

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

Н. Р. Ахмедова

Г И Д Р А В Л И К А

Учебно-методическое пособие
по лабораторным работам для студентов, обучающихся в бакалавриате
по направлению подготовки 20.03.02 Природообустройство и водопользование

Калининград
Издательство ФГБОУ «КГТУ»
2021

УДК 532

Рецензент

д-р техн. наук, профессор кафедры водных ресурсов и водопользования ФГБОУ
ВО «Калининградский государственный технический университет»
В. А. Наумов

Ахмедова, Н. Р. Гидравлика: учеб.-методич. пособие по лаб. работам для студ., обуч. в бакалавриате по направлению подгот. 20.03.02 Природообустройство и водопользование / **Н. Р. Ахмедова.** – Калининград: Изд-во ФГБОУ ВО «КГТУ», 2021. – 92 с.

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

Учебно-методическое пособие рассмотрено и одобрено кафедрой водных ресурсов и водопользования ФГБОУ ВО «Калининградский государственный технический университет» 28 июня 2021 г., протокол № 9

Учебно-методическое пособие одобрено и рекомендовано методической комиссией строительного факультета ФГБОУ ВО «Калининградский государственный технический университет» 03 сентября 2021 г., протокол №1

УДК 532

© Федеральное государственное
бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Калининградский государственный
технический университет», 2021 г.
© Ахмедова Н.Р., 2021 г.

Оглавление

ВВЕДЕНИЕ	4
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 1. ВВЕДЕНИЕ. ГИДРАВЛИЧЕСКИЙ СТЕНД. ПРИБОРЫ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ДАВЛЕНИЯ.....	5
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 2. ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМОВ ТЕЧЕНИЯ ЖИДКОСТИ В ТРУБАХ. ОПЫТ РЕЙНОЛЬДСА.....	10
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 3. ГИДРАВЛИЧЕСКИЕ ПОТЕРИ ПРИ ЛАМИНАРНОМ ТЕЧЕНИИ В ТРУБЕ	15
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 4. ГИДРАВЛИЧЕСКИЕ ПОТЕРИ ПРИ ТУРБУЛЕНТНОМ ТЕЧЕНИИ В ТРУБЕ	20
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 5. ТАРИРОВКА ДРОССЕЛЬНОГО РАСХОДОМЕРА	26
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 6. ИССЛЕДОВАНИЕ ВОДОПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ МАЛОГО ОТВЕРСТИЯ И НАСАДКА.....	31
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 7. ГИДРАВЛИЧЕСКИЙ УДАР В НАПОРНОМ ТРУБОПРОВОДЕ	36
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 8. ОПЫТНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ШЕРОХОВАТОСТИ РУСЛА	40
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 9. ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАСХОДОВ МЕРНЫМИ ВОДОСЛИВАМИ С ОСТРЫМ РЕБРОМ.....	45
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 10. ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА РАСХОДА ПРЯМОУГОЛЬНОГО ВОДОСЛИВА С ОСТРЫМ РЕБРОМ.....	52
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 11. ИСТЕЧЕНИЕ ЧЕРЕЗ ВОДОСЛИВ ПРАКТИЧЕСКОГО ПРОФИЛЯ	59
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 12. ИСТЕЧЕНИЕ ЧЕРЕЗ ВОДОСЛИВ С ШИРОКИМ ПОРОГОМ.....	68
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 13. ИСТЕЧЕНИЕ ЖИДКОСТИ ИЗ-ПОД ЗАТВОРА.....	74
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 14. ИЗУЧЕНИЕ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО ПРЫЖКА В ПРЯМОУГОЛЬНОМ РУСЛЕ	79
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 15. ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРА СОПРЯЖЕНИЯ ПОТОКА В НИЖНЕМ БЬЕФЕ	86
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	91

ВВЕДЕНИЕ

Дисциплина «Гидравлика» является базовой, формирующей у обучающихся готовность к выполнению инженерных гидравлических расчетов; проведению лабораторных гидравлических исследований, обработке и анализу их результатов.

В результате изучения дисциплины студент должен:

знать: основные закономерности равновесия и движения жидкостей, основные параметры и способы расчета потоков в трубопроводах и открытых руслах; способы гидравлического обоснования размеров основных сооружений на открытых потоках; основы фильтрационных расчетов;

уметь: применять уравнение Бернулли для потока реальной жидкости; выполнять гидравлические расчеты трубопроводов и сопряжения бьефов и фильтрационные расчеты;

владеть: навыками выполнения инженерных гидравлических расчетов; проведения лабораторных гидравлических исследований, обработки и анализа их результатов.

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

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 1.

ВВЕДЕНИЕ. ГИДРАВЛИЧЕСКИЙ СТЕНД. ПРИБОРЫ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ДАВЛЕНИЯ

Цель работы: изучить основные гидравлические характеристики потока жидкости, принцип работы гидравлического стенда, приборов для измерения давления.

Задание: ознакомиться с методами измерения гидравлических параметров, их размерностями и измерительными приборами.

Сведения, необходимые для выполнения работы

Гидравлика – наука, изучающая законы равновесия и движения жидкостей и разрабатывающая методы их применения для решения практических задач.

В гидравлике рассматриваются главным образом потоки жидкости, ограниченные и направленные твердыми стенками, т. е. течения в открытых и закрытых руслах (каналах).

Жидкостью называется физическое тело, мало изменяющее свой объём при изменении давления и температуры и обладающее текучестью, в силу чего жидкость не имеет собственной формы, а принимает форму сосуда, в который она помещается. Жидкости делятся на два вида: капельные (вода, нефть, бензин, ртуть, спирт и др.) и газообразные (все газы).

Основными гидравлическими характеристиками потока жидкости являются расход Q , средняя скорость потока v_{cp} , живое сечение потока (площадь поперечного сечения) ω , гидравлический радиус R , шероховатость стенок n (Δ_s).

Расход жидкости Q ($\text{м}^3/\text{с}$) – объём жидкости, протекающей в единицу времени через живое сечение потока.

Для несжимаемой жидкости расход может быть определен по формуле:

$$Q = v_{cp} \cdot \omega. \quad (1.1)$$

В реальных потоках вязкой жидкости местные скорости в различных точках живого сечения будут различными. Введение понятия о средней скорости потока в данном живом сечении позволяет проще решать практические задачи.

Средняя скорость в сечении представляет собой одинаковую для всех точек сечения воображаемую скорость, при которой через данное живое сечение проходит тот же расход, что и при действительных местных скоростях, разных в различных точках сечения.

Таким образом, средняя скорость потока жидкости $u_{\text{ср}}$ (м/с) в данном сечении - это несуществующая в действительности скорость потока, одинаковая для всех точек данного живого сечения, с которой должна была бы двигаться жидкость, чтобы её расход был равен фактическому.

Живым сечением потока называется поверхность (поперечное сечение), нормальная ко всем линиям тока, его пересекающим, и лежащая внутри потока жидкости. Площадь живого сечения обозначается буквой ω , измеряется в м^2 .

Гидравлическим радиусом потока R (м) называется часто используемая в гидравлике величина - важная характеристика при определении расхода, проходящего через живое сечение. Представляет собой отношение площади живого сечения ω к смоченному периметру χ :

$$R = \frac{\omega}{\chi}. \quad (1.2)$$

Смоченный периметр потока χ (м) - линия, по которой жидкость соприкасается с твердыми стенками, ограничивающими поток.

Для решения задач гидравлики особо важное значение имеет давление. Величина p (Па) в уравнении (1.3) является абсолютным или полным гидростатическим давлением, поскольку учитывает влияние внешнего давления на свободную поверхность жидкости:

$$p = p_o + \rho gh, \quad (1.3)$$

где p_o - величина внешнего давления на свободную поверхность жидкости, Па; ρ - плотность рассматриваемой жидкости, $\text{кг}/\text{м}^3$; g - ускорение свободного

падения, m/c^2 ; h - глубина погружения рассматриваемой точки под уровень свободной поверхности, м.

Таким образом, p_o в уравнении (1.3) представляет собой давление на свободную поверхность, равное в открытых резервуарах и водных объектах атмосферному давлению $p_{атм}$, а давление, определяемое величиной ρgh и показывающее превышение полного давления над атмосферным, называется избыточным $p_{изб}$, или манометрическим p_m . Исходя из данной формулировки, уравнение (1.3) можно записать в следующем виде:

$$p_{абс} = p_{атм} + p_{изб}. \quad (1.4)$$

В некоторых случаях в жидкости образуются области с давлением ниже атмосферного, или области вакуума. Вакуумом называется недостаток давления до атмосферного, т.е.

$$p_{вак} = p_{атм} - p_{абс}. \quad (1.5)$$

Для измерения давления применяются барометры, манометры, пьезометры и вакуумметры (рис. 1.1-1.4).

Пьезометры обычно представляют собой открытые сверху стеклянные трубки, помещённые на измерительной шкале. Нижний конец прибора соединяется с той областью, где должно измеряться давление.

Механические манометры применяют для измерения значительных давлений. На упругий чувствительный элемент манометра (пружину, мембрану) оказывается давление, которое заставляет перемещаться по измерительной шкале присоединённую к пружине или мембране стрелку.

Вакуумметрами называют приборы, служащие для измерения вакуума. Их конструкции и принцип действия аналогичны конструкциям и принципу действия манометров. Например, в мембранных вакуумметрах деформация мембраны происходит вследствие воздействия на неё атмосферного давления после того, как под мембрану подведено пониженное давление.

Дифференциальный манометр – это прибор, который используют для измерения перепада давлений.

<p>Рис. 1.1. Пьезометр</p>	<p>Рис. 1.2. Механический манометр</p>
<p>Рис. 1.3. Вакуумметр</p>	<p>Рис. 1.4. Дифференциальный манометр</p>

Порядок выполнения работы

1. Изучить принцип работы гидравлического стенда в лаборатории, вычертить его схему.
2. Снять показания механического и дифференциального манометров, пьезометра.
3. Определить расход жидкости, используя формулу:

$$Q = \frac{V}{\tau}, \quad (1.6)$$

где V – объём жидкости (м^3) проходящий через поперечное сечение потока за время τ (м).

4. Определить среднюю скорость движения жидкости $v_{\text{ср}}$ (м/с) (см. формулу 1.1) с учётом того, что для трубы с круглой формой поперечного сечения площадь ω определяется по формуле:

$$\omega = \frac{\pi d^2}{4}, \quad (1.7)$$

где d – диаметр трубопровода, м.

5. Результаты измерений и вычислений занести в табл. 1.1.

Таблица 1.1. – Результаты лабораторных измерений и вычислений

№ п/п	Показатель	Единицы измерения	Значение
1	Показание механического манометра, p_m	Па	
2	Показание дифференциального манометра, p_m	м	
		Па	
3	Показание пьезометра, p_p	м	
4	Объём жидкости, V	м ³	
5	Время, τ	с	
6	Расход, Q	м ³ /с	
7	Средняя скорость движения жидкости, $v_{\text{ср}}$	м/с	

Вопросы для самопроверки

1. Назвать приборы для измерения давления.
2. Назвать единицу измерения давления в СИ.
3. Дать определение термину «расход».
4. Начертить схему гидравлического стенда.
5. Назвать основные гидравлические характеристики потока жидкости.
6. Что такое «смоченный периметр потока»?
7. Написать формулу для определения абсолютного гидростатического давления.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 2.

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМОВ ТЕЧЕНИЯ ЖИДКОСТИ В ТРУБАХ.

ОПЫТ РЕЙНОЛЬДСА

Цель работы: изучить режимы движения жидкости, понять физический смысл числа Рейнольдса.

Задание: при установившемся режиме движения жидкости в горизонтальном стеклянном трубопроводе провести визуальные наблюдения за ламинарным и турбулентным режимами течения жидкости и сопоставить с результатами расчета.

Сведения, необходимые для выполнения работы

Существуют два режима течения жидкости в трубах: ламинарный и турбулентный.

Ламинарное течение жидкости – это упорядоченное течение без пульсаций скоростей и давления. Слабое перемешивание частиц жидкости (поперечная диффузия) происходит только за счет молекулярного механизма. При таком течении все линии тока вполне определяются формой трубопровода, по которому течет жидкость. При ламинарном течении жидкости в прямой трубе постоянного сечения все линии тока направлены параллельно оси трубы, т.е. прямолинейно; отсутствует осредненное поперечное перемещение жидкости. Ламинарное течение является вполне упорядоченным и при постоянном напоре строго установившимся течением. Однако его нельзя считать безвихревым, так как в нем хотя и нет видимых вихрей, но одновременно с поступательным движением имеет место упорядоченное вращательное движение, более интенсивное вблизи стенок канала.

Турбулентным называется течение, сопровождающееся интенсивным перемешиванием частиц жидкости, пульсациями скоростей и давления. Движение отдельных частиц оказывается подобным хаотическому, беспорядочному движению молекул газа, но с значительно большими скоростями. При турбулентном течении поперечная диффузия имеет

интенсивность на 2-3 порядка выше, чем при ламинарном. Она обусловлена образованием и движением вихрей жидкости. Этим и объясняются пульсации скоростей и давлений.

На основании подобия потоков жидкости установлено, что изменение режима течения жидкости всегда должно происходить при одном и том же числе Рейнольдса:

$$Re = \frac{v_{\text{ср}} d}{\nu}, \quad (2.1)$$

где $v_{\text{ср}}$ - средняя скорость течения жидкости, м/с; d – диаметр трубопровода, м; ν - кинематическая вязкость жидкости, м²/с.

Число Рейнольдса, при котором происходит смена режима течения, называется критическим. При движении жидкости в трубопроводе критическое число Рейнольдса $Re_{\text{кр}} = 2300$.

Таким образом, число Рейнольдса является критерием, определяющим режим течения жидкости в трубах. При $Re < Re_{\text{кр}}$ течение является ламинарным, при $Re > Re_{\text{кр}}$ – турбулентным.

Зная скорость движения жидкости, ее вязкость и диаметр трубы, можно расчетным путем найти число Рейнольдса и, сравнив его с $Re_{\text{кр}}$, определить режим течения жидкости.

На практике имеют места как ламинарное, так и турбулентное течение жидкости. Ламинарное течение наблюдается в основном при течении по трубе вязких жидкостей, например, смазочных масел. Турбулентным течением обычно имеет место в водопроводах, а также в трубах, по которым движется бензин, керосин и другие маловязкие жидкости.

Смена режима течения при достижении $Re_{\text{кр}}$ обусловлена тем, что одно течение теряет устойчивость, а другое – приобретает. При $Re < Re_{\text{кр}}$ ламинарное течение является вполне устойчивым, всякого рода искусственная турбулизация потока и его возмущения погашаются влиянием вязкости и ламинарное течение восстанавливается. Турбулентное течение при этом неустойчиво.

При $Re > Re_{кр}$ наоборот, турбулентное течение устойчиво, а ламинарное – неустойчиво.

В особых лабораторных условиях при полном отсутствии факторов, способствующих турбулизации потока, можно получить ламинарное течение при Re , значительно превышающем $Re_{кр}$. Однако в этих случаях ламинарное течение оказывается настолько неустойчивым, что достаточно небольшого возмущения, чтобы оно перешло в турбулентное.

На практике для расчета реальных потоков жидкости обычно используют $Re_{кр} = 2300$.

Порядок выполнения работы

1. Ламинарное и турбулентное течение жидкости можно наблюдать на установке, представленной на рис. 2.1.

