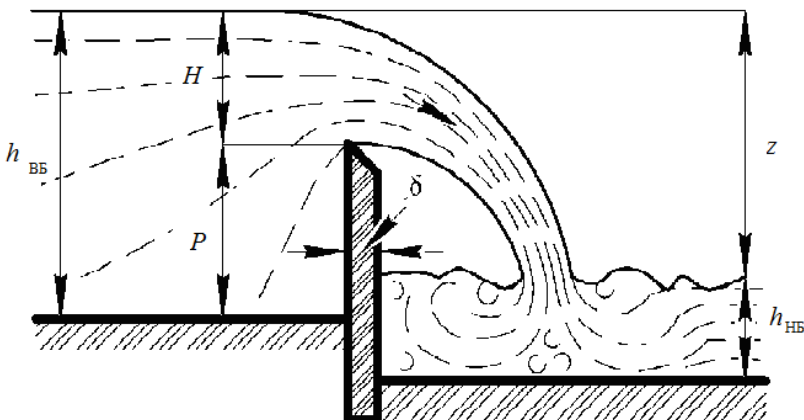


Рисунок 3.1 – Водослив с тонкой стенкой

Расход Q через водослив определяют по формуле

$$Q = m_0 b \sqrt{2g} H^{3/2}, \quad (3.1)$$

где m_0 – коэффициент расхода нормального водослива, который можно определить по формуле Базена – Эгли:

$$m_0 = \left(0,405 + \frac{0,0027}{H} \right) \left[1 + 0,55 \left(\frac{H}{H + P_B} \right)^2 \right]. \quad (3.2)$$

Формула (3.2) справедлива при $0,2 < b \leq 2,0$ м; $0,05 < H \leq 1,24$ м; $0,24 < P_B \leq 3,13$ м.

H и P_B в формуле (3.2) измеряется в метрах; множитель в квадратных скобках – поправка Эгли, учитывающая скорость подхода v_0 ;

B – ширина водослива (ширина водосливного отверстия);

P_B – высота водосливной стенки со стороны верхнего бьефа.

Для подтопленного водослива формула (3.1) принимает вид

$$Q = m_0 \sigma_n b \sqrt{2g} H^{3/2}, \quad (3.3)$$

где σ_n – коэффициент подтопления водослива, вычисляемый по формуле Базена:

$$\sigma_n = 1,05 \left(1 + 0,2 \frac{h_n}{P_H} \right) \sqrt[3]{\frac{z}{H}}, \quad (3.4)$$

где $h_{\text{п}}$ – глубина подтопления;

Z – перепад уровней на водосливе;

$P_{\text{н}}$ – высота водосливной стенки со стороны нижнего бьефа.

Формулу (3.4) можно применять при $0 \leq \frac{h_{\text{п}}}{P_{\text{н}}} < 1,5$. Однако, когда

$0,15 \leq \frac{H}{P_{\text{н}}} < 0,25$, а $0 \leq \frac{h_{\text{п}}}{P_{\text{н}}} < 0,3$, величину $\sigma_{\text{п}}$, вычисленную по формуле

(3.4), следует умножать на 0,96.

Для неподтопленного водослива $\sigma_{\text{п}} = 1,0$.

Описание экспериментальной установки

Работа выполняется на установке «Открытый поток», описание которой дано в работе 2. В открытом потоке устанавливается водослив с тонкой стенкой.

Порядок проведения опытов

1 Открыть затвор b в положение при котором исследуемый водослив будет неподтопленным.

2 Включить насос 4 и, открыв задвижку 3, обеспечить циркуляцию в установке некоторого постоянного расхода воды Q .

3 Определить расстояние от дна до гребня водослива, расход воды в русле, линейкой измерить ширину b лотка, определить напор H , глубину верхнего $h_{\text{вб}}$ и нижнего $h_{\text{нб}}$ бьефов. Результаты измерений записать в таблицу 3.1.

4 Не меняя расхода воды в установке, отрегулировать затвором b так, чтобы исследуемый водослив оказался подтопленным [$z / P_{\text{н}}$ должно быть меньше $(z / P_{\text{н}})_{\text{кр}} \approx 0,75$].

5 Измерить отметки уровней верхнего $h_{\text{вб}}$ и нижнего $h_{\text{нб}}$ бьефов на исследуемом водосливе, результаты записать в таблицу 3.1.

Таблица 3.1 – Результаты эксперимента по исследованию водослива с тонкой стенкой

Наименования измеряемых и вычисляемых величин	Численные значения величин водослива	
	неподтопленного	подтопленного
Расход Q , м ³ /с		
Отметка уровня воды бьефа, м: верхнего $h_{\text{вб}}$ нижнего $h_{\text{нб}}$		
Напор на водосливе H , м		

Окончание таблицы 3.1

Наименования измеряемых и вычисляемых величин	Численные значения величин водослива	
	неподтопленного	подтопленного
Параметры прямоугольного водослива с тонкой стенкой, м: ширина b , м отметка $P + H$, м		
Высота порога $P = P_{\text{в}} = P_{\text{н}}$, м		
Коэффициент расхода, определяемый по формуле (3.2)		
Перепад уровней на водосливе Z , м		
Относительный перепад уровней $z / P_{\text{н}}$		
Относительный напор $H / P_{\text{н}}$		
Коэффициент подтопления по опыту, %, $\sigma_{\text{пон}} = \frac{Q}{m_{0\text{он}} b \sqrt{2gH}^{3/2}}$		
Коэффициент подтопления [по формуле (3.4)] $\sigma_{\text{п}}$		
Относительное отклонение, %, $\Delta\sigma_{\text{п}} = \frac{\sigma_{\text{пспр}} - \sigma_{\text{пон}}}{\sigma_{\text{пспр}}} \cdot 100$		
Вид истечения (подтопленный, неподтопленный водослив)		

6 Закрыть задвижку 3 и выключить насос 4.