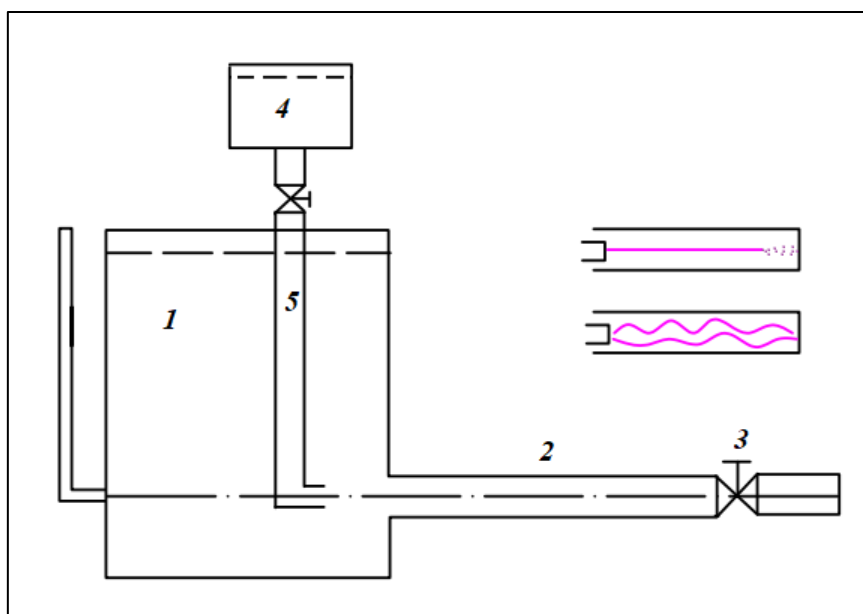


Рис. 2.1. Лабораторная установка для опыта Рейнольдса

Установка включает в себя резервуар 1 с водой, горизонтальную трубку 2, выполненную из органического стекла, с запорным вентилем 3 на конце и бак 4 с водным раствором красителя, который по трубке, снабженной пробковым краном 5, подается тонкой струйкой внутри горизонтальной трубки 2.

Если несколько приоткрыть вентиль 3 и дать возможность воде протекать по трубе с небольшой скоростью, а затем с помощью крана 5 подать краситель в поток воды, то увидим, что введенный в трубе краситель не будет перемешиваться с потоком воды. Струйка красителя будет отчетливо видна вдоль всей трубы, выполненной из оргстекла, что указывает на слоистый характер течения жидкости и на отсутствие перемешивания. Такое течение жидкости называется ламинарным (рис. 2.1, а).

При постепенном увеличении скорости течения воды в трубе 2 путем дальнейшего открытия вентиля 3 картина течения вначале не меняется, но затем при предельной скорости течения наступает быстрое, внезапно ее изменение. Струйка красителя начинает колебаться, затем размываться и перемешиваться с потоком воды, при этом становятся заметными вихреобразование и вращательное движение жидкости. Такое течение жидкости называется турбулентным (рис. 2.1, б).

Если уменьшить скорость потока, то восстанавливается ламинарное течение.

2. Определить режим движения жидкости путем нахождения числа Рейнольдса и сопоставления его с критическим значением.

Средняя скорость потока воды $v_{\text{ср}}$ определяется весовым способом путем измерения массы вытекаемой воды m за время τ :

$$v_{\text{ср}} = \frac{Q}{\omega}, \quad (2.2)$$

где Q - расход жидкости, $\text{м}^3/\text{с}$; ω - площадь поперечного сечения трубы, м^2 .

$$Q = \frac{m}{\rho\tau}, \quad (2.3)$$

где ρ – плотность воды, $\text{кг}/\text{м}^3$.

Для трубы с круглой формой поперечного сечения площадь ω определяется по формуле:

$$\omega = \frac{\pi d^2}{4}, \quad (2.4)$$

где d – диаметр трубопровода, м.

Результаты измерений и вычислений занести в таблицу 2.1. Сопоставляются результаты визуального наблюдения и расчета режима течения жидкости.

Таблица 2.1 - Результаты лабораторных измерений и вычислений

№ п/п	m	τ	Q	$u_{\text{ср}}$	Re	Режим течения
	кг	с	м ³ /с	м/с	-	
1						
2						
3						
4						

Вопросы для самопроверки

1. Написать формулу для определения числа Рейнольдса.
2. Назвать единицу измерения числа Рейнольдса.
3. Чему равно критическое число Рейнольдса?
4. При каком режиме течения жидкости в трубах наблюдается пульсация скоростей и давлений?
5. Назвать основные гидравлические характеристики потока жидкости.
6. Написать формулу для определения расхода жидкости весовым способом.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 3.

ГИДРАВЛИЧЕСКИЕ ПОТЕРИ ПРИ ЛАМИНАРНОМ ТЕЧЕНИИ В ТРУБЕ

Цель работы: ознакомиться с экспериментальными методами определения коэффициента гидравлического трения, научиться устанавливать зависимость между потерями напора на трение и средней скоростью движения жидкости в трубе постоянного диаметра при ламинарном режиме.

Задание: на основании экспериментальных данных определить зависимость между потерями напора на трение и средней скоростью движения жидкости в трубе постоянного диаметра при ламинарном режиме. Косвенным путём определить вязкость рабочей жидкости.

Сведения, необходимые для выполнения работы

Ламинарное течение жидкости является строго упорядоченным течением без перемешивания частиц жидкости, без пульсаций скоростей и давлений. При таком течении все линии тока вполне определяются формой трубопровода, по которому течёт жидкость. При ламинарном течении жидкости в прямой трубе постоянного сечения все линии тока направлены параллельно оси трубопровода. В поперечном сечении потока продольные скорости изменяются по параболическому закону. Режим течения жидкости характеризуется числом Рейнольдса:

$$Re = \frac{v_{\text{ср}} d}{\nu}, \quad (3.1)$$

где $v_{\text{ср}}$ - средняя скорость течения жидкости, м/с; d – диаметр трубопровода, м; ν – кинематический коэффициент вязкости жидкости, м²/с.

При ламинарном режиме $Re < Re_{\text{кр}}$, где критическое число Рейнольдса $Re_{\text{кр}} = 2300$.

Движение вязкой жидкости по трубам и каналам всегда сопровождается трением, на преодоление которого затрачивается часть механической энергии потока. В ходе работы против сил трения эта часть энергии преобразуется в

теплоту и рассеивается в окружающей среде. В результате полный напор, то есть удельная механическая энергия, вдоль потока уменьшается. Падение полного напора, которое наблюдается на участках трубопроводов с установившимся равномерным движением жидкости, относят к так называемым потерям по длине. Величина этих потерь h_l (м) определяется по формуле Дарси – Вейсбаха:

$$h_l = \lambda \frac{l}{d} \frac{v_{cp}^2}{2g}, \quad (3.2)$$

где λ – коэффициент гидравлического трения (коэффициент Дарси); l – длина трубопровода, м; d – диаметр трубопровода, м; v_{cp} – средняя скорость течения жидкости, м/с; g – ускорение свободного падения, м/с².

Эта формула справедлива как для ламинарного, так и для турбулентного режимов движения жидкости, однако коэффициент трения по длине λ не является величиной постоянной и зависит от режима течения жидкости и шероховатости внутренней поверхности трубы (канала).

Коэффициент гидравлического трения λ для ламинарного потока вычисляется по формуле:

$$\lambda = \frac{64}{Re}, \quad (3.3)$$

тогда формулу (3.2) можно записать в виде:

$$h_l = \frac{32\nu l v_{cp}}{gd^2}. \quad (3.4)$$

При постоянной температуре рабочей жидкости её вязкость не изменяется $\nu = const$, и зависимость потерь напора от средней скорости можно представить как:

$$h_l = a v_{cp}, \quad (3.5)$$

где $a = \frac{32\nu l}{gd^2}$.

Порядок выполнения работы

1. Схема экспериментальной установки представлена на рис. 3.1. Вязкая жидкость (минеральное масло) движется по горизонтальному трубопроводу 1, в двух сечениях которого на расстоянии $l = 0,5$ м измеряется перепад давления при помощи дифференциального манометра 2.

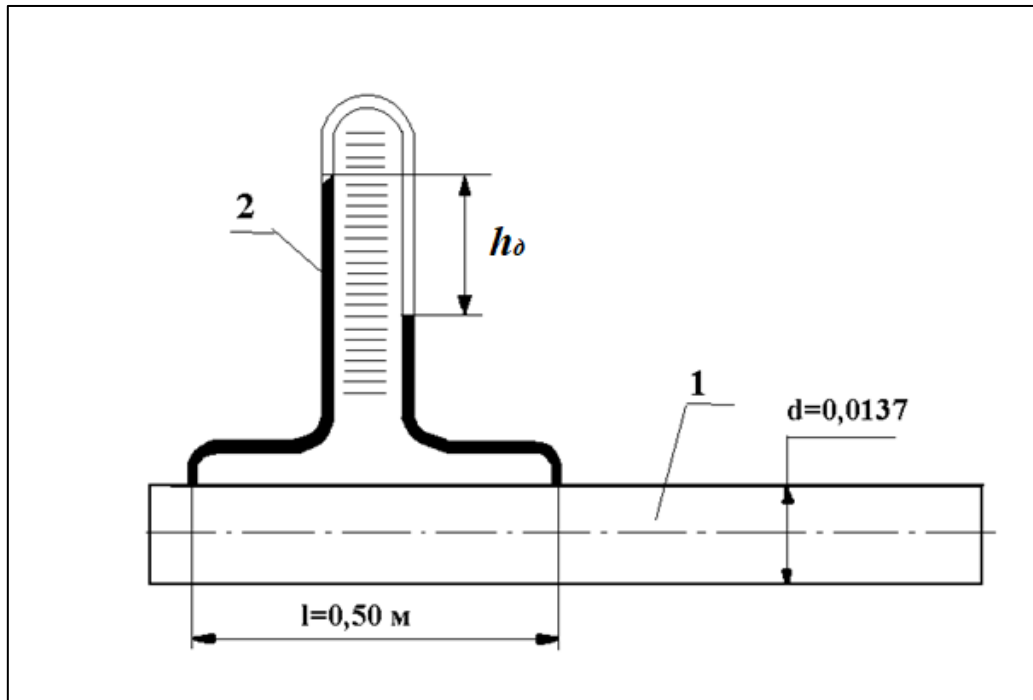


Рис. 3.1. Схема экспериментальной установки

2. Гидравлические потери напора на трение h_l в горизонтальной трубе постоянного диаметра d на участке длиной l при установившемся движении жидкости равны разности пьезометрических напоров в начале и конце участка. Так как дифференциальный манометр показывает именно эту разность, то его показания $h_d = h_l$.

Средняя скорость жидкости в каждом опыте определяется весовым способом, путём измерения массы вытекаемой жидкости m за время τ :

$$v_{\text{ср}} = \frac{Q}{\omega}, \quad (3.6)$$

где Q - расход жидкости, $\text{м}^3/\text{с}$; ω - площадь поперечного сечения трубы, м^2 .

$$Q = \frac{m}{\rho\tau}, \quad (3.7)$$

где ρ - плотность жидкости, $\text{кг}/\text{м}^3$.

Для трубы с круглой формой поперечного сечения площадь ω определяется по формуле:

$$\omega = \frac{\pi d^2}{4}, \quad (3.8)$$

где d – диаметр трубопровода, м.

3. Используя экспериментальные данные определить вязкость рабочей жидкости косвенным путём из выражения (3.4). Определить число Рейнольдса по формуле (3.1).

4. По полученным экспериментальным данным построить график зависимости выражения $h_l = f(v_{\text{ср}})$ (рис. 3.2). По графику определить численное значение коэффициента пропорциональности a .

5. По полученным данным построить зависимость $Q = f(h_d)$ (рис. 3.3).

6. Результаты измерений и вычислений занести в табл. 3.1.

Таблица 3.1 - Результаты лабораторных измерений и вычислений

№	m	τ	h_d	Q	$v_{\text{ср}}$	ν	a	Re
	кг	с	м	м ³ /с	м/с	м ² /с	-	-
1								
2								
3								
4								
5								
6								

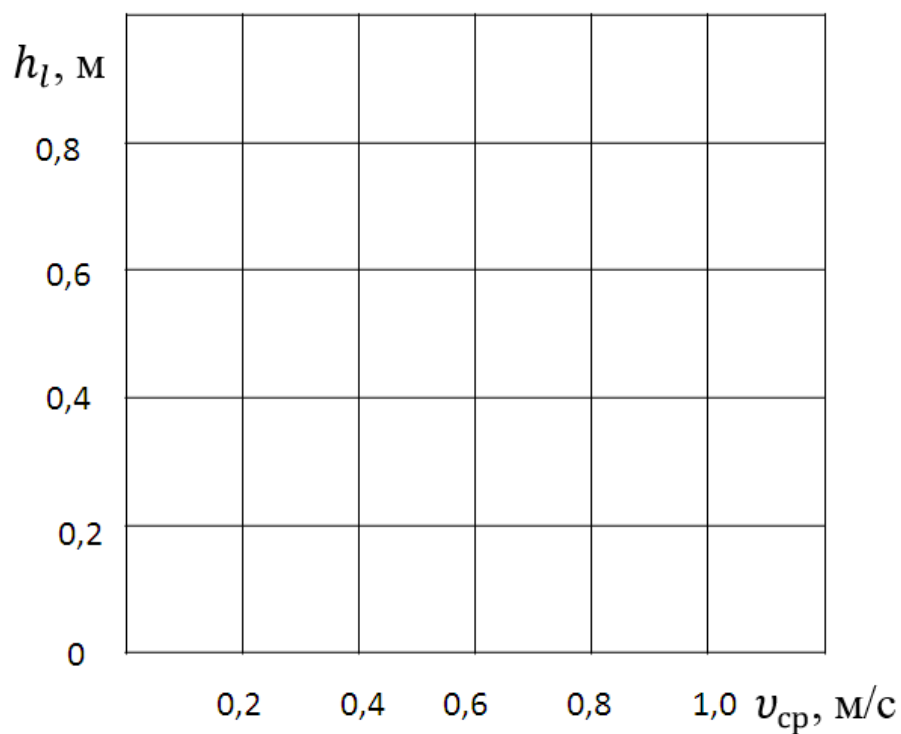


Рис. 3.2. График экспериментальной зависимости $h_l = f(v_{cp})$

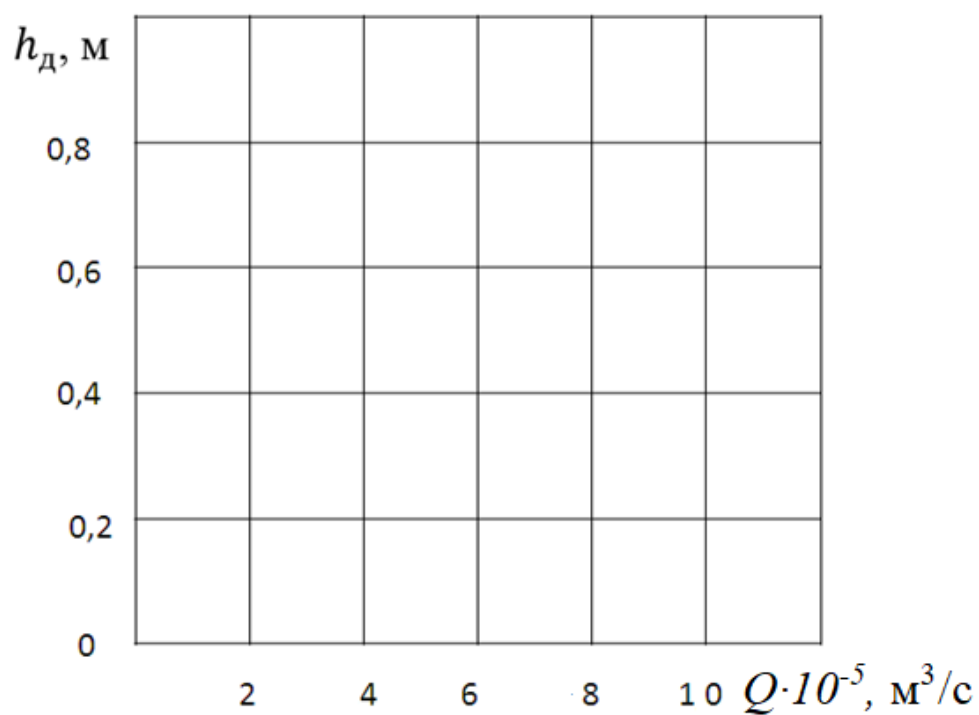


Рис. 3.3. График экспериментальной зависимости $Q = f(h_d)$

Вопросы для самопроверки

1. Почему при движении жидкости по прямому трубопроводу постоянного сечения возникают потери напора?
2. Какие факторы влияют на коэффициент потерь на трение при ламинарном режиме?
3. Чему равно критическое число Рейнольдса?
4. В каких единицах измеряются потери напора по длине трубопровода?
5. В каких единицах измеряется коэффициент потерь на трение?
6. Написать формулу для определения потерь напора по длине трубопровода.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 4.