7 Обработать опытные данные, и результаты обработки представить в таблице 3.1.

8 Написать выводы по результатам работы.

Контрольные вопросы

1 Что такое водослив с тонкой стенкой?

2 Изобразите схемы протекания потока через неподтопленный прямоугольный водослив с тонкой стенкой.

3 Напишите формулу для определения коэффициента расхода нормального водослива.

4 Как учесть влияние подтопления на пропускную способность водослива?

5 Напишите формулу для определения расхода через нормальный водослив.

6 Напишите формулу для определения коэффициента подтопления прямоугольного водослива с тонкой стенкой.

7 Как определить расход через водослив с тонкой стенкой?

Лабораторная работа №4

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОДОСЛИВА ПРАКТИЧЕСКОГО ПРОФИЛЯ

Цель работы:

- определить опытным путем коэффициенты расхода m и подтопления σ_n , сравнить их со справочными и вычислить относительные отклонения;
- измерить отметки поверхности водослива и струи на водосливной стенке в нескольких точках, начертить в масштабе безвакуумный водослив практического профиля;
- построить по опытным данным профили свободной поверхности потока для неподтопленного и подтопленного водосливов.

Краткие сведения из теории

Водослив практического профиля имеет толщину водосливной стенки в пределах $0,67H < \delta < 2H$. стенка падения воды имеет очертание падающей струи.

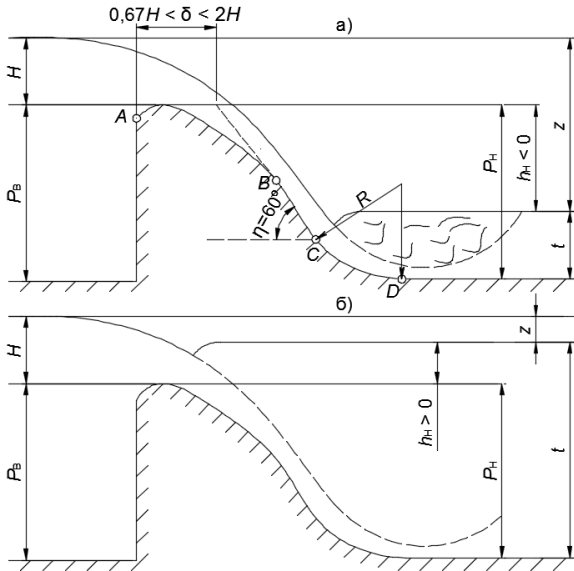


Рисунок 4.1 – Водослив практического профиля:
а – не подтопленный; б – подтопленный

Водосливы с криволинейным очертанием стенки могут быть безвакуумные и вакуумные. У последних в пространстве между струей и поверхно-

стью низовой грани образуется вакуумная зона, способствующая увеличению пропускной способности водослива.

Профили безвакуумных водосливов соответствуют очертанию струи, свободно переливающейся через водослив с тонкой стенкой. Напорная грань у такого водослива, как правило, вертикальная.

Таким образом, безвакуумный водослив представляет собой преграду в русле с вертикальной верховой гранью и очерченной по свободной струе низовой гранью. Профиль безвакуумных водосливов строят для определенной величины профилирующего напора $H_{пр}$, по таблице Офицерова-Кригера. Причем строят только верхнюю часть низовой грани (кривую АВ). Среднюю часть грани (прямую ВС) выполняют в виде касательной к кривой АВ и круговой радиуса R , плавно сопрягающей водосливную грань с дном нижнего бьефа. Значения сопрягающих радиусов R в зависимости от высоты порога P и напора H на водосливе приводятся также в справочнике [4].

Для безвакуумных водосливов криволинейного очертания условия подтопления те же, что и для водослива с тонкой стенкой, т. е. водослив подтоплен, если $z < H$ или, что то же, $h_{п} > 0$ (см. рисунок 4.1, б); сопряжение струи, ниспадающей с водослива, с нижним бьефом происходит при затопленном прыжке. Проверка этого условия производится по соотношению $(z/P_{п}) < (z/P_{п})_{кр}$ (рисунок 4.2).

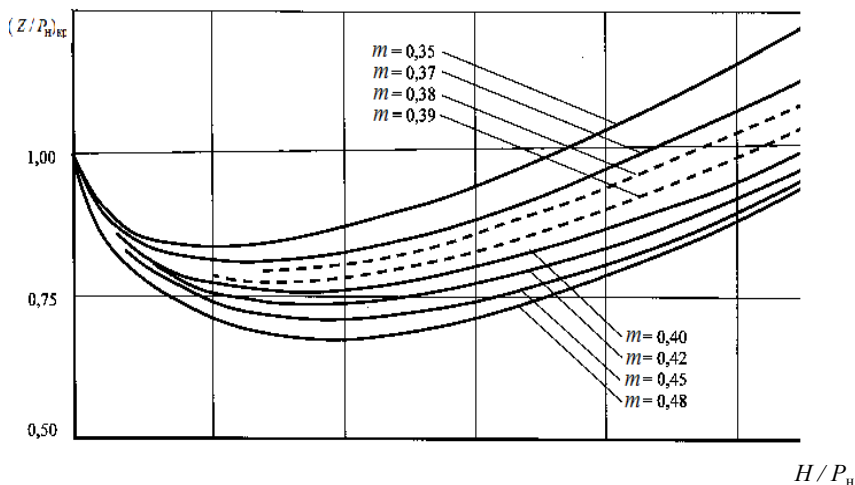


Рисунок 4.2 – График зависимости $H/P_{п} = f(z/P_{п}, m)_{кр}$

Коэффициент расхода m водослива практического профиля зависит от формы профиля водосливной стенки и колеблется в пределах 0,30–0,57.

Коэффициент расхода водослива практического профиля (при $H = H_{\text{пр}}$, без бокового сжатия, неподтопленного, со скошенным профилем) достигает величины $m = 0,48$.

Влияние на величину коэффициента расхода, бокового сжатия, формы оголовка и подтопления учитывается введением в основную формулу водослива эмпирических коэффициентов: полноты напора σ_n , бокового сжатия ε , формы σ_f и подтопления σ_n . После введения коэффициентов формула (4.3) имеет вид

$$Q = m\sigma_f\sigma_n\sigma_n b\varepsilon\sqrt{2gH_0^{3/2}}, \quad (4.1)$$

где $\sigma_f = 1,0$; при отсутствии подтопления и бокового сжатия $\sigma_n = 1,0$; $\varepsilon = 1,0$.

Значения коэффициента подтопления σ_n для водосливов различных профилей зависит от относительного подтопления h_n/H_0 , от отношения $H/H_{\text{пр}}$ и профиля водослива [4].

Площадь живого сечения верхнего бьефа, м^2 ,

$$\Omega_{\text{вб}} = b\left(\frac{H}{\sigma_n} + H_n\right) \quad (4.2)$$

Тогда скорость подхода, м/с ,

$$v_0 = \frac{Q}{\Omega_{\text{вб}}}. \quad (4.3)$$

Скоростной напор, м ,

$$\frac{\alpha v_0^2}{2g}. \quad (4.4)$$

Полный напор на водосливе, м ,

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

Коэффициент расхода водослива

$$m_{\text{он}} = \frac{Q}{b\sqrt{2gH_0^{3/2}}}. \quad (4.6)$$

Относительное отклонение

$$\Delta m = \frac{m_{\text{спр}} - m_{\text{он}}}{m_{\text{спр}}} \cdot 100, \quad (4.7)$$

где $m_{\text{спр}}$ – коэффициент расхода, взятый из справочника [4].

Коэффициент подтопления по опыту

$$\sigma_{\text{поп}} = \frac{Q}{m_{0\text{оп}} b \sqrt{2gH^{3/2}}}. \quad (4.8)$$

Относительное отклонение

$$\Delta\sigma_{\text{п}} = \frac{\sigma_{\text{пспр}} - \sigma_{\text{поп}}}{\sigma_{\text{пспр}}} \cdot 100. \quad (4.9)$$

Описание экспериментальной установки

Работа выполняется на установке «Открытый поток», описание которой дано в работе № 2. В открытом потоке устанавливается водослив практического профиля.

Порядок проведения опытов

1 Открыть затвор b в положение при котором исследуемый водослив будет неподтопленным.

2 Включить насос 4 и, открыв задвижку 3, обеспечить циркуляцию в установке некоторого постоянного расхода воды Q .

3 Определить расход Q при помощи расходомера 2.

4 Определить расстояние от дна до гребня водослива, найти расход воды в русле, линейкой измерить ширину b лотка, определить напор H , глубину верхнего $h_{\text{вб}}$ и нижнего $h_{\text{нб}}$ бьефов, а также сделать замеры координат четырех точек на поверхности стенки падения и струи. Результаты измерений записать в таблицу 4.1.

Таблица 4.1 – Результаты эксперимента по исследованию водослива практического профиля

Наименования измеряемых и вычисляемых величин	Численные значения величин водосливно	
	неподтопленного (опыт 1)	подтопленного (опыт 2)
Расход Q , м ³ /с		
Отметка уровня воды бьефа, м: верхнего $h_{\text{вб}}$ нижнего $h_{\text{нб}}$		
Напор на водосливе H , м		

Окончание таблицы 4.1

Наименования измеряемых и вычисляемых величин	Численные значения величин водосливов	
	неподтопленного (опыт 1)	подтопленного (опыт 2)
Отметки свободной поверхности потока, м, на водосливной грани: ∇_1 ∇_2 ∇_3 ∇_4		
Параметры прямоугольного водослива с тонкой стенкой, м: ширина b отметка гребня $P + H$ высота порога $P = P_{в} = P_{п}$		
Перепад уровней на водосливе Z , м		
Относительный перепад уровней $z/P_{п}$, м		
Относительный напор $H/P_{п}$, м		
$(z/P_{п})_{кр}$, м		
Площадь живого сечения верхнего бьефа [формула (4.2)], м ²		
Скорость подхода [формула (4.3)], м/с		
Скоростной напор [формула (4.4)], м		
Полный напор на водосливе [формула (4.5)], м		
Коэффициент расхода водослива: по опыту [формула (4.6)] справочный $m_{0спр}$		
Относительное отклонение [формула (4.7)]		
Коэффициент подтопления по опыту [фор- мула (4.8)], %		
Коэффициент подтопления σ_{cgh}		
Относительное отклонение [формула (4.9)], %		

5 Не меняя расхода воды в установке, опустить затвор b так, чтобы исследуемый водослив оказался подтопленным.

6 Измерить отметки уровней верхнего $h_{вб}$ и нижнего $h_{нб}$ бьефов на исследуемом водосливе, а также координаты четырех точек на поверхности струи и потока нижнего бьефа (см рисунок 4.1, б) результаты записать в таблицу 4.1.

7 Закрыть задвижку 3 и выключить насос 4 .

8 Обработать опытные данные и результаты обработки представить в таблице 4.1.

9 Начертить в масштабе водослив практического профиля не подтопленный и подтопленный.

10 Написать выводы по результатам работы.

Контрольные вопросы

1 Что такое водослив практического профиля?

2 Назовите условия подтопления водослива практического профиля.