ГИДРАВЛИЧЕСКИЕ ПОТЕРИ ПРИ ТУРБУЛЕНТНОМ ТЕЧЕНИИ В ТРУБЕ

Цель работы: ознакомиться с экспериментальными методами определения коэффициента гидравлического трения, научиться устанавливать зависимость между потерями напора на трение и средней скоростью движения жидкости в трубе постоянного диаметра при турбулентном режиме.

Задание: на основании экспериментальных данных определить зависимость между потерями напора на трение и средней скоростью движения жидкости в трубе постоянного диаметра при турбулентном режиме.

Сведения, необходимые для выполнения работы

Турбулентное течение жидкости сопровождается интенсивным перемешиванием частиц жидкости, пульсациями скоростей и давлений. Одновременно с продольным перемещением жидкости вдоль оси потока происходит поперечное перемещение и вращательное движение отдельных объёмов жидкости. Этим и объясняются пульсации скоростей и давлений. Режим течения жидкости характеризуется числом Рейнольдса:

$$Re = \frac{v_{\text{ср}} d}{\nu}, \quad (4.1)$$

где $v_{\text{ср}}$ - средняя скорость течения жидкости, м/с; d – диаметр трубопровода, м; ν – коэффициент кинематической вязкости жидкости, м²/с.

Значение числа Рейнольдса, при котором происходит переход от ламинарного движения к турбулентному, называют критическим числом Рейнольдса и обозначают $Re_{\text{кр}}$. Наиболее часто в расчетах принимают для критического числа Рейнольдса значение $Re_{\text{кр}} = 2300$, отвечающее переходу движения жидкости из турбулентного в ламинарное, при переходе движения из ламинарного в турбулентное критическое число Рейнольдса имеет большую величину. Таким образом, при турбулентном режиме $Re > Re_{\text{кр}}$.

На практике турбулентное течение обычно имеет место в трубопроводах систем отопления, водоснабжения и др., где движущаяся среда имеет малую вязкость.

Потери напора на трение h_l (м) при турбулентном течении жидкости в трубопроводе определяются по формуле Дарси – Вейсбаха:

$$h_l = \lambda \frac{l v_{\text{ср}}^2}{d 2g}, \quad (4.2)$$

где λ – коэффициент гидравлического трения (коэффициент Дарси); l – длина трубопровода, м; d – диаметр трубопровода, м; $v_{\text{ср}}$ - средняя скорость течения жидкости, м/с; g – ускорение свободного падения, м/с².

Эта формула справедлива как для ламинарного, так и для турбулентного режимов движения жидкости, но коэффициент трения по длине λ зависит от двух параметров: от числа Рейнольдса Re и относительной шероховатости внутренней поверхности трубопровода ($\bar{\Delta} = \Delta/d$). Характер зависимости $\lambda = f(Re, \bar{\Delta})$ определяется соотношением между толщиной ламинарного пограничного слоя δ и высотой бугорков шероховатости поверхности Δ и численным значением числа Рейнольдса. Экспериментально установлено наличие при турбулентном течении следующих зон сопротивления:

1) зона гидравлически гладких труб ($\delta > \Delta$), коэффициент трения по длине λ зависит от числа Рейнольдса Re ;

2) зона шероховатых труб или квадратичная область сопротивления ($\delta > \Delta$), коэффициент трения по длине λ зависит от относительной шероховатости внутренней поверхности трубопровода $\bar{\Delta}$;

3) область движения, в которой коэффициент трения по длине λ зависит и от числа Рейнольдса Re , и от относительной шероховатости $\bar{\Delta}$, называют переходной.

Для гидравлически гладких труб широкое распространение получила формула Блазиуса:

$$\lambda = \frac{0,3164}{Re^{0,25}}. \quad (4.3)$$

Для шероховатых труб применяют формулу Б.Л. Шифринсона:

$$\lambda = 0,11 \left(\frac{\Delta_э}{d} \right)^{0,25}, \quad (4.4)$$

где $\Delta_э$ – эквивалентная шероховатость, м; d – диаметр трубопровода, м.

В переходной области сопротивления коэффициент Дарси можно определить по формуле В.Д. Альтшуля:

$$\lambda = 0,11 \left(\frac{\Delta_э}{d} + \frac{68}{Re} \right)^{0,25}. \quad (4.5)$$

Порядок выполнения работы

1. Схема экспериментальной установки представлена на рис. 4.1. Вода движется по горизонтальному трубопроводу l , в двух сечениях которого на расстоянии $l=0,4$ м измеряется перепад давления h_d при помощи дифференциального манометра 2.

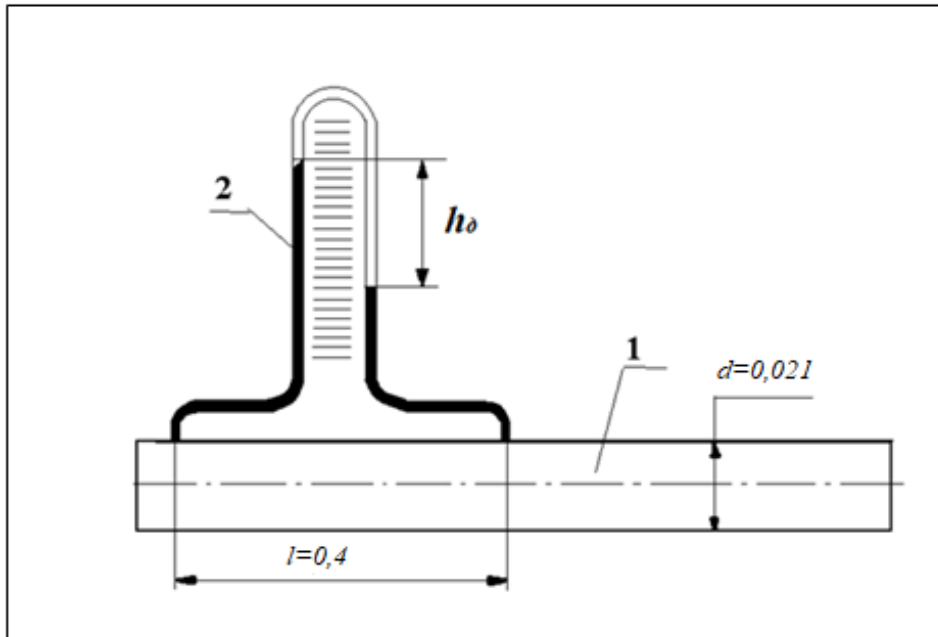


Рис. 4.1. Схема экспериментальной установки

2. Гидравлические потери напора на трение h_l в горизонтальной трубе постоянного диаметра d на участке длиной l при установившемся движении жидкости равны разности пьезометрических напоров в начале и конце участка. Так как дифференциальный манометр показывает именно эту разность, то его показания $h_d = h_l$.

3. Средняя скорость жидкости v_{cp} в каждом опыте определяется объёмным способом. При этом измеряется объём жидкости в мерном баке V (m^3) по показанию уровнемера h_y и время его заполнения τ по электросекундомеру. Объём мерного бака рассчитывается по эмпирической зависимости:

$$V = (20 + 15,5h_y)10^{-3}, \quad (4.6)$$

где h_y – показания уровнемера, дм.

Расход жидкости определяется как

$$Q = \frac{V}{\tau}, \quad (4.7)$$

а средняя скорость по формуле

$$v_{cp} = \frac{Q}{\omega}, \quad (4.8)$$

где ω - площадь поперечного сечения трубы, m^2 .

Для трубы с круглой формой поперечного сечения площадь ω определяется по формуле:

$$\omega = \frac{\pi d^2}{4}, \quad (4.9)$$

где d – диаметр трубопровода, м.

4. Зависимость потерь напора на трение h_l от средней скорости жидкости v_{cp} можно представить в виде:

$$h_l = av_{cp}^n, \quad (4.10)$$

где численные значения коэффициента пропорциональности a и показателя степени n зависят от режима движения жидкости.

Показатель степени n можно найти по формуле:

$$n = \frac{\lg(h_{li} - h_{lj})}{\lg(v_{cpi} - v_{cpj})}, \quad (4.11)$$

где h_{li} и h_{lj} – значения потерь напора на трение двух любых точек графика, м; v_{cpi} и v_{cpj} – значения средней скорости двух любых точек графика, соответствующих h_{li} и h_{lj} , м/с.

Из формулы (4.10) определить численное значение коэффициента пропорциональности a .

5. По полученным экспериментальным данным построить график зависимости выражения $h_l = f(v_{cp})$ (рис. 4.2).

6. По полученным данным построить зависимость $Q = f(h_d)$ (рис. 4.3).

7. Результаты измерений и вычислений занести в табл. 4.1.

Таблица 4.1 – Результаты лабораторных измерений и вычислений

№	h_d	τ	h_y	V	Q	v_{cp}	λ_3	a	Re
	м	с	дм	м ³	м ³ /с	м/с	-	-	-
1									
2									
3									
4									
5									
6									

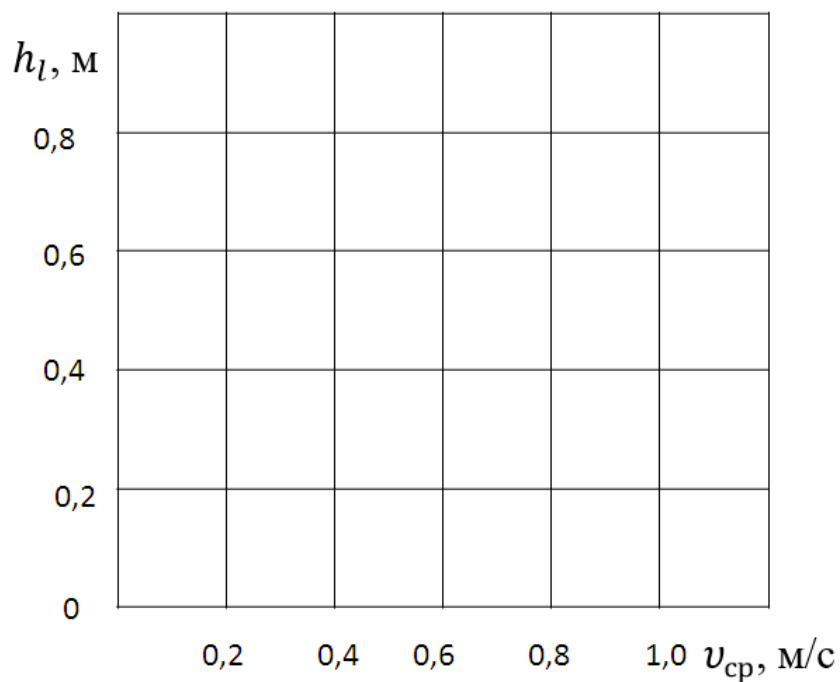


Рис. 4.2. График экспериментальной зависимости $h_l = f(v_{cp})$

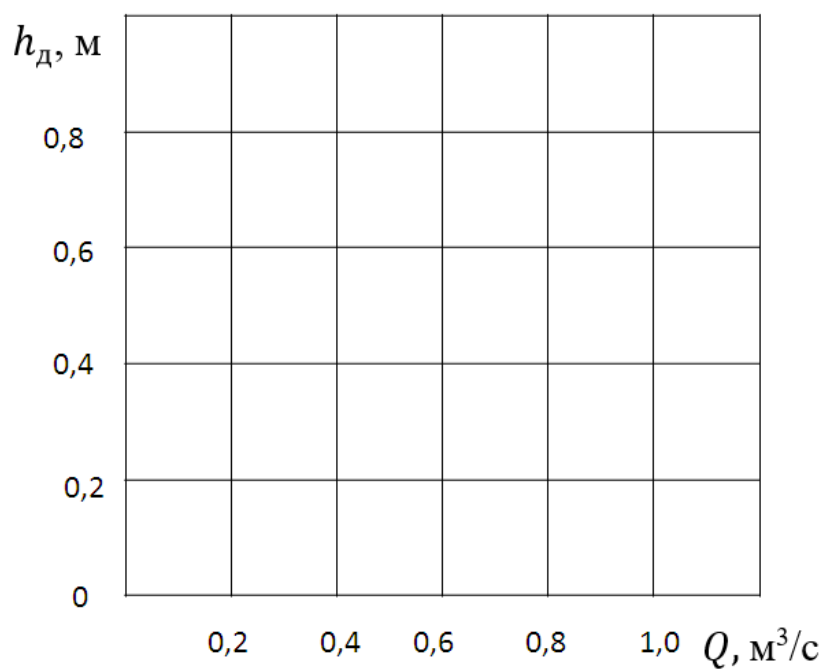


Рис. 4.3. График экспериментальной зависимости $Q = f(h_d)$

Вопросы для самопроверки

1. Написать формулу Дарси-Вейсбаха.
2. Назвать зоны сопротивления при турбулентном режиме движения.
3. От каких двух параметров зависит коэффициент трения по длине λ при турбулентном движении жидкости?
4. Написать формулу для нахождения числа Рейнольдса.

5. Написать формулу, по которой определялся расход жидкости в данной лабораторной работе.

6. Написать формулу Б.Л. Шифринсона.

7. В какой зоне сопротивления коэффициент трения по длине λ зависит от относительной шероховатости внутренней поверхности трубопровода $\bar{\Delta}$?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 5.

ТАРИРОВКА ДРОССЕЛЬНОГО РАСХОДОМЕРА

Цель работы: ознакомиться с назначением и устройством дроссельных расходомеров, с методом измерения расхода жидкости в напорных трубопроводах; с экспериментальными методами определения коэффициента расхода дроссельного расходомера.

Задание: ознакомиться с назначением и устройством дроссельных расходомеров, с методом измерения расхода жидкости в напорных гидромагистралях; Выполнить тарировку дроссельного расходомера (сопла), т.е. экспериментально установить зависимость расхода жидкости от перепада давления; экспериментально установить влияние числа Рейнольдса на коэффициент расхода μ дроссельного расходомера (сопла) при турбулентном режиме течения жидкости в гидромагистрали.

Сведения, необходимые для выполнения работы

Дроссельные расходомеры (рис. 5.1) предназначены для определения расхода жидкости, протекающей в напорных трубопроводах, представляют собой обычные местные сопротивления, при прохождении жидкости через которые происходит увеличение скорости и уменьшение давления в узком сечении потока жидкости за счёт внезапного (рис. 5.1, а) или постепенного (рис. 5.1, б, в) сужения площади поперечного сечения дроссельного расходомера.

Для вывода основного уравнения расхода жидкости, протекающей через сужающие устройства, используется уравнение Бернулли, составленное для

сечений 1–1 и 2–2. Сечение 1–1 выбирается перед сужающим устройством, а сечение 2–2 – в сжатом сечении. Плоскость сравнения проводится по оси трубопровода. С учетом того, что рассматривается турбулентный режим движения жидкости и $Q_1 = Q_2$, будет получена зависимость:

$$Q = \mu \omega_0 \sqrt{2gh_d}, \quad (5.1)$$

где μ – коэффициент расхода дроссельного расходомера; ω_0 – площадь поперечного сечения узкой части дроссельного расходомера, м^2 ; g – ускорение свободного падения, $\text{м}/\text{с}^2$; h_d – разность пьезометрических напоров до и после дроссельного расходомера, численно равная показанию дифференциального манометра, м.