3 Напишите формулу для определения расхода через водослив практического профиля.

4 Какие факторы влияют на величину коэффициента расхода водослива практического профиля?

5 Что такое перепад в сооружении z , глубина подтопления h_n и проектный напор $H_{пр}$?

6 Как определить коэффициент подтопления водослива?

Лабораторная работа №5

ИССЛЕДОВАНИЕ ЯВЛЕНИЯ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО ПРЫЖКА

Цель работы:

– экспериментально определить параметры совершенного гидравлического прыжка: h_1 , h_2 , $l_{пр}$, a и сопоставить их с расчетами по формулам;

– определить по опытным данным, используя формулу (5.5), потери энергии в прыжке;

– определить критическую глубину потока;

– вычертить гидравлический прыжок и указать зону бурного и спокойного движений воды.

Краткие сведения из теории

Гидравлическим прыжком называется явление перехода потока из бурного состояния в спокойное. При этом на небольшом участке потока глубина резко (скачкообразно) возрастает от $h_1 < h_k$ до $h_2 > h_k$ (рисунок 5.1).

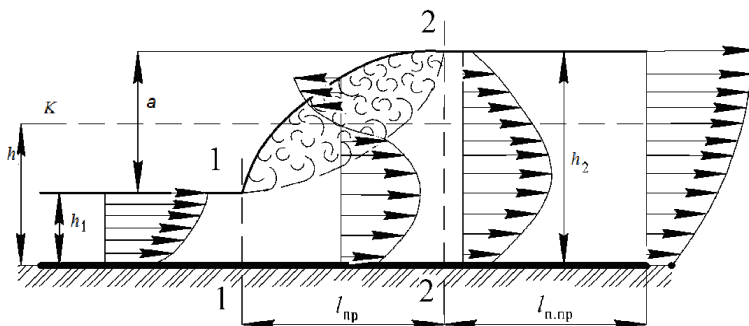


Рисунок 5.1 – Схема совершенного гидравлического прыжка

Здесь h_k – критическая глубина. Глубина потока непосредственно перед прыжком (h_1) называется первой сопряженной глубиной, глубина потока непосредственно за ним (h_2) – второй сопряженной глубиной.

Разность сопряженных глубин $h_1 - h_2 = a$ называется высотой прыжка.

Совершенный прыжок характеризуется тем, что для сечения с первой сопряженной глубиной параметр кинетичности $П_{к1} > 3$, а отношение сопряженных глубин $h_1/h_2 > 2$.

В пределах совершенного прыжка в потоке образуется водоворотная зона (валец). Точка, от которой поверхностное течение направлено в разные стороны, называется раздельной. Расстояние между сечениями с глубинами h_1 и h_2 называется длиной прыжка $l_{пр}$.

При совершенном гидравлическом прыжке в призматическом русле с малым уклоном дна сопряженные глубины связаны уравнением

$$\frac{\alpha Q^2}{g\omega_1} + y_1\omega_1 = \frac{\alpha Q^2}{g\omega_2} + y_2\omega_2, \quad (5.1)$$

где α – коэффициент Буссинеска для сечений с глубинами h_1 и h_2 ;

ω_1, ω_2 – площади живых сечений при первой и второй сопряженных глубинах;

y_1, y_2 – глубины погружения центров тяжести площадей сечений ω_1 и ω_2 .

При заданных расходе Q , форме и размерах призматического русла выражение

$$\frac{\alpha Q^2}{g\omega} + h_c\omega = \Pi \quad (5.2)$$

зависит только от глубины потока в рассматриваемом живом сечении и называется прыжковой функцией.

Из выражения (5.2) можно заключить, что сопряженные глубины h_1 и h_2 – глубины, для которых прыжковые функции имеют одно и то же численное значение.

Следовательно, можно при заданном расходе и одной из сопряженных глубин найти другую. Обычно это делается с помощью графика прыжковой функции.

В случае прямоугольного русла получены уравнения для определения сопряженных глубин:

$$h_1 = \frac{h_2}{2} \left[\sqrt{1 + 8 \left(\frac{h_k}{h_2} \right)} - 1 \right]; \quad (5.3)$$

$$h_2 = \frac{h_1}{2} \left[\sqrt{1 + 8 \left(\frac{h_k}{h_1} \right)} - 1 \right]. \quad (5.4)$$

В формулах (5.3) и (5.4) h_k – критическая глубина, вычисляемая по формуле (2.7), так как русло прямоугольное.

Скачкообразное изменение глубины потока при гидравлическом прыжке обуславливает потерю в нем значительной части энергии. Величина потерь энергии в прыжке $\Delta \mathcal{E}_n$ может быть найдена из уравнения Бернулли, составленного для сечений до и после прыжка:

$$\Delta \mathcal{E}_n = \mathcal{E}_1 - \mathcal{E}_2 = \left(h_1 + \frac{\alpha Q^2}{2g\omega_1^2} \right) - \left(h_2 + \frac{\alpha Q^2}{2g\omega_2^2} \right), \quad (5.5)$$

где \mathcal{E}_1 и \mathcal{E}_2 – удельные энергии для сечений с первой h_1 и второй h_2 сопряженными глубинами.

Выражение (5.5) справедливо при уклоне дна русла $i \approx 0$.

Длина прыжка $l_{пр}$ может быть определена с помощью эмпирических формул:

$$\text{Бахметева – Матцке} \quad l_{пр} = 5a; \quad (5.6)$$

$$\text{Сафранца} \quad l_{пр} = 4,5h_2; \quad (5.7)$$

$$\text{Н. Н. Павловского} \quad l_{пр} = 2,5(1,9h_2 - h_1). \quad (5.8)$$

Описание экспериментальной установки

Работа выполняется на установке «Открытый поток», описание которой дано в работе № 2.