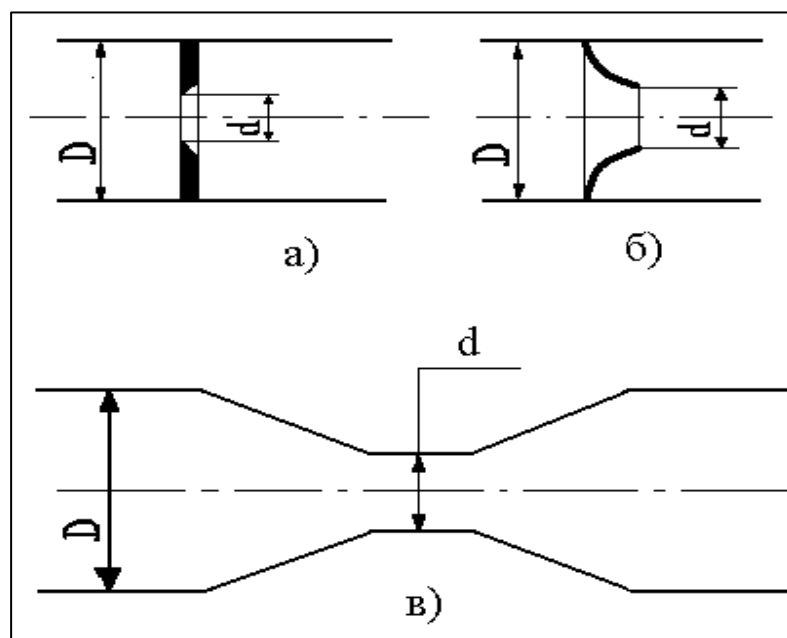


Рис. 5.1. Схема дроссельных расходомеров:

а) диафрагма; б) сопло; в) труба Вентури

Так как $\sqrt{2gh_d}$ – теоретическая скорость истечения жидкости через дроссельный расходомер, то $Q_T = \omega_0 \sqrt{2gh_d}$, а коэффициент расхода μ показывает отношение действительного расхода Q к теоретически возможному Q_T :

$$\mu = \frac{Q}{Q_T}. \quad (5.2)$$

Порядок выполнения работы

1. В данной лабораторной установке в качестве дроссельного расходомера используется сопло. Схема лабораторной установки представлена на рис. 5.2. Вода движется по горизонтальному трубопроводу, в двух сечениях которого измеряется перепад давления h_d при помощи дифференциального манометра.

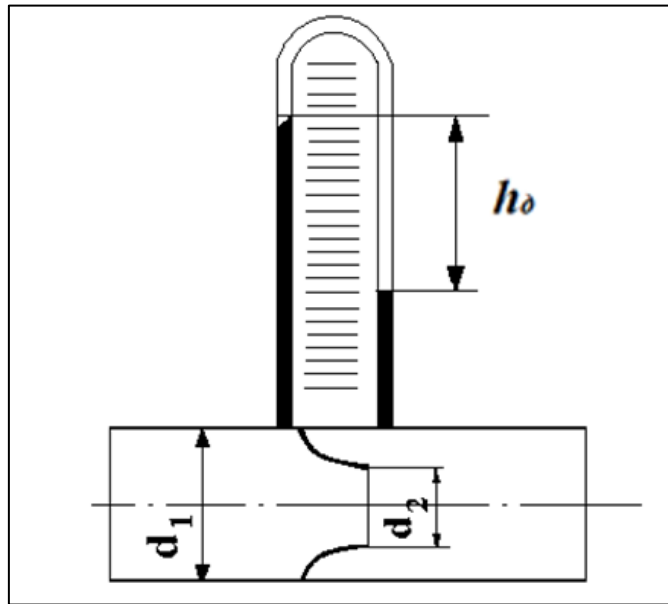


Рис. 5.2. Схема экспериментальной установки

2. В процессе каждого опыта расход жидкости, протекающей по трубопроводу диаметром d_1 , определяется объёмным способом. При этом измеряется объём жидкости в мерном баке V по показанию уровнемера h_y и время его заполнения τ по электросекундомеру. Объём мерного бака рассчитывается по эмпирической зависимости:

$$V = (20 + 15,5h_y)10^{-3}, \quad (5.3)$$

где h_y – показания уровнемера, дм.

Расход жидкости определяется как

$$Q = \frac{V}{\tau}, \quad (5.4)$$

средняя скорость по формуле

$$v_{\text{ср}} = \frac{Q}{\omega}, \quad (5.5)$$

где ω - площадь поперечного сечения трубы, м^2 .

Для трубы с круглой формой поперечного сечения площадь ω определяется по формуле:

$$\omega = \frac{\pi d^2}{4}, \quad (5.6)$$

где d – диаметр трубопровода, м.

3. Число Рейнольдса, характеризующее режим течения жидкости в трубопроводе, определяется как

$$Re = \frac{v_{\text{ср}} d}{\nu}, \quad (5.7)$$

где $v_{\text{ср}}$ - средняя скорость течения жидкости, м/с; d – диаметр трубопровода, м; ν – коэффициент кинематической вязкости жидкости, м²/с.

4. Численное значение коэффициента расхода μ определить по формуле (5.1).

5. По полученным в результате расчета данным построить графики зависимости $Q = f(h_d)$ и $\mu = f(Re)$ (рис. 5.3-5.4).

6. Результаты измерений и вычислений занести в табл. 5.1.

Таблица 5.1 – Результаты лабораторных измерений и вычислений

№	h_d	τ	h_y	V	Q	$v_{\text{ср}}$	$\sqrt{2gh_d}$	μ	Re
	м	с	дм	м ³	м ³ /с	м/с	м/с	-	-
1									
2									
3									
4									
5									
6									

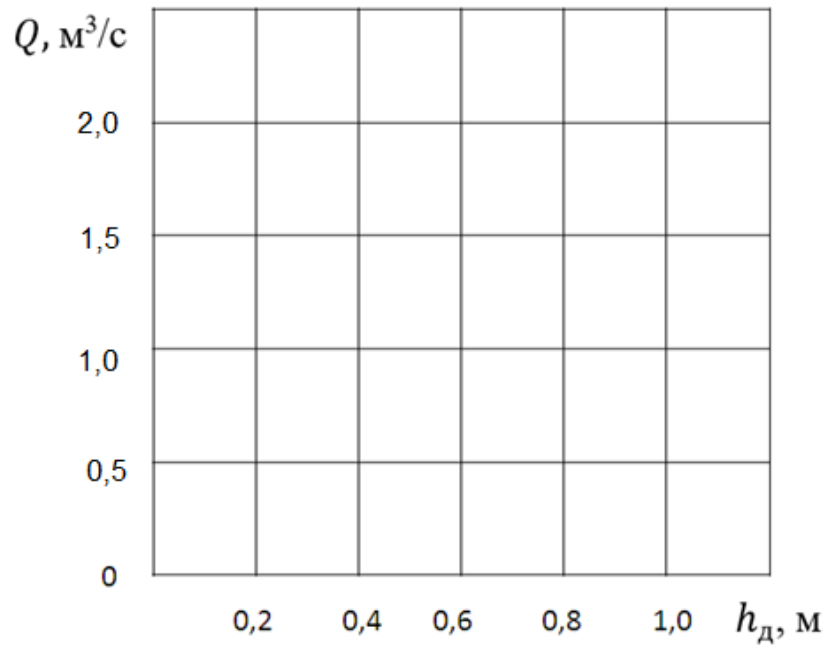


Рис. 5.3. График зависимости $Q = f(h_d)$

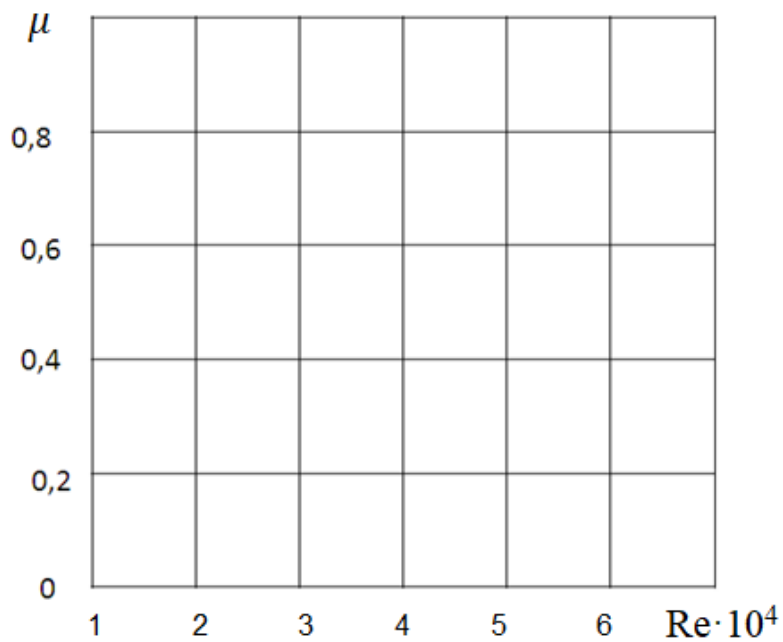


Рис. 5.4. График зависимости $\mu = f(Re)$

Вопросы для самопроверки

1. Что такое тарировочная зависимость?
2. Написать формулу, по которой определялось численное значение коэффициента расхода μ .
3. Написать формулу для нахождения числа Рейнольдса.

4. В каких единицах измеряется коэффициент расхода μ ?
5. Что такое местные сопротивления? Какие они бывают?
6. Что такое дроссельные расходомеры, для чего они предназначены?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 6.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОДОПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ МАЛОГО ОТВЕРСТИЯ И НАСАДКА

Цель работы: ознакомиться с экспериментальными методами определения коэффициентов сжатия струи, расхода и скорости при установившемся истечении жидкости из отверстия в тонкой стенке и цилиндрического насадка.

Задание: ознакомиться с гидравлическим расчетом и физической картиной истечения жидкости из отверстия в тонкой стенке и цилиндрического насадка.

Сведения, необходимые для выполнения работы

В гидравлике различают истечение через отверстия в тонкой стенке и толстой стенке (насадке). Отверстием в тонкой стенке называют такое отверстие, у которого края имеют острую кромку, а толщина стенки не влияет на форму и условия истечения струи. Насадком называют короткий патрубок, присоединенный к отверстию в тонкой стенке. По форме насадки бывают цилиндрические, конические и коноидальные. Также различают внешние и внутренние насадки, сходящиеся и расходящиеся.

При протекании через отверстие в тонкой стенке возникают только местные потери, связанные с изменением формы потока. При истечении струи жидкости через малое отверстие в тонкой стенке наблюдается сжатие вытекающей струи на выходе из отверстия (рис. 6.1), которое оценивается коэффициентом сжатия ε , представляющим собой отношение площади сжатой струи ω_c к площади отверстия ω_0 :

$$\varepsilon = \frac{\omega_c}{\omega_0}. \quad (6.1)$$

Для отверстия коэффициент сжатия струи $\epsilon < 1$.

При движении жидкости внутри насадка образуется сжатое сечение, в области которого наблюдается вакуум. В связи с образованием вакуума насадок увеличивает пропускную способность отверстия. При работе насадка струя, сжатая в его середине (сечение 1-1 рис. 6.2), успевает на выходе расшириться и вытекает полным сечением, равным площади сечения насадка, т.к. на выходе из цилиндрического насадка сжатия струи не происходит (сечение 2-2 рис. 6.2). Для насадка коэффициент сжатия струи $\epsilon = 1$.

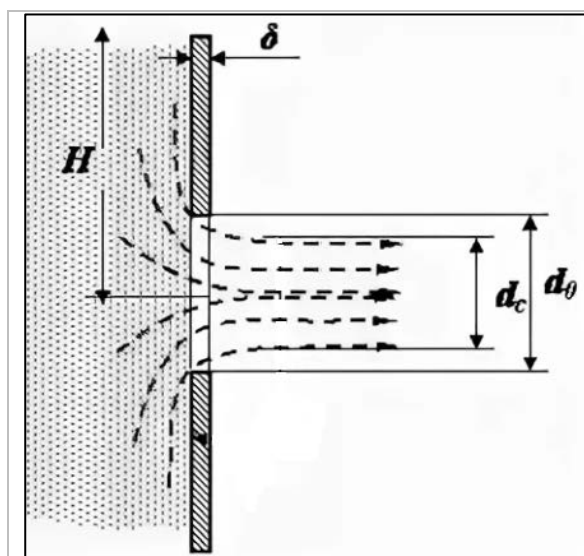


Рис. 6.1. Схема истечения струи жидкости из отверстия в тонкой стенке

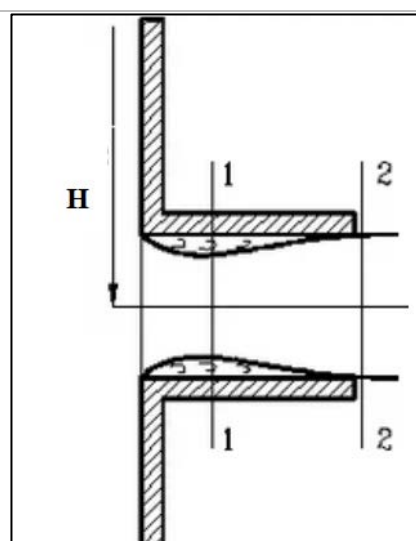


Рис. 6.2. Схема истечения струи жидкости из цилиндрического насадка

Скорость v вытекающей из отверстия и насадка струи определяется как:

$$v = \varphi \sqrt{2gH}, \quad (6.2)$$

а расход Q жидкости

$$Q = \mu \omega \sqrt{2gH}, \quad (6.3)$$

где φ – коэффициент скорости; μ – коэффициент расхода; ω – площадь поперечного сечения узкой части дроссельного расходомера, м^2 ; g – ускорение свободного падения, $\text{м}/\text{с}^2$; H – напор, под которым происходит истечение жидкости, м ; $\sqrt{2gH}$ – скорость истечения идеальной жидкости из отверстия при напоре H , $\text{м}/\text{с}$.

Связь между коэффициентами сжатия струи ε , скорости φ и расхода μ имеет следующий вид:

$$\mu = \varepsilon\varphi. \quad (6.4)$$

Следовательно, для цилиндрического насадка $\varepsilon = 1$, $\mu = \varphi$.

Порядок выполнения работы

1. Установка для изучения истечения через отверстие в тонкой стенке и цилиндрического насадка состоит из напорного бака 1, на передней стенке которого имеется гнездо с диком с различными отверстиями и насадками 2. При истечении струя жидкости попадает в сборный резервуар 3, при этом измеряются значения координат X , Y с помощью измерительной линейки. Величина напора определяется по показаниям уровнемера 4.

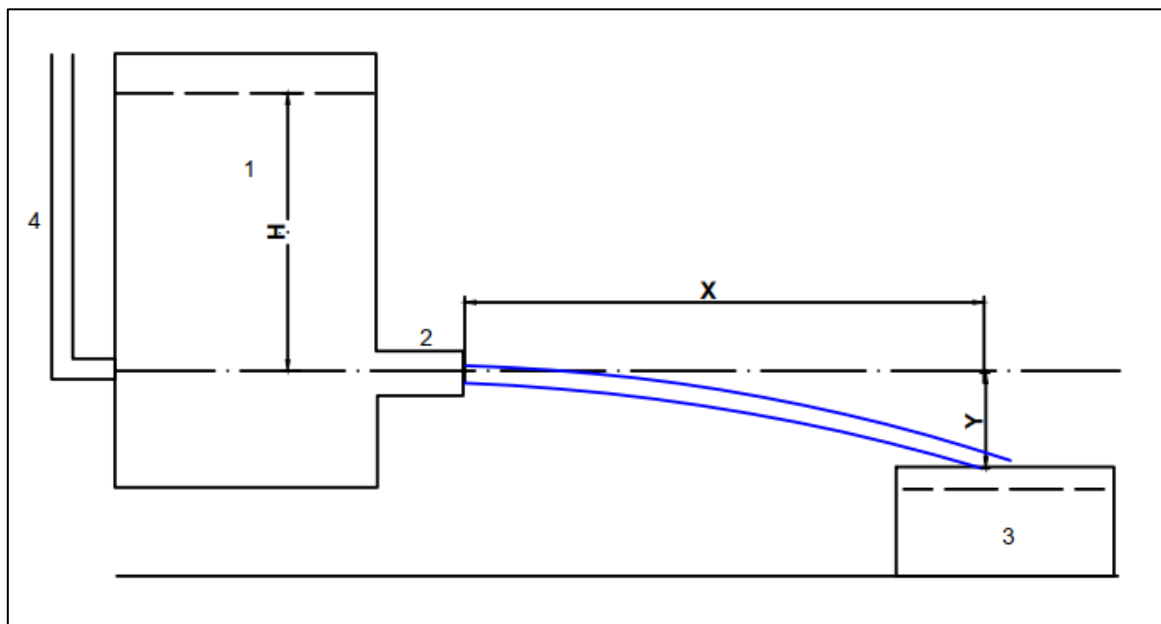


Рис. 6.3. Схема экспериментальной установки

2. Экспериментальную скорость истечения струи из отверстия в тонкой стенке и насадка можно вычислить по формуле:

$$v = X \sqrt{\frac{g}{2Y}}, \quad (6.5)$$

где g – ускорение свободного падения, м/с^2 ; X , Y – координаты сечения струи, м.