Порядок проведения опытов

1 Включить насос 4, маневрируя затвором б, добиться устойчивого положения совершенного гидравлического прыжка в сжатом сечении.

2 Измерить линейкой ширину потока B , отметки h_1 , h_2 , $l_{пр}$, a , определить расход Q , поступающий в лоток.

3 Сделать три замера глубин $h_i < h_1$ и $h_i < h_2$, для определения прыжковой функции по уравнению (5.2).

4. Вычислить критическую глубину h_k по формуле (2.6) и нанести на стеклянной стенке лотка линию критической глубины $K - K$.

5 Закрыть затвор б и выключить насос 4.

6 Обработать опытные данные и результаты представить в таблицу 5.1.

7 По данным таблиц 5.1 вычертить в масштабе схему прыжка в сжатом сечении. Построить график прыжковой функции.

8 Написать вывод по результатам работы.

Таблица 5.1 – Результаты эксперимента по исследованию гидравлического прыжка

Наименование измеряемых и вычисляемых величин	Числовые значения
Расход воды Q , м ³ /с	
Ширина лотка B , м	
Критическая глубина [формула (2.6)], м	
Критический уклон [формула (2.9)]	
Глубины, м: первая сопряженная h_1 вторая сопряженная h_2 бытовая $h_б$	
Глубины, м, для определения прыжковой функции: $\Pi_1 - h_i < h_1$ $\Pi_2 - h_i > h_1$	
Высота прыжка $a = h_2 - h_1$, м	
Длина прыжка $L_{пр}$, м	
Сопряженные глубины, рассчитанные по формулам (5.3), (5.4), м	
Длина прыжка, рассчитанная по формулам (5.6) – (5.8), м	
Потери энергии в прыжке [формула (5.5)], м	
Прыжковая функция [формула (5.2)] ($\alpha_{01} \approx \alpha_{ок} \approx 1,0$), м ³	

Контрольные вопросы

- 1 Что такое гидравлический прыжок?
- 2 Изобразите схему совершенного гидравлического прыжка и покажите на ней его геометрические параметры.
- 3 Напишите уравнение совершенного гидравлического прыжка в призматическом русле с малым уклоном дна.
- 4 Что такое прыжковая функция, начертите ее график?
- 5 Как определить критический уклон дна русла?
- 6 Как определяются потери энергии в гидравлическом прыжке?
- 7 Что такое длина прыжка и как она определяется?
- 8 Что такое сопряженные глубины и как они определяются для прямоугольного русла?

Лабораторная работа №6

ИССЛЕДОВАНИЕ СОПРЯЖЕНИЯ БЬЕФОВ ЗА ГИДРОТЕХНИЧЕСКИМ СООРУЖЕНИЕМ

Цель работы:

- определить опытным путем сопряжения бьефов за гидротехническим сооружением;
- по опытным данным построить профили свободной поверхности потока в нижнем бьефе.

Краткие сведения из теории

Сопряжение бьефов представляет собой соединение потока, поступающего из верхнего бьефа, с потоком нижнего бьефа. Любое сооружение в русле является сопротивлением движению потока, для преодоления которого необходима дополнительная энергия.

Она накапливается перед сооружением в виде потенциальной энергии путем увеличения глубины потока в канале до тех пор, пока ее величины не будет достаточно для пропуска поступающего расхода.

На сооружении потенциальная энергия переходит в кинетическую вследствие уменьшения глубины (до h_c) и увеличения скорости потока. Поток поступает в нижний бьеф бурном состоянии ($h_c < h_k$).

Переход бурного состояния потока сооружения в спокойный поток нижнего бьефа происходит в виде гидравлического прыжка. В зависимости от глубины потока нижнего бьефа ($h_{нб}$) и глубины в сжатом сечении (h_c) различают три типа сопряжения бьефов (рисунок 6.1).

1 Сопряжение происходит в виде отогнанного прыжка (см. рисунок 6.1, а). В данном случае прыжок находится на некотором расстоянии от сжатого сечения. Расстояние от сжатого сечения до гидравлического прыжка называется длиной отгона l .

На этом участке свободная поверхность потока представляет собой кривую подпора. Происходит увеличение глубины от сжатой (h_c) до первой сопряженной глубины гидравлического прыжка (h_1). Глубина нижнего бьефа при этом равна второй сопряженной глубине ($t = h_2$).

При рассматриваемом типе сопряжения поток на расстоянии l находится в бурном состоянии, что может привести к разрушению дна и берегов русла.

2 Гидравлический прыжок находится в сжатом сечении ($l = 0$). Этот тип часто называют сопряжение прыжком в сжатом сечении (см. рисунок 6.1, б). Прыжок находится в критическом состоянии. В данном случае глубина в сжатом сечении потока равна первой сопряженной глубине гидравлического прыжка ($h_c = h_1$), а глубина в нижнем равна второй сопряженной глубине ($t = h_2$).

3 Данный тип сопряжения носит название сопряжения по типу *затопленного гидравлического прыжка* (см. рисунок 6.1, в). В данном случае глубина в сжатом сечении (h_c) больше первой сопряженной гидравлического прыжка ($h_c > h_1$), а $h_{нб} > h_2$.

Гидравлический расчет сопряжения бьефов начинается с определения типа сопряжения (рисунок 6.2). Для этого необходимо определить глубину потока в сжатом сечении (h_c).