3. В процессе каждого опыта расход жидкости определяется по формуле:

$$Q = \frac{m}{\rho\tau}, \quad (6.6)$$

где m - масса (кг) вытекаемой воды за время τ (с); ρ – плотность воды, кг/м³.

4. Коэффициент скорости φ можно вычислить по формулам:

$$\varphi = \frac{X}{2\sqrt{YH}} \quad (6.7) \text{ или } \varphi = \frac{v}{\sqrt{2gH}} \quad (6.8)$$

где X, Y - координаты сечения струи, м; H – напор, м; v – экспериментальная скорость, определённая по формуле (6.5), м/с; $\sqrt{2gH}$ – теоретическая скорость, м/с.

5. Коэффициент расхода μ определяется по формуле:

$$\mu = \frac{Q}{\omega\sqrt{2gH}}, \quad (6.9)$$

где Q – расход жидкости, м³/с; ω - площадь поперечного сечения отверстия или насадка, м²; g – ускорение свободного падения, м/с²; H – напор, м.

Площадь ω определяется по формуле:

$$\omega = \frac{\pi d^2}{4}, \quad (6.10)$$

где d – диаметр отверстия или насадка, м.

6. Коэффициент сжатия струи ε определяется как

$$\varepsilon = \frac{\mu}{\varphi}, \quad (6.11)$$

где μ - коэффициент расхода; φ – коэффициент скорости.

7. По полученным в результате расчета данным построить графики зависимости $Q = f(H)$ при истечении жидкости через отверстие в тонкой стенке и насадка (рис. 6.4).

8. Результаты измерений и вычислений занести в табл. 6.1.

Таблица 6.1 – Результаты лабораторных измерений и вычислений

Экспериментальные данные					Результаты вычислений					
m	τ	H	X	Y	v	$\sqrt{2gH}$	Q	φ	μ	ε
кг	с	м	м	м	м/с	м/с	м ³ /с	-	-	-
внешний цилиндрический насадок										
1										
2										
3										
отверстие в тонкой стенке										
1										
2										
3										

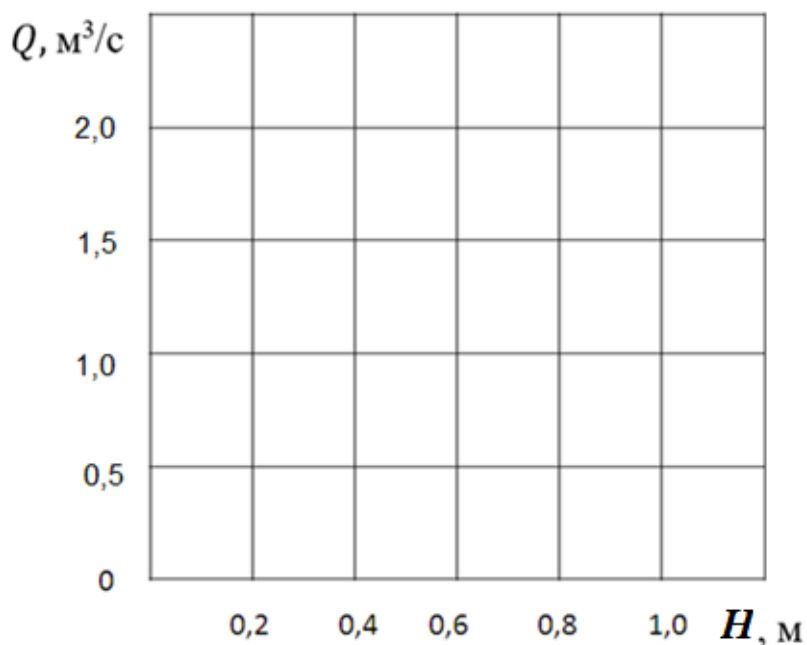


Рис. 6.4. График зависимости $Q = f(H)$

Вопросы для самопроверки

1. Какие отверстия называются малыми?
2. Написать формулу, по которой определялось численное значение коэффициента расхода μ .
3. Дать определение что такое «насадок», его разновидности?
4. Чему равен коэффициент сжатия ε на выходе из насадка?
5. Пропускная способность насадка больше или меньше, чем отверстия в тонкой стенке при прочих равных условиях?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 7.

ГИДРАВЛИЧЕСКИЙ УДАР В НАПОРНОМ ТРУБОПРОВОДЕ

Цель работы: изучить явление гидравлического удара в напорном трубопроводе.

Задание: экспериментальным путем определить скорость распространения ударной волны.

Сведения, необходимые для выполнения работы

Гидравлический удар представляет собой колебательный процесс, возникающий в упругом трубопроводе с малосжимаемой жидкостью при внезапном изменении ее скорости. Этот процесс является быстротечным и характеризуется чередованием резких повышений и понижений давления.

Если в конце трубы, по которой движется жидкость со скоростью u_0 и давлением p_0 , произвести мгновенное закрытие крана, скорость частиц жидкости, наталкивающихся на кран, будет погашена, а их кинетическая энергия перейдет в работу деформации стенок трубы и жидкости. На заторможенные частицы жидкости у крана набегает другие, соседние с ними частицы, вызывая сжатие жидкости и рост давления, который будет с некоторой скоростью распространяться в сторону противоположную направлению скорости движения жидкости. В результате чего сечение $n-n$ перемещается влево со скоростью прохождения зоны повышенного давления (рис. 7.1). Сама же область, в которой давление изменяется на величину $\Delta p_{уд}$, называется ударной волной. Когда ударная волна достигнет резервуара, жидкость начнет вытекать из трубопровода за счет разности давления в трубе ($p = p_0 + \Delta p_{уд}$) и в резервуаре p_0 . Вытекая из трубы, жидкость будет стремиться оторваться от крана, вследствие чего возникает отрицательная ударная волна ($p = p_0 - \Delta p_{уд}$), которая движется от крана также со скоростью C . После подхода ударной волны пониженного давления к резервуару,

возникает её обратное движение в сторону крана и весь процесс повторяется, то есть возникает ситуация, которая имело место в момент закрытия крана.

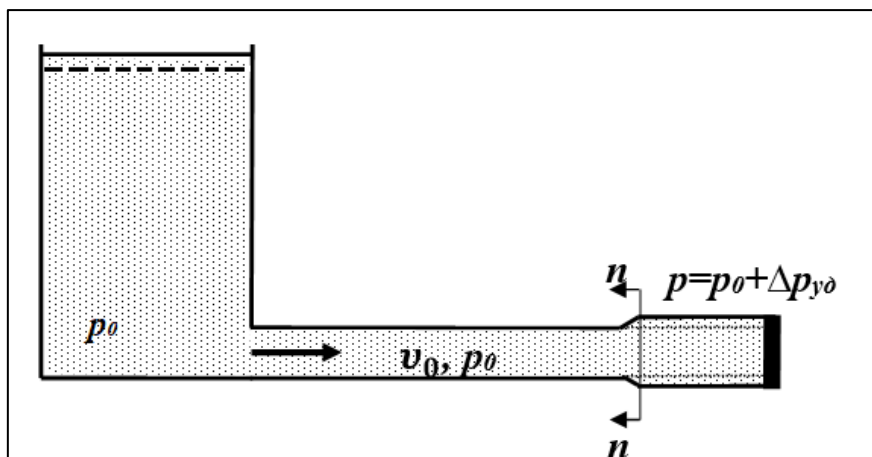


Рис. 7.1. К изучению гидравлического удара

Теоретическое и экспериментальное исследование гидравлического удара в трубопроводах впервые было проведено учёным Николаем Егоровичем Жуковским в 1899 г., в его опытах было зарегистрировано 12 полных циклов с постоянным уменьшением давления вследствие потерь энергии.

Согласно исследованиям Н.Е. Жуковского, величина ударного давления $\Delta p_{уд}$ при прямом ударе определяется как

$$\Delta p_{уд} = \rho v_0 C, \quad (7.1)$$

где ρ – плотность жидкости, кг/м³; v_0 – скорость в трубе до удара, м/с; C – скорость распространения ударной волны, м/с.

Формула (7.1) справедлива при очень быстром закрытии крана, когда время закрытия $t_{закр}$

$$t_{закр} < t_0 = \frac{2l}{C}, \quad (7.2)$$

где t_0 – фаза гидравлического удара, l – длина трубопровода, м; C – скорость распространения ударной волны, м/с.

Порядок выполнения работы

1. Лабораторная установка состоит из напорного бака, откуда вода поступает в трубопровод, а затем сливается в мерный бак. В конце трубопровода установлена задвижка, обеспечивающая быстрое перекрытие

потока жидкости, и индикатор давления M , фиксирующий значения давления у задвижки.

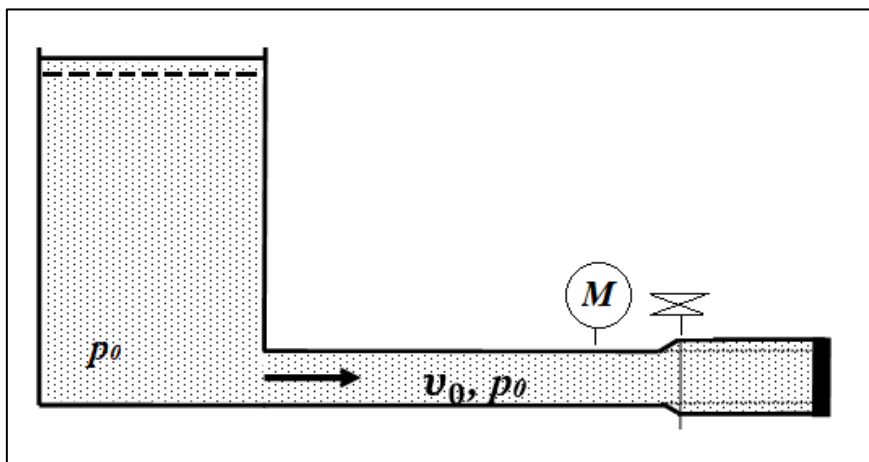


Рис. 7.2. Схема экспериментальной установки

2. При установившемся течении жидкости в трубопроводе определить расход жидкости объемным способом. Для этого измеряется объем жидкости в мерном баке V по показанию уровнемера h_y и время его заполнения τ по электросекундомеру. Объем мерного бака рассчитывается по эмпирической зависимости:

$$V = (20 + 15,5h_y)10^{-3}, \quad (7.3)$$

где h_y – показания уровнемера, дм.

Расход жидкости Q определяется как

$$Q = \frac{V}{\tau}, \quad (7.4)$$

где V – объем жидкости, м³; ω - площадь поперечного сечения трубы, м².

3. Экспериментальную скорость течения в трубе v_0 можно вычислить по формуле:

$$v_0 = \frac{Q}{\omega} \quad (7.5)$$

где Q - расход жидкости, м³/с; ω - площадь поперечного сечения трубы, м².

Для трубы с круглой формой поперечного сечения площадь ω определяется по формуле:

$$\omega = \frac{\pi d^2}{4}, \quad (7.5)$$

где d – диаметр трубопровода, м.

4. Перекрывают быстрозапорный кран и по индикатору давления определяют величину ударного давления. Пружина индикатора рассчитана так, что один миллиметр подъема конца стрелки индикатора соответствует повышению давления на 10^5 Па. Таким образом, измерив записанный стрелкой индикатора вертикальный отрезок Δh в миллиметрах, определяют величину ударного давления $\Delta p_{уд}$.

5. По величине ударного давления $\Delta p_{уд}$ и средней скорости жидкости v_0 в трубопроводе из формулы Н.Е. Жуковского (7.1) определяется скорость распространения ударной волны C .

6. Результаты измерений и вычислений занести в табл. 7.1.

Таблица 7.1 – Результаты лабораторных измерений и вычислений

№	h_y	τ	Δh	V	Q	v_0	$\Delta p_{уд}$	C
	дм	с	мм	м ³	м ³ /с	м/с	Па	м/с
1								

Вопросы для самопроверки

1. В каких случаях в напорном трубопроводе может наблюдаться явление гидравлического удара?
2. Написать формулу, по которой определялась скорость распространения ударной волны.
3. Вода является малосжимаемой или сжимаемой жидкостью?
4. Численное значение скорости распространения ударной волны больше или меньше скорости в трубопроводе до гидравлического удара?
5. В каких единицах измеряется скорость распространения ударной волны?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 8. ОПЫТНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ШЕРОХОВАТОСТИ РУСЛА

Цель работы: ознакомиться с физической картиной движения жидкости в открытом русле и установить влияние шероховатости стенок на пропускную способность потока.

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

Сведения, необходимые для выполнения работы

При равномерном движении жидкости в открытом русле средняя скорость v в сечении ω определяется по формуле Шези:

$$v = C\sqrt{Ri}, \quad (8.1)$$

где C – коэффициент Шези, $\text{м}^{0.5}/\text{с}$; R – гидравлический радиус, м ; i – уклон русла.

Гидравлический радиус R определяется по формуле:

$$R = \frac{\omega}{\chi}, \quad (8.2)$$

где χ – смоченный периметр, м , ω – площадь живого сечения, м^2 .

Определение смоченного периметра производят по формуле:

$$\chi = b + 2h, \quad (8.3)$$

где b – ширина русла по дну, м ; h – глубина потока, м ,
площадь живого сечения определяют по формуле:

$$\omega = b \cdot h. \quad (8.4)$$

Используя общее выражение для расхода $Q = \omega \cdot v$, получим основную расчетную зависимость при гидравлическом расчете открытых русел

$$Q = \omega C\sqrt{Ri}. \quad (8.5)$$

Широкое распространение для определения коэффициента скорости Шези C с учетом коэффициента шероховатости n получили формулы

И.И. Агроскина и Н.Н. Павловского (для квадратичной области сопротивления).

$$\text{Агроскин: } C = \frac{1}{n} + 17,72 \lg R. \quad (8.6)$$

$$\text{Павловский: } C = \frac{1}{n} R^y, \quad (8.7)$$

где y – показатель степени, определяется по формуле

$$y = 2,5\sqrt{n} - 0,13 - 0,75\sqrt{R}(\sqrt{n} - 0,1). \quad (8.8)$$

Часто n принимают равным $\frac{1}{6}$ (по Маннингу).

Область сопротивления выясняется сравнением числа Рейнольдса Re_{Π} в потоке с $Re_{\text{кв}}$, определяемым по формуле

$$Re_{\text{кв}} = 21,6 \cdot C \frac{4R}{\Delta}, \quad (8.9)$$

где Δ - высота выступов шероховатости, измеренная в натуре.

Число Рейнольдса для потока определяется через гидравлический радиус

$$Re_{\Pi} = \frac{vR}{\nu}, \quad (8.10)$$

где v - средняя скорость движения жидкости; ν – кинематический коэффициент вязкости.

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

Порядок выполнения работы

1. Уклон i дна лотка определяется нивелированием или измерением глубин в лотке, заполненном водой, находящейся в покое. В последнем случае мерными иглами (шпиценмасштабами) измеряются две глубины: в начальном и конечном сечениях лотка и по разности глубин Δh , отнесенной к расстоянию l между сечениями, определяется уклон дна $i = \frac{\Delta h}{l}$.

При проведении этих измерений небольшая утечка воды из лотка через концевой затвор, герметичность которого обычно не обеспечивается, не имеет практического значения, так как уклон свободной поверхности при этом настолько мал, что ее (свободную поверхность) можно принять горизонтальной.

2. После определения уклона дна через лоток пропускается произвольный расход Q , определяемый по тарировочной кривой мерного водослива, или водомерного устройства. При помощи затвора в конце лотка устанавливается равномерное движение при пропускаемом расходе Q .

Для этого в двух створах на произвольном расстоянии в лотке измеряются глубины h_1 и h_2 двумя шпигенмасштабами одновременно, и маневрированием затвора устанавливается равномерное движение, при котором глубины в створах будут одинаковы $h_1 = h_2$.

Так как при уклоне i , расходе Q и ширине лотка b возможна только единственная глубина h_0 равномерного движения, то установление ее в лотке занимает длительное время. Для ускорения можно глубину h_0 предварительно вычислить по формулам (вычисленное значение h_0 будет приближенным и уточнится опытом).

3. При измеренных i , Q , b и h_0 вычисляются средняя скорость v и коэффициент Шези из опыта

$$C = \frac{v}{\sqrt{Ri}}. \quad (8.11)$$

4. При найденном опытном значении C можно определить коэффициент шероховатости n по И. И. Агроскину:

$$n = \frac{1}{C - 17,72 \lg R}. \quad (8.12)$$

Для получения более достоверной величины коэффициента шероховатости n рекомендуется произвести измерения глубин при нескольких расходах Q и вычислить среднеарифметическое значение $n_{ср}$.

Полученное опытное значение $n_{ср}$ следует сравнить со справочным для соответствующей шероховатости русла. Все измерения заносятся в протокол исследований.

Для выяснения области сопротивления определяется $Re_{п}$ и $Re_{кв}$.

Вопросы для самопроверки

1. Написать формулу для определения коэффициента Шези по формуле Павловского.
2. Написать формулу, по которой определялся гидравлический радиус в данной работе.
3. В каких единицах измеряется гидравлический радиус?
4. В каких единицах измеряется коэффициент Шези?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 9.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАСХОДОВ МЕРНЫМИ ВОДОСЛИВАМИ С ОСТРЫМ РЕБРОМ

Цель работы: изучить процесс прохождения жидкости через водослив с острой стенкой, овладеть навыками определения расхода воды при истечении через треугольный и трапецеидальный водосливы.

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

Сведения, необходимые для выполнения работы

Водослив - гидротехническое сооружение в виде препятствия или горизонтального стеснения, через которое происходит перелив воды.

Водосливы с тонкой стенкой (острой кромкой) широко применяются при проведении изысканий, опытов в гидравлических лабораториях в качестве измерителей расхода жидкости, а также как элементы комплексных гидроузлов.

Водослив с тонкой стенкой - водослив, условия перелива воды через который определяется только верховой гранью стенки, при этом толщина ребра $\delta \leq 0,5 H$ не влияет на форму переливающейся струи.

При истечении через водослив с тонкой стенкой струя может принимать различные формы: свободную, отжатую, подтопленную снизу, прилипшую и волнистую (рис. 9.1).

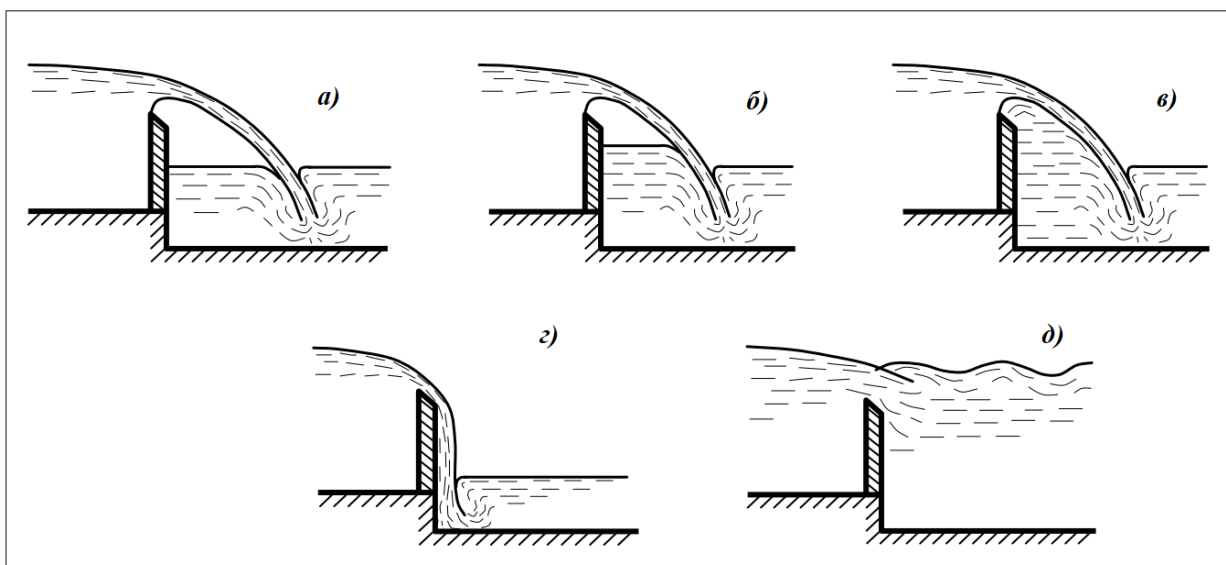


Рис. 9.1. Формы струи при истечении через водослив с тонкой стенкой:

а) свободная; б) отжатая; в) подтопленная снизу;

г) прилипшая; д) волнистая

Если в подструйное пространство имеется свободный доступ воздуха, благодаря чему давление под струей равно атмосферному, то в этом случае струя считается свободной и расход обладает значительной устойчивостью.

Если воздух не может свободно поступать в подструйное пространство, он постепенно выносится, давление под струей понижается, струя поджимается к водосливной стенке, колеблется, расход пульсирует, такая струя считается отжатой.

Из-за образования вакуума под отжатой струей уровень воды под ней повышается и при некоторых условиях все подструйное пространство заполняется водой, т.е. струя, подтопленная снизу.

Если при малых расходах струя в условиях медленного нарастания напора на водосливе под действием давления и поверхностного натяжения стекает по нижней грани водослива, полностью прижмется к стенке, то она называется прилипшей.

В случае затопления водослива, когда бытовая глубина потока в нижнем бьефе $h_б$ превышает высоту порога водослива P , а сопряжение в

нижнем бьефе происходит в виде надвинутого гидравлического прыжка, возникает волнистая струя.

На практике применяются следующие водосливы: прямоугольный без бокового сжатия, прямоугольный с боковым сжатием, треугольный, трапецидальный (рис. 9.2).

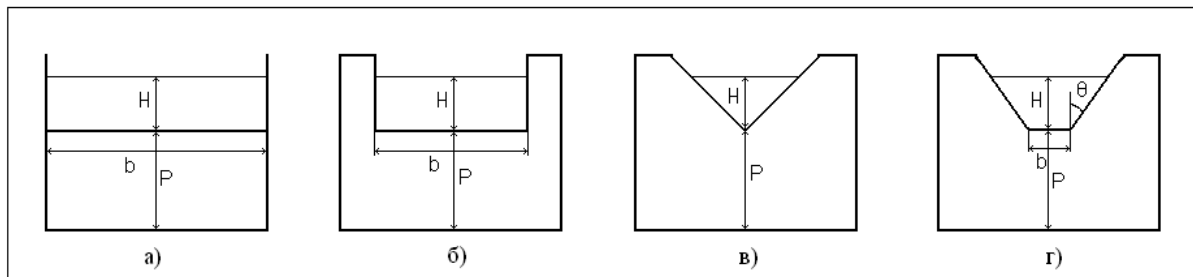


Рис. 9.2. Водосливы с тонкой стенкой

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

H – напор на водосливе, м; P – высота порога, м; b – ширина водослива, м

Выбор водослива зависит от величины пропускаемых расходов и условий лаборатории. Прямоугольные водосливы (рис. 9.2, а) рассматриваются отдельно в работе 10.

Для неподтопленного треугольного водослива расход Q определяется по формуле:

$$Q = m_0 t g \frac{\theta}{2} \sqrt{2g} H^{5/2}, \quad (9.1)$$

где m_0 – коэффициент расхода, который зависит от величины угла при вершине θ .

В формуле 9.1 скорость подхода учтена в коэффициенте расхода m_0 , коэффициенты расхода m_0 и m связывает зависимость:

$$\frac{m}{m_0} = \left(\frac{H}{H_0} \right)^{3/2}. \quad (9.2)$$

Треугольные водосливы обычно выполняют с углом $\theta = 90^\circ$, и такой водослив называется водосливом Томсона. По опытам Томсона для

треугольного водослива при $\theta = 90^\circ$ и $H=0,05 \div 0,25$ м наблюдалась стабильность коэффициента $m=0,316$ ($m_0 \operatorname{tg} \frac{\theta}{2} = 0,316$).

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

а) по Я. Томсону

$$Q = 1,4H^{5/2}, \quad (9.3)$$

б) по Х. Кингу

$$Q = 1,343H^{2,47}. \quad (9.4)$$

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

$$Q = 1,331 \left(\operatorname{tg} \frac{\theta}{2} \right)^{0,996} H^{2,47}. \quad (9.5)$$

Эти формулы дают практически точные результаты при напорах H в пределах $0,05 \dots 0,25$ м. Напор $H = 0,05$ м соответствует расходу $Q = 0,78$ л/с, поэтому, когда требуется измерить малые расходы, применяют треугольный водослив. При измерениях рекомендуется, чтобы $P \geq 0,2$ м, скорость подхода менее $0,5$ м/с.

Трапецидальные водосливы пропускают расходы большие, чем треугольные при одинаковых напорах, характеризуются также очень устойчивыми значениями коэффициента расхода. Расход через такие водосливы определяется с учетом угла наклона боковых ребер водослива и коэффициента расхода.

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

$$Q = m_0(b_0 + 0,8H \operatorname{tg} \theta) \sqrt{2g} H^{3/2}. \quad (9.6)$$

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

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

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

$$Q = 1,86 b H^{3/2}, \quad (9.7)$$

где b - ширина водослива, м.

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

Измерительные водосливы не рекомендуется применять при напорах $H < 5-7$ см, потому что при малых напорах наблюдается прилипание струи к нижней грани и формулы для определения расхода становятся недействительными

Порядок выполнения работы

Работа проводится в гидравлическом лотке.

1. Измеряются ширины трапецеидального водослива b и b_0 , угол θ для треугольного и трапецеидального водосливов.

2. Открытием регулирующей задвижки устанавливается расход воды в лотке Q , который определяется объемным способом по формуле:

$$Q = \frac{V}{\tau}, \quad (9.8)$$

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

3. Определяется напор на водосливе H . Для этого надо шпигельмасштабом измерить отметку свободной поверхности воды перед водосливом ($\nabla_{УВВБ}$) на таком расстоянии от ребра водослива, где спад свободной поверхности практически не заметен (это расстояние примерно равно трем напорам). Затем измерить отметку порога водослива (∇_P) – в нижней точке и вычислить напор H как разность отметок поверхности воды и порога водослива.

4. При определенном напоре H , известных углах θ и ширине b или b_0 трапецидального водослива вычисляются расходы Q по формулам.

5. Результаты измерений и вычислений заносятся в табл. 9.1-9.2.

6. Для каждого из водосливов фактический расход сравнивается с вычисленным по формуле.

7. По данным табл. 9.1 строятся графические зависимости $Q=f(H)$ для треугольного и трапецидального водосливов (рис. 9.1).

8. На эти графики наносятся расчетные точки, полученные по формулам (9.3 - 9.4) и (9.6 - 9.7) (табл. 9.2).

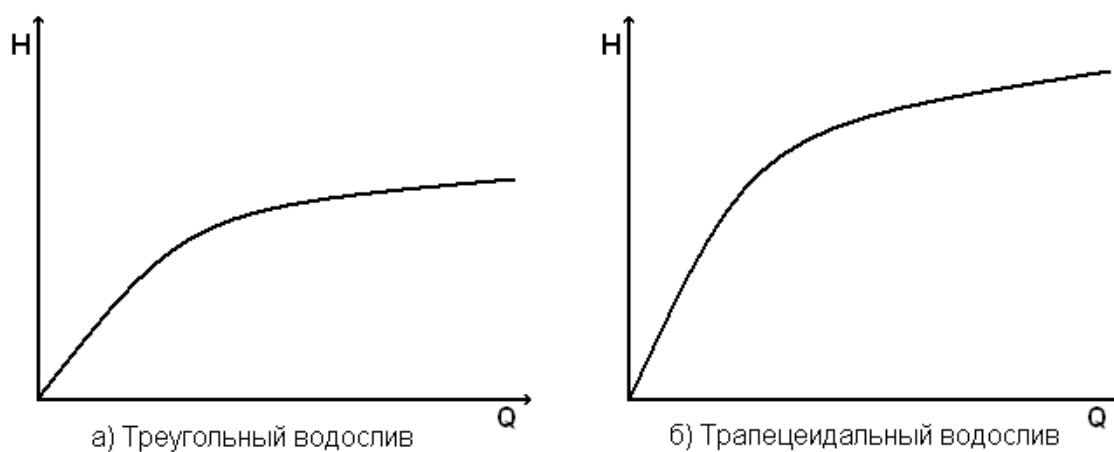


Рис. 9.1. Зависимость $Q=f(H)$

Таблица 9.1 – Протокол исследований

№ опыта	Объем, V , м ³	Время, τ , с	Расход, Q , м ³ /с	Уровень воды в верхнем бьефе, ∇ УВВБ, м	Отметка порога, ∇ Р, м	Напор, H , м
<i>Треугольный водослив</i>						
1						H_1
2						H_2
3						H_3
4						H_4
5						H_5
<i>Трапецеидальный водослив</i>						
1						H_1
2						H_2
3						H_3
4						H_4
5						H_5

Таблица 9.2 – Расходы, вычисленные по расчетным зависимостям

Расчетная формула	Напор, H , м					Расход, Q , м ³ /с					
	Номер опыта	H_1	H_2	H_3	H_4	H_5	Q_1	Q_2	Q_3	Q_4	Q_5
<i>Треугольный водослив</i>											
$Q = 1,4 H^{3/2}$											
$Q = 1,343 H^{2,47}$											
<i>Трапецеидальный водослив</i>											
$Q = 1,86 b H^{3/2}$											
$Q = m_0(b + 0,8H \operatorname{tg} \theta) \sqrt{2g} H^{3/2}$											

Вопросы для самопроверки

1. Что такое водослив?
2. Что такое водослив с тонкой стенкой?
3. Какие водосливы (трапецеидальный или треугольный) пропускают большие расходы при одинаковых напорах?
4. Начертить схему свободного истечения через водослив с тонкой стенкой.
5. Начертить схему истечения через водослив с тонкой стенкой с прилипшей струёй.
6. Начертить схему трапецеидального водослива с указанием всех основных параметров (ширина по дну, напор над водосливом и т.д.)
7. Какой зависимостью связаны коэффициенты расхода m_0 и m ?
8. Как определялся напор над водосливом в данной работе?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 10.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА РАСХОДА ПРЯМОУГОЛЬНОГО ВОДОСЛИВА С ОСТРЫМ РЕБРОМ

Цель работы: ознакомиться с процессом прохождения жидкости через прямоугольный водослив с острым ребром, овладеть навыками определения коэффициента расхода воды опытным путем.

Задание: определить коэффициенты расхода водослива без бокового сжатия m_0 , с боковым сжатием m_c , коэффициент подтопления σ_n .