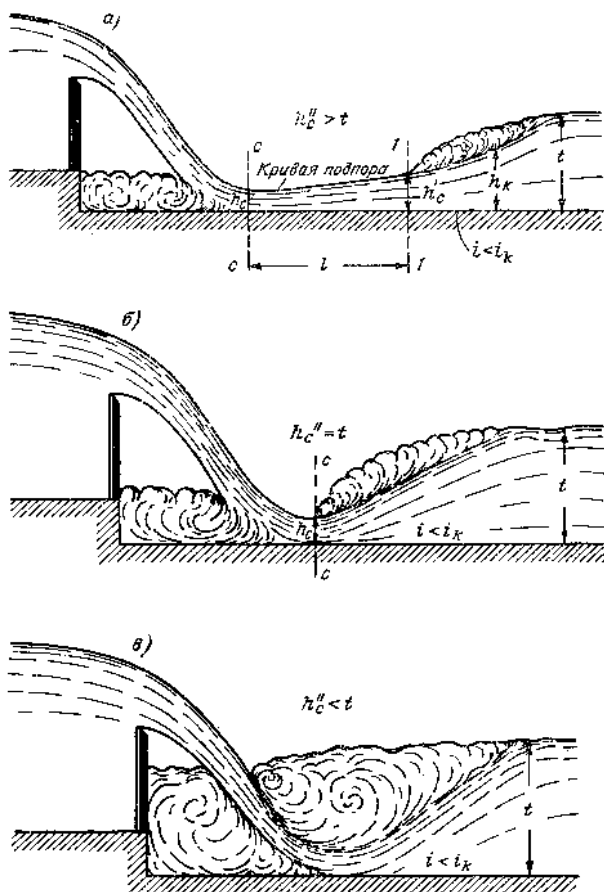


Рисунок 6.1 – Формы сопряжения бьефов

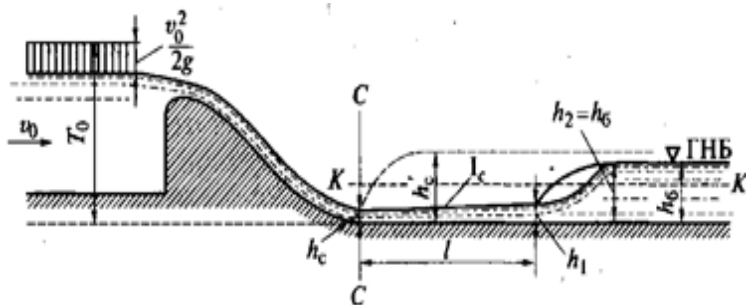


Рисунок 6.2 – Определение формы сопряжения бьефов

Глубину в сжатом сечении определим с помощью уравнения Бернулли, которое используем для сечения 1 – 1 на подходе потока к сооружению и сечения С – С, где определена глубина (h_c):

$$h_{вб} + \frac{\alpha v_{вб}^2}{2g} = h_c + \frac{\alpha_c v_c^2}{2g} + h_{п}, \quad (6.1)$$

где $h_{вб}$, h_c – глубина потока в верхнем бьефе и в сжатом сечении, м;
 v_0 , v_c – средняя скорость потока в верхнем бьефе и в сжатом сечении, м/с;
 $h_{п}$ – потери удельной энергии в сооружении, м,

$$h_{п} = \zeta \frac{v_c^2}{2g}; \quad (6.2)$$

ζ – суммарный коэффициент сопротивления в пределах сооружения.

Полная удельная энергия перед входом в сооружение, м,

$$T_0 = h_{вб} + \frac{\alpha v_0^2}{2g}. \quad (6.3)$$

Тогда уравнение (6.1) после подстановки примет вид

$$T_0 = h_c + (\alpha + \zeta) \frac{v_c^2}{2g}. \quad (6.4)$$

Величину скорости в сжатом сечении выразим через расход:

$$v_c = \frac{Q}{bh_c}, \quad (6.5)$$

где b – ширина водопропускного сооружения, м.

Обозначим: $(\alpha + \zeta) = \frac{1}{\varphi^2}$, откуда $\varphi = \frac{1}{\sqrt{\alpha + \zeta}}$,

где φ – коэффициент скорости, который учитывает потери напора в пределах сооружения. Принимается 0,85–0,95, в зависимости от конкретных условий [3, 4].

С учетом предыдущих рассуждений уравнение (6.4) примет вид

$$T_0 = h_c + \frac{Q^2}{2gb^2h_c^2\varphi^2}. \quad (6.6)$$

Решим уравнение (6.5) относительно h_c :

$$h_c = \frac{Q}{\varphi b \sqrt{2g(T_0 - h_c)}}. \quad (6.7)$$

Уравнения (6.6) и (6.7) решаются методом последовательных приближений. Процесс приближения проводится до тех пор, пока новое значение глубины потока в сжатом сечении не будет отличаться от предыдущего на 2–3 %. Принимая глубину в сжатом сечении за первую сопряженную (h_1) гидравлического прыжка, по формуле (5.4) находим фиктивную сопряженную (h'). Ее значение необходимо сравнить с глубиной нижнего бьефа (t).

Глубина потока нижнего бьефа определяется путем построения кривой связи $K = f(h)$ и при заданном $K_3 = Q_3 / \sqrt{i}$ по кривой находим t .

Если глубина нижнего бьефа меньше фиктивной сопряженной глубины гидравлического прыжка ($h' > t$), то прыжок будет отогнанным (см. рисунок 6.1, a – первый тип сопряжения).

В случае, если глубина нижнего бьефа равна фиктивной сопряженной ($h' = t$), имеет место прыжок в сжатом сечении (см. рисунок 6.1, b – второй тип сопряжения).

Когда глубина нижнего бьефа будет больше фиктивной сопряженной ($h' < t$), сопряжение бьефов будет происходить в виде затопленного гидравлического прыжка (см. рисунок 6.1, $в$ – третий тип сопряжения бьефов).

Первый и второй типы сопряжения бьефов требует специальных сооружений для гашения энергии.