Сведения, необходимые для выполнения работы

Водосливы с острой стенкой прямоугольного очертания (рис. 10.1) широко применяются в лабораторной практике. Это объясняется тем, что коэффициенты расхода водосливов с острой стенкой оказываются очень устойчивыми и мало зависят от конструктивного оформления острой кромки.

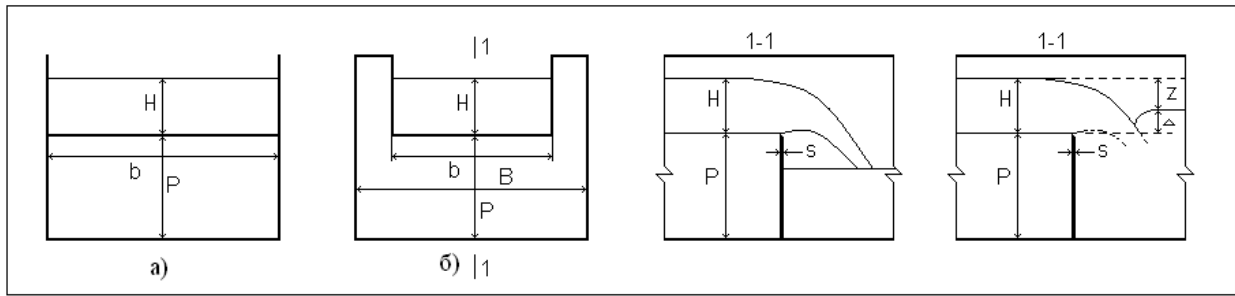


Рис. 10.1. Водосливы с острым ребром без бокового (а) и с боковым сжатием (б): H – напор на водосливе, м; P – высота порога, м; b – ширина водослива, м; B – ширина лотка (русла), м; S – толщина стенки, м

Уравнение для водослива с острым ребром без бокового сжатия (рис.10.1, а) имеет вид;

$$Q = m_o b \sqrt{2g} H^{\frac{3}{2}}, \quad (10.1)$$

где m_o – коэффициент расхода, учитывающий влияние скорости подхода; b – ширина водослива, м; H – напор перед водосливом, м.

Значение коэффициента расхода прямоугольного водослива без бокового сжатия колеблется в пределах $m_o = 0,4 \div 0,5$.

Коэффициент расхода m_o можно определить по эмпирической формуле Базена:

$$m_o = \left(0,405 + \frac{0,003}{H} \right) \cdot \left[1 + 0,55 \frac{H^2}{(H+P)^2} \right], \quad (10.2)$$

где H – напор перед водосливом, м; P – высота ребра перед водосливом, м.

Для того, чтобы ошибка при определении расхода с помощью совершенного водослива составляла не более 1%, необходимо, чтобы b , P , H находились в следующих экспериментально изученных диапазонах: $0,2 \text{ м} < b < 2 \text{ м}$; $0,05 \text{ м} < H < 1,24 \text{ м}$; $0,24 \text{ м} < P < 1,13 \text{ м}$ (P – высота ребра перед водосливом).

При $H \leq (0,05 \div 0,07) \text{ м}$ струя становится прилипшей и явление перестает соответствовать истечению через совершенный водослив.

Для водослива с боковым сжатием (рис. 10.1, б), когда ширина водослива b меньше ширины лотка B , расход будет меньше, через совершенный водослив, при одних и тех же значениях H и B . В уравнение водослива (10.1) вместо m_o вводится коэффициент расхода m_c , который определяется по эмпирической формуле Эгли:

$$m_c = \left(0,405 + \frac{0,003^*}{H} - 0,03 \frac{B-b}{B}\right) \cdot \left[1 + 0,55 \left(\frac{b}{B}\right)^2 \left(\frac{H}{H+P}\right)^2\right], \quad (10.3)$$

Примечание: * По опытам Эгли может быть принято значение 0,0027.

Значение коэффициента расхода m_c меньше, чем m_o , так как струя на гребне водослива теряет часть энергии при сжатии в плане.

Если непосредственно за ребром водослива уровень воды выше его кромки (на величину Δ), то водослив будет подтопленным, и для определения расхода в этом случае в формулу (10.1) вводится коэффициент подтопления σ_n , определяемый по эмпирической формуле Базена (при $0,15 \leq \frac{H}{P} \leq 1,9$ и $0 < \frac{\Delta}{P} \leq 1,6$):

$$\sigma_n = 1,05 \left(1 + 0,2 \frac{\Delta}{P}\right)^3 \sqrt{\frac{z}{H}}, \quad (10.4)$$

где z – разность уровней воды перед водосливом и за водосливом, м.

Порядок выполнения работы

Работа проводится в гидравлическом лотке.

1. Измеряются ширины водослива b и лотка B .
2. Через водослив без бокового сжатия, установленный в прямоугольном лотке, пропускается расход Q , величина которого определяется объемным способом:

$$Q = \frac{V}{\tau}, \quad (10.5)$$

где V – объем жидкости, м³; τ – время прохождения жидкости через данное поперечное сечение, с.

Струя, переливающаяся через ребро водослива, должна быть свободной. Внутри, между струей и стенкой водослива, должно быть атмосферное давление, для чего пространство под струей соединяется с внешней средой трубкой, введенной под струю.

3. Определяется напор на водосливе H . Для этого надо измерить отметку свободной поверхности воды перед водосливом, затем измерить отметку порога водослива в низшей точке и вычислить напор H как разность отметок поверхности воды и порога водослива.

4. Из уравнения расхода (10.1) при опытных значениях величин определяется коэффициент m_o и сравнивается со значением m_o , вычисленным по формуле Базена (10.2).

5. Определение коэффициента расхода m_c для водослива с боковым сжатием выполняется в таком же порядке, как и для водослива без бокового сжатия. При измеренных Q , b (ширине водослива), H определяется опытное значение

$$m_c = \frac{Q}{b\sqrt{2gH^3}} \quad (10.6)$$

и сравнивается с вычисленным m_c по формуле Эгли (10.3).

6. Подтопление водослива обеспечивается маневрированием концевого затвора на лотке. Уровень поверхности потока за водосливом должен быть установлен выше ребра водослива, и если опыт проводится при прежнем расходе Q , установленном для неподтопленного водослива, то напор по мере подтопления водослива будет увеличиваться.

При этом следует учесть, что чем большее подтопление создается затвором ($\Delta \rightarrow Z$), тем дальше устанавливаются стабильные уровни воды перед водосливом, при которых можно производить их измерение.

После того, как уровни установятся, измеряются напор H , разность уровней воды Z и разность отметок уровня нижнего бьефа и ребра водослива Δ .

7. Опытный коэффициент подтопления определяется из выражения:

$$\sigma_{\Pi} = \frac{Q}{m_o b \sqrt{2gH^{\frac{3}{2}}}} \quad (10.7)$$

при значении m_o , полученном для неподтопленного водослива.

При наличии бокового сжатия в формулу (10.7) подставляют вместо коэффициента расхода m_o коэффициент расхода m_c .

8. Затем вычисляется коэффициент σ_{Π} по формуле Базена (10.4) и сравнивается с полученным из опыта.

9. Измеренные и вычисленные значения заносятся в табл. 10.1

Таблица 10.1 – Протокол исследований

Водосливы	Измеренные								
	$b, м$	$B, м$	$V, м^3$	$\tau, с$	$\nabla_{УВВБ}, м$	$\nabla_{УВНБ}, м$	$\nabla_P, м$	$\Delta, м$	$Z, м$
<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>	<i>7</i>	<i>8</i>	<i>9</i>	<i>10</i>
без сжатия									
неподтопленный									
подтопленный									
со сжатием									
неподтопленный									
подтопленный									

Таблица 10.1 – Протокол исследований (продолжение)

Водосливы	Экспериментальные					Расчетные		
	$Q, \text{м}^3/\text{с}$	$H, \text{м}$	m_o	m_c	$\sigma_{\text{п}}$	m_o	m_c	$\sigma_{\text{п}}$
<i>1</i>	<i>11</i>	<i>12</i>	<i>13</i>	<i>14</i>	<i>15</i>	<i>16</i>	<i>17</i>	<i>18</i>
без сжатия								
неподтопленный								
подтопленный								
со сжатием								
неподтопленный								
подтопленный								

Вопросы для самопроверки

1. Написать общее уравнение для водослива с острым ребром без бокового сжатия.
2. Как определялась разность уровней воды Z в данной работе?
3. Значение какого коэффициента расхода будет больше: m_c или m_o ? Почему?
4. Какие прямоугольные водосливы (со сжатием или без сжатия) пропускают большие расходы при одинаковых напорах и ширине лотка?
5. Начертить схему истечения через прямоугольный подтопленный водослив с указанием всех основных параметров (ширина, напор над водосливом и т.д.)
6. Начертить схему прямоугольного водослива со сжатием с указанием всех основных параметров.
7. Как определялось значение Δ в данной работе? Для определения какой величины используется это значение?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 11.

ИСТЕЧЕНИЕ ЧЕРЕЗ ВОДОСЛИВ ПРАКТИЧЕСКОГО ПРОФИЛЯ

Цель работы: изучить процесс прохождения жидкости через водослив практического профиля.

Задание: получить экспериментальную зависимость изменения коэффициента расхода водослива практического профиля от изменения напора H при неподтопленном истечении; определить величину коэффициента подтопления σ_n при различных степенях подтопления водослива Δ/H_0 ; определить коэффициент скорости φ водослива.

Сведения, необходимые для выполнения работы

Водослив практического профиля - водослив, условия перелива воды через который определяется очертаниями его верховой грани и водосливной

поверхности [СП 290.1325800.2016 Водопусковые гидротехнические сооружения (водосбросные, водоспускные и водовыпускные). Правила проектирования].

По форме профиля делятся на: водосливы с профилем, очерченным по форме падающей струи; водосливы с уширенным горизонтальным гребнем; водосливы распластанного профиля.

Водосливы практического профиля (рис. 11.1) широко применяются в гидротехническом строительстве при плотинах, представляющих собой одно из основных гидротехнических сооружений. Наибольшее применение на практике имеют водосливы криволинейных форм, в которых профиль водослива стремятся сделать близким к очертаниям нижней поверхности переливающейся струи жидкости.

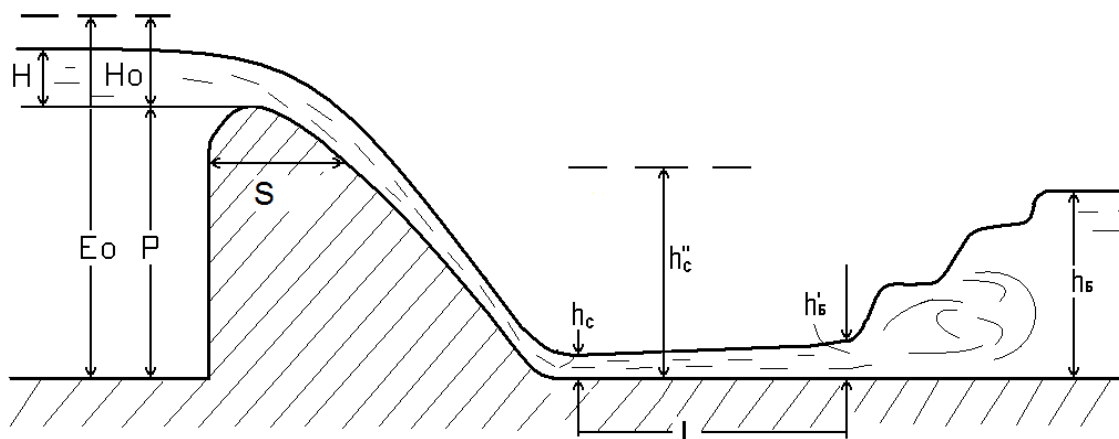


Рис. 11.1. Водослив практического профиля

Расход через неподтопленный водослив практического профиля определяется по формуле:

$$Q = m\varepsilon B\sqrt{2g}H_0^{3/2}, \quad (11.1)$$

где m – коэффициент расхода; ε – коэффициент бокового сжатия (при отсутствии сжатия $\varepsilon = 1$); B – ширина водосливного фронта, м; H_0 – напор с учётом скорости подхода, м.

Напор перед водосливом с учетом скорости подхода, определяемый в случае водослива без бокового сжатия:

$$H_0 = H + \frac{\alpha v_0^2}{2g}, \quad (11.2)$$

$$v_0 = \frac{Q}{b(H+P)}, \quad (11.3)$$

где b – ширина водослива, м; H – напор, м; P – высота порога, м.

Если под струей на водосливе давление атмосферное или больше атмосферного, то водослив будет безвакуумный. Водосливная поверхность безвакуумного водослива криволинейного практического профиля очерчивается по координатам Кригера – Офицера, получаемым в зависимости от проектного напора H . При проектном напоре коэффициент расхода m безвакуумного водослива, очерченного по координатам Кригера – Офицера, будет наибольшим.

При уменьшении напора H на водосливе (по сравнению с проектным) коэффициент расхода m будет уменьшаться. При увеличении напора H по сравнению с проектным, при отсутствии доступа воздуха под струю, водослив превратится в вакуумный – внутренняя поверхность струи может отставать от поверхности водослива, струя будет захватывать воздух из замкнутого пространства между струей и водосливом, выносить его нижний бьеф и под струей образуется зона пониженного давления – вакуум. Вакуум под струей вызовет увеличение расхода через водослив, коэффициент расхода m при этом будет увеличиваться.

Водослив не подтоплен, если нижний бьеф (НБ) не подпирает переливающуюся на гребне водослива струю. Это будет во всех случаях, когда уровень НБ ниже уровня гребня водослива и еще в том случае, когда уровень НБ хотя и выше отметки гребня, но при этом прыжок в нижнем бьефе отогнан.

Если уровень НБ выше гребня и при этом прыжок подтоплен и в формулу расхода вводится коэффициент подтопления σ .

Для подтопленного водослива:

$$Q = \sigma t \varepsilon B \sqrt{2g} H_0^{3/2}, \quad (11.4)$$

где σ – коэффициент подтопления.

При этом, чем выше уровень НБ, т.е. чем больше величина подтопления $h_{\text{п}}$ (разность между уровнями НБ и гребня водослива), тем меньше σ .

Величину σ надлежит устанавливать на основании экспериментальных данных, представленных в виде кривых (рис. 11.2). Как видно, величина σ зависит от соотношения $\frac{h_{\text{п}}}{H_0}$. На рис. 11.2 кривая I относится к вакуумным водосливам, кривая II – к безвакуумным водосливам нормального очертания.

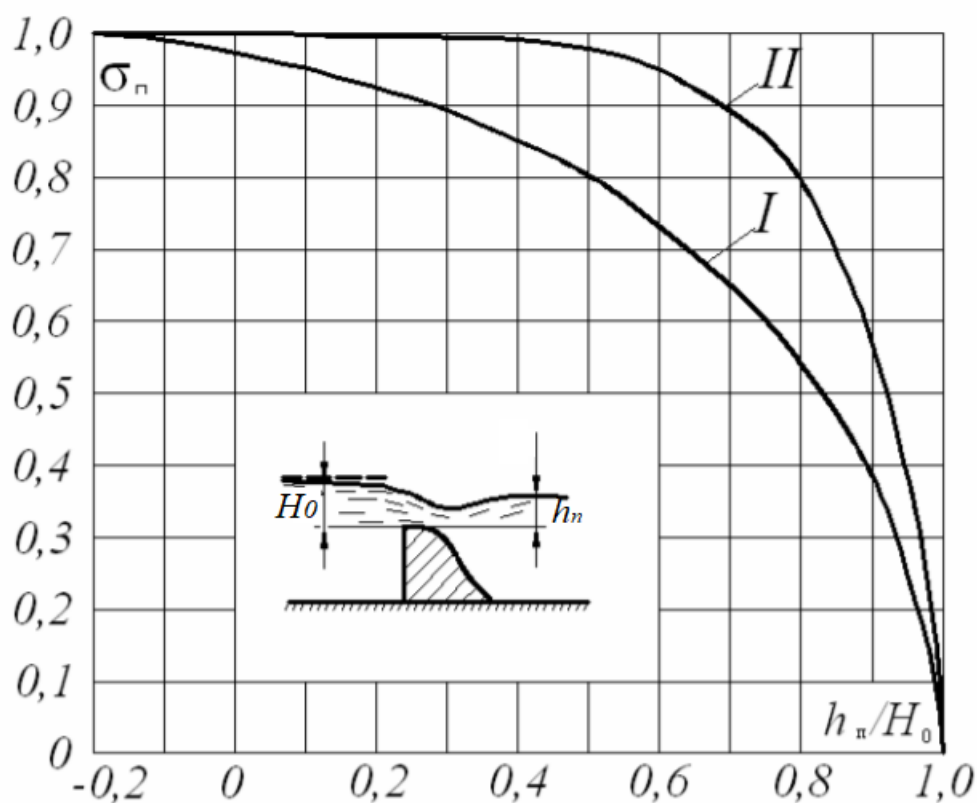


Рис. 11.2. График для определения коэффициента подтопления σ

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

$$\varphi = \frac{q}{h_c \sqrt{2g(E_0 - h_c)}}, \quad (11.5)$$

где $q = \frac{Q}{b}$ – удельный расход, м³/с на 1м; h_c – глубина в сжатом сечении, м; E_0 – удельная энергия, которую имеет поток в сечении перед водосливом.

Наименьшая глубина за водосливом h_c зависит от удельной энергии E_0 , которую имеет поток в сечении перед водосливом. Эта энергия складывается из потенциальной энергии и кинетической и равна (рис. 11.1):

$$E_0 = P + H + \frac{\alpha v_0^2}{2g} = P + H_0 \quad (11.6)$$

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

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

$$q = \varphi h_c \sqrt{2g(E_0 - h_c)}, \quad (11.7)$$

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

При расчете водосливов практического профиля значения m и σ определяются по справочникам.

Порядок выполнения работы

Работа проводится в гидравлическом лотке.

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

2. Сначала в лоток подается небольшой постоянный расход Q , который измеряется объемным способом по формуле:

$$Q = \frac{V}{\tau}, \quad (11.8)$$

где V – объем жидкости, м³; τ – время прохождения жидкости через данное поперечное сечение, с.

При установившемся движении в лотке, когда уровень свободной поверхности потока в верхнем бьефе будет стабильным, измеряется напор перед водосливом H (на расстоянии $\sim 3H$ от гребня) и вычисляется напор H_0 .

Затем подаваемый в лоток расход увеличивается и определяются соответствующие напоры H и H_0 . Увеличение производится несколько раз.

3. По расходам Q и соответствующим напорам с учетом скорости подхода H_0 , полученным в каждом опыте, вычислить коэффициенты расхода по формуле, полученной из (11.1):

$$m = \frac{Q}{b\sqrt{2g}H_0^{3/2}} \quad (11.9)$$

и строится график связи $m = f(H_0)$. Результаты измерений и вычислений заносятся в табл. 11.1.

4. Для определения коэффициента скорости водослива φ измеряются его ширина b и высота P , определяется расход объемным способом по формуле (6.8). Глубины потока за водосливом формируются при полностью открытом концевом затворе лотка. При этом поток за водосливом находится в бурном состоянии.

5. Измеряются напор перед водосливом H и глубина в сжатом сечении h_c за водосливом.

6. Вычисляются значения напора со скоростью подхода H_0 и удельной энергии E_0 по формулам (11.2) и (11.6) соответственно.

7. При полученных опытных данных определяется коэффициент скорости φ по формуле (11.5). Определение φ следует определять при двух-трех различных расходах, пропускаемых через водослив.

8. Результаты измерений и вычислений заносятся в табл. 11.2.

9. Определение коэффициента подтопления σ следует производить при установленном произвольном расходе Q через водослив, не связывая этот опыт с опытами при неподтопленном истечении.

Подтопление осуществляется частичным прикрытием в конце лотка до тех пор, пока при надвинутом прыжке в нижнем бьефе уровень воды не

поднимется выше отметки ребра водослива. После стабилизации уровней (процесс этот обычно довольно длительный) измеряется уровень нижнего (УВНБ) бьефа.

После проведения двух-трёх опытов с подтоплением водослива при различной величине подтопления $h_{\text{п}}$ (для одного и того же расхода Q) вычисляются коэффициенты подтопления σ :

$$\sigma = \frac{Q}{mb\sqrt{2g}H_0^{3/2}}. \quad (11.10)$$

10. В формуле (11.10) значение коэффициента расхода m берётся для неподтопленного водослива по результатам предыдущих опытов (снимается с тарировочной кривой $m = f(H_0)$). Напор со скоростью подхода H_0 вычисляется обычным способом по данным расхода Q и напора H для подтопленного водослива по формуле (11.2).

11. Результаты измерений и вычислений заносятся в табл. 11.3.

12. Полученные опытным путем значения коэффициента подтопления σ сравниваются со снятыми с кривой (рис. 11.2).

Таблица 11.1 – Протокол исследования для получения экспериментальной зависимости $t = f(H_0)$ (неподтопленный водослив без бокового сжатия)

<i>Измеренные</i>						<i>Вычисленные</i>			
$b, \text{ м}$	$P, \text{ м}$	$V, \text{ м}^3$	$\tau, \text{ с}$	УВВБ, м	$H, \text{ м}$	$Q, \text{ м}^3/\text{с}$	$H_0, \text{ м}$	$H_0^{3/2}$	t
1									
...									
n									

Таблица 11.2 – Протокол исследования для определения коэффициента скорости (неподтопленный водослив без бокового сжатия)

<i>Измеренные</i>							<i>Вычисленные</i>				
$b, \text{ м}$	$P, \text{ м}$	$V, \text{ м}^3$	$\tau, \text{ с}$	УВВБ, м	$h_c, \text{ м}$	$H, \text{ м}$	$Q, \text{ м}^3/\text{с}$	$H_0, \text{ м}$	q	E_0	φ
1											
...											
n											

Таблица 11.3 – Протокол исследования для определения коэффициента подтопления

<i>Измеренные величины</i>							<i>Вычисленные величины</i>						<i>Справочное значение</i>	
$b, \text{ м}$	$P, \text{ м}$	$V, \text{ м}^3$	$\tau, \text{ с}$	УВВБ, м	УВНБ, м	$H, \text{ м}$	$Q, \text{ м}^3/\text{с}$	$H_o, \text{ м}$	t	$H_0^{3/2}$	σ	$h_{\text{п}}, \text{ м}$	$\frac{h_{\text{п}}}{H_0}$	σ
1														
\dots														
n														

Вопросы для самопроверки

1. Дать определение термину «водослив практического профиля».
2. Как изменяется значение коэффициента расхода при увеличении напора?
3. Как определить величину подтопления $h_{\text{п}}$?
4. Начертить схему подтопленного истечения через водослив практического профиля.
5. Написать формулу для определения коэффициента подтопления σ .
6. Чему равен коэффициент подтопления σ при неподтопленном истечении?
7. В каком случае происходит подтопление водослива?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 12.

ИСТЕЧЕНИЕ ЧЕРЕЗ ВОДОСЛИВ С ШИРОКИМ ПОРОГОМ

Цель работы: изучить физическую картину движения жидкости через водослив с широким порогом.

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

Сведения, необходимые для выполнения работы

Водослив с широким порогом имеет отношение ширины горизонтального порога S к напору H (рис.12.1) в пределах $2 < S/H < 10$. В этом диапазоне на пороге водослива устанавливается бурный и спокойный поток в зависимости от соотношения глубин потока на пороге и за водосливом.

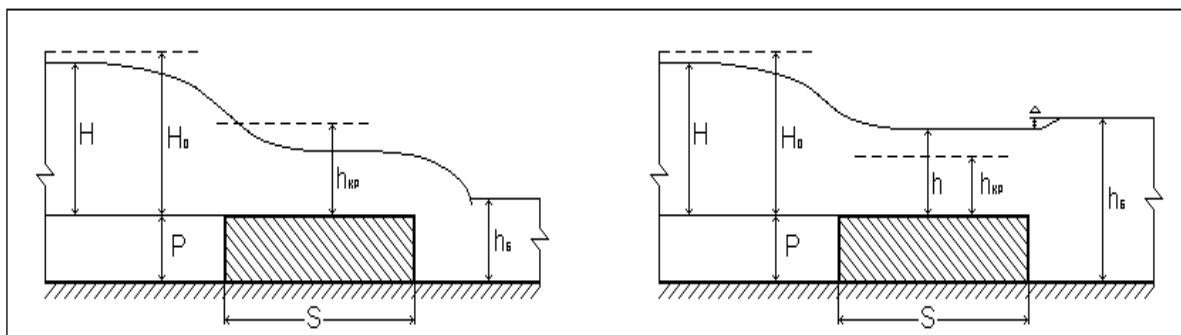


Рис. 12.1. Водослив с широким порогом неподтопленный (а)
и подтопленный (б):

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

Водослив будет не подтоплен, если уровень воды за водосливом при изменении бытовой глубины $h_б$ в нижнем бьефе (НБ) не влияет на величину напора H (рис.12, а).

Если при изменении (увеличении) глубины в НБ, глубины в потоке на водосливе будут увеличиваться и это вызовет увеличение H , то водослив будет подтоплен (рис.12, б). При этом глубина h на водосливе больше критической.

Для неподтопленного водослива без бокового сжатия (т.е. при одинаковой ширине лотка и водослива) расход определяется по формуле

$$Q = mb\sqrt{2g}H_0^{3/2}, \quad (12.1)$$

где m – коэффициент расхода водослива; b – ширина водослива, м;
 H_0 – напор с учётом скорости подхода, м.

Напор с учетом скорости подхода определяется по формуле:

$$H_0 = H + \frac{\alpha v_0^2}{2g}, \quad (12.2)$$

где α – коэффициент Кориолиса, принять равным 1,1; v_0 - скорость подхода жидкости, м/с; g – ускорение свободного падения, м/с².

Скорость подхода v_0

$$v_0 = \frac{Q}{\omega} = \frac{Q}{b(H+P)}, \quad (12.3)$$

где P – высота порога, м.

На пороге неподтопленного водослива поток находится в бурном состоянии, т.е. глубина на пороге меньше критической, определяемой для прямоугольного водослива по формуле

$$h_{кр} = \sqrt[3]{\frac{\alpha Q^2}{gb^2}}. \quad (12.4)$$

Для подтопленного водослива расход можно определять по той же формуле, что и для неподтопленного водослива, с введением коэффициента σ_{Π} , учитывающего подтопление и перепад восстановления при увеличении живого сечения потока за водосливом:

$$Q = \sigma_{\Pi} mb \sqrt{2g} H_0^{3/2} \quad (12.5)$$

или по формуле без учета перепада восстановления, который в лабораторных условиях практически незаметен:

$$Q = \varphi mb \sqrt{2g} H_0^{3/2}, \quad (12.6)$$

где h – глубина на пороге подтопленного водослива, м; φ – коэффициент скорости.

Глубина на пороге подтопленного водослива определяется по формуле:

$$h = h_0 - P - \Delta, \quad (12.7)$$

где h_0 – бытовая глубина, м; P – высота порога, м; Δ - превышение, м.

На пороге подтопленного водослива поток находится в спокойном состоянии и глубина $h > h_{кр}$.

Порядок выполнения работы

1. В лоток, где установлен водослив, подается такой расход Q , при котором напор H перед водосливом будет удовлетворять условию $H < S/2$, т.е. водослив можно считать водосливом с широким порогом. Расход измеряется мерным водосливом.

При полностью открытом затворе в конце лотка глубины за водосливом обычно формируются небольшими и водослив будет неподтопленным.

Переносным шпигенмасштабом измеряются отметки дна лотка, порога и поверхности потока в зоне водослива, по которым вычисляются напор, высота порога и глубины на водосливе для построения свободной поверхности потока.

После проведения всех измерений при неподтопленном водосливе можно приступить к его подтоплению. При этом расход Q , подаваемый в лоток, оставляется без изменения.

Для подтопления водослива увеличиваются глубины в НБ прикрытием концевого затвора в лотке. Когда уровень воды в лотке за водосливом приблизится к уровню на водосливе, дальнейшее прикрытие затвора следует производить осторожно, стараясь уловить начало подтопления.

В начале подтопления со стороны НБ на водосливе будет волнообразно повышаться свободная поверхность, и когда эта волна достигает ВБ, то напор H начнет увеличиваться.

Начало подъема уровня в ВБ, фиксируемое предварительно установленным там шпигенмасштабом, можно считать началом подтопления, и при этом положении надо измерить напор H , глубины на пороге водослива и за водосливом. Затем последующим прикрытием затвора в лотке увеличивается подтопление, и снова измеряются напор и глубины на водосливе и за ним.

Измерения следует производить только тогда, когда после подтопления водослива движение полностью установится, когда уровни свободной поверхности в верхнем и нижнем бьефах не будут изменяться по времени.

2. При измеренных напорах и глубинах при неподтопленном и подтопленном водосливе вычисляются опытные значения коэффициентов расхода

$$m = \frac{Q}{b\sqrt{2g}H_0^{3/2}}, \quad (12.8)$$

скорости

$$\varphi = \frac{Q}{bh\sqrt{2g(H_0-h)}}, \quad (12.9)$$

подтопления

$$\sigma_{\text{п}} = \frac{Q}{mb\sqrt{2g}H_0^{3/2}} \quad (12.10)$$

и сравниваются с данными по справочной литературе.

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

4. Все значения заносятся в протокол исследования (табл. 12.1).

Вопросы для самопроверки

1. Назвать условия, при котором водослив является водосливом с широким порогом.

2. Как изменяется значение коэффициента расхода при увеличении напора?

3. Как определить величину превышения Δ ?

4. Начертить схему подтопленного истечения через водослив с широким порогом.

5. Написать формулу для определения коэффициента подтопления $\sigma_{\text{п}}$.

6. В каком случае происходит подтопление водослива?

Таблица 12.1 – Протокол исследования

Водослив	Измеренные							Вычисленные					
	$P, м$	$V, м^3$	$\tau, с$	$H, м$	$h, м$	$\Delta, м$	$h_{\bar{o}}, м$	$Q, м^3/с$	$H_0, м$	$h_{кр}, м$	t	φ	σ_{II}
Неподт.													-
Подтоп.													

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 13.

ИСТЕЧЕНИЕ ЖИДКОСТИ ИЗ-ПОД ЗАТВОРА

Цель работы: изучить процесс истечения жидкости из-под затвора, овладеть навыками определения расхода воды при истечении из-под затвора.

Задание: определить коэффициенты расхода μ , скорости φ и сжатия ε . При подтопленном затворе определить глубину h_z , при затоплении затвора - Δz . Сравнить вычисленные значения коэффициентов μ , φ , ε со справочными данными.

Сведения, необходимые для выполнения работы

Затвор гидросооружения - подвижная конструкция, предназначенная для закрывания и открывания отверстий гидротехнического сооружения и регулирования пропускаемого расхода воды.

Затворы могут быть расположены над дном, перед перепадом или быстротоком, в начале водослива с широким порогом, на гребне водослива практического профиля криволинейного очертания и т.д.

Расход Q из-под затвора, установленного на горизонтальном пороге, связан с высотой его открытия a , шириной b и глубинами формулой:

$$Q = \mu ab \sqrt{2g(H_0 - h_c)}, \quad (13.1)$$

где μ – коэффициент расхода, равный произведению коэффициента скорости φ на коэффициент сжатия ε ; H_0 – напор перед затвором с учетом скорости подхода, м; h_c - сжатая глубина воды за затвором, м.

Глубина в сжатом сечении h_c связана с высотой отверстия a следующей зависимостью:

$$h_c = \varepsilon a, \quad (13.2)$$

где ε - коэффициент сжатия струи; a - высота поднятия затвора.

Формула (13.1) получена для случая свободного истечения (рис. 13.1, а), когда поток, переходя за затвором в бурное