Описание экспериментальной установки

Работа выполняется на установке «Открытый поток», описание которой дано в работе № 2. В открытом потоке устанавливается водослив практического профиля.

Порядок проведения опытов

1 Включить насос 4 и, открыв задвижку 3, обеспечить циркуляцию в установке некоторого постоянного расхода воды Q .

2 Произвести замеры: расстояния от дна до гребня водослива, расхода воды в русле, ширины b лотка, напора H , глубины верхнего $h_{вб}$ и нижнего $h_{нб}$ бьефа. Результаты измерений записать в таблицу 6.1.

3 Не меняя расхода воды в установке, опустить затвор b так, чтобы в нижнем бьефе установился отогнанный прыжок (см. рисунок 6.1, a).

4 Измерить отметки уровней верхнего $h_{вб}$ и нижнего $h_{нб}$ бьефов на исследуемом водосливе, а также координаты четырех точек на поверхности струи и потока нижнего бьефа (см. рисунок 6.1, a), результаты записать в таблицу 6.1.

5 Не меняя расхода воды в установке, опустить затвор b так, чтобы в нижнем бьефе установился прыжок в сжатом сечении (см. рисунок 6.1, b).

6 Измерить отметки уровней верхнего $h_{вб}$ и нижнего $h_{нб}$ бьефов на исследуемом водосливе, а также координаты четырех точек на поверхности струи и потока нижнего бьефа (см. рисунок 6.1, b), результаты записать в таблицу 6.1.

7 Не меняя расхода воды в установке, опустить затвор б так, чтобы исследуемый водослив оказался подтопленным.

8 Измерить отметки уровней верхнего $h_{вб}$ и нижнего $h_{нб}$ бьефов на исследуемом водосливе, а также координаты четырех точек на поверхности струи и потока нижнего бьефа (см. рисунок 6.1, в), результаты записать в таблицу 6.1.

9 Закрывать задвижку 3 и выключить насос 4.

10 Обработать опытные данные и результаты обработки представить в таблице 6.1.

11 Начертить в масштабе водослив практического профиля – не подтопленный и подтопленный.

12 Написать выводы по результатам работы.

Таблица 6.1 – Результаты эксперимента по исследованию сопряжения бьефов

Наименования измеряемых и вычисляемых величин	Численные значения величин		
	Прыжок отогнанный	Прыжок в сжатом сечении	Прыжок затопленный
Расход Q , м ³ /с			
Полный напор T_0 , м			
Напор на водосливе H , м			
Сжатая глубина h_c , м			
Бытовая глубина t , м			
Ширина водослива b , м			
Фиктивная сопряженная глубина h' , м			
Фиктивная сопряженная глубина h' [по формуле (5.4)], м			
Относительное отклонение $\Delta h' = \frac{h'_{спр} - h'_{он}}{h'_{спр}} \cdot 100$			
Сравнение бытовой и фиктивной сопряженной глубины			

Контрольные вопросы

- 1 Что такое сопряжение бьефов, какие формы оно имеет?
- 2 Изобразите схему прыжка в сжатом сечении, отогнанного и затопленного гидравлического прыжка.
- 3 Напишите уравнение для определения глубины в сжатом сечении.
- 4 Как определить фиктивную сопряженную глубину?
- 5 Что такое полный напор верхнего бьефа?

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МЕСТА УСТАНОВКИ ВОДОБОЙНОЙ СТЕНКИ В НИЖНЕМ БЬЕФЕ ПОТОКА

Цель работы:

- определить расстояние до места установки водобойной стенки, экспериментально и теоретически;
- сравнить результаты исследований.

Краткие сведения из теории

В зависимости от типа сопряжения бьефов может возникнуть необходимость устройства специальных сооружений для гашения энергии гидравлического прыжка. При затопленном гидравлическом прыжке (см. рисунок 6.1, в) специальных сооружений для гашения энергии не требуется. Благодаря наличию затопленного гидравлического прыжка гашение энергии происходит на достаточно коротком участке, в пределах сооружения.

Наличие в нижнем бьефе отогнанного прыжка или прыжка в сжатом сечении требует специальных мер для надежной защиты русла нижнего бьефа от разрушения, вызванного большими придонными скоростями. В этом случае необходимо устройство сооружений в виде водобойных колодцев, водобойных стенок или комбинированных водобойных колодцев.

Водобойная стенка представляет собой преграду в русле нижнего бьефа в виде водослива практического профиля (рисунок 7.1).

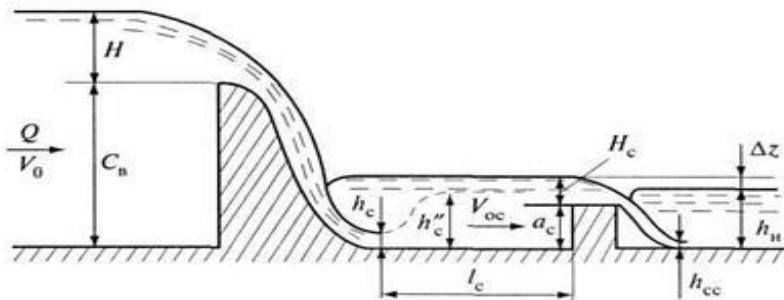


Рисунок 7.1 – Водобойная стенка в нижнем бьефе ГТС

Устройство водобойной стенки должно обеспечить сопряжение по типу затопленного гидравлического прыжка. Гидравлический расчет водобойной стенки сводится к определению высоты стенки (a_c) и расстояние ее до сжатого сечения (l_c). Глубина воды перед стенкой ($a_c + H_c$) должна быть больше второй сопряженной глубины (h_2').

При этом H_c – геометрический напор перед стенкой. Тогда с учетом коэффициента запаса $\sigma h_2 = a_c + H_c$, откуда

$$a_c = \sigma h_2 - H_c. \quad (7.1)$$

Если принять водобойную стенку за неподтопленный водослив практического профиля без бокового сжатия, то получим для нее выражение геометрического напора:

$$H_c = \left(\frac{Q}{mb\sqrt{2g}} \right)^{\frac{2}{3}} - \frac{\alpha v_{0c}^2}{2g}, \quad (7.2)$$

где Q – расход потока, поступающего в нижний бьеф, м³/с;

$m \approx 0,40$ – коэффициент расхода водослива;

b – длина водобойной стенки (ширина русла нижнего бьефа), м;

v_{0c} – средняя скорость потока на подходе к водобойной стенке, м/с,

$$v_{0c} = \frac{Q}{ba_c}. \quad (7.3)$$

Для определения высоты стенки необходимо определить сжатую глубину h_c , решая уравнения (6.6) и (6.7), после чего определить вторую фиктивную сопряженную глубину h'_2 , решая уравнение

$$h'_c = \frac{h_c}{2} \left[\sqrt{1 + 8 \left(\frac{h_c}{h_c} \right)} - 1 \right]. \quad (7.3)$$

Величину критической глубины определим по формуле (2.7). Далее с учетом того, что

$$h'_2 = h_2,$$

можно определить высоту стенки a_c по формуле (7.1). После определения высоты водобойной стенки необходимо определить условие сопряжения потока за стенкой. В случае, если за стенкой наблюдается гидравлический прыжок, отличный от затопленного, то для предотвращения отгона прыжка необходимо рассчитать вторую стенку или запланировать устройство комбинированного водобойного колодца.

Расстояние от сжатого сечения до водобойной стенки (длину водобойного колодца, образованного стенкой) определится аналогично расчету длины водобойного колодца:

$$l_c = (0,7 \dots 0,9) l_{пр}, \quad (7.3)$$

где $l_{пр}$ – длина гидравлического прыжка [формулы (5.6)–(5.8)].

Описание экспериментальной установки

Работа выполняется на установке «Открытый поток», описание которой дано в работе № 2. В русле устанавливается водослив практического профиля и на расстоянии l_c устанавливается водобойная стенка.

Порядок проведения опытов

1 Включить насос, маневрируя затвором b , добиться устойчивого движения воды.

2 Измерить линейкой ширину потока b , высоту водосливной стенки C_b , глубину в сжатом сечении h_c , сопряженную глубину h'_c , напор на стенке H_c , высоту стенки a_c , расстояние до места установки стенки l_c , определить расход Q , поступающий в лоток.

3 Вычислить критическую глубину h_k по формуле (2.6) и нанести на стеклянной стенке лотка линию критической глубины $K - K$.

4 Закрыть задвижку 3 и выключить насос 4.

5 Обработать опытные данные и результаты представить в таблицу 7.1.

6 Произвести теоретический расчет значений h_c, h'_c, H_c, a_c, l_c

7 Сравнить результаты теоретических расчетов и экспериментальных данных.

8 По данным таблицы 7.1 вычертить в масштабе схему ГТС с водобойной стенкой.

9 Написать вывод по результатам работы.

Таблица 7.1 – Результаты эксперимента по установке водобойной стенки

Наименования измеряемых и вычисляемых величин	Численные значения величин		
	Экспериментальные данные	Теоретически полученные данные	Величина относительной погрешности, %
Расход Q , м ³ /с			
Полный напор T_0 , м			
Напор на водосливе H_c , м			
Сжатая глубина h_c , м			
Высота стенки a_c , м			
Глубина в сжатом сечении h_c , м			
Сопряженная глубина h'_c , м			
Расстояние до места установки стенки l_c , м			
Ширина водослива b , м			
Критическая глубина h_k , м			

Контрольные вопросы

- 1 Перечислите виды гасителей энергии гидравлического прыжка?
- 2 Изобразите схему затопленного гидравлического прыжка, в случае установки водобойной стенки.
- 3 Напишите уравнение для определения высоты водобойной стенки.
- 4 Какое условие должно гарантировать возникновение затопленного прыжка в нижнем бьефе?
- 5 Как определить расстояние до места установки водобойной стенки?
- 8 Что такое сопряженные глубины и как они определяются?

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 **Парахневич, В. Т.** Гидравлика, гидрология, гидрометрия водотоков : учеб. пособие / В. Т. Парахневич.– М. : НИЦ Инфра-М, Нов. знание, 2015. – 368 с.
- 2 Лабораторный курс гидравлики : учеб. пособие / А.Ш. Барекян [и др.] – Тверь: ТГТУ, 2008 - 152 с.
- 3 Справочник по гидравлике / под ред. В. А. Большакова. – Киев : Вища школа, 1977. – 280 с.
- 4 **Киселев, П. Г.** Справочник по гидравлическим расчетам / П. Г. Киселев. – М. – Л. : Госэнергоиздат, 1961. – 352 с.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Инструкция по охране труда	3
Общие указания по выполнению лабораторных работ.....	5
Лабораторная работа № 1. Определение коэффициента фильтрации лабораторным способом.....	6
Лабораторная работа № 2. Оценка энергетического состояния потока, определение форм линий свободной поверхности	9
Лабораторная работа № 3. Определение коэффициента расхода прямоугольного водослива с тонкой стенкой.....	16
Лабораторная работа № 4. Исследование водослива практического профиля...	20
Лабораторная работа № 5. Исследование явления гидравлического прыжка....	25
Лабораторная работа № 6. Исследование сопряжения бьефов за гидротехническим сооружением.....	28
Лабораторная работа № 7. Определение места установки водобойной стенки в нижнем бьефе потока.....	34
Список литературы.....	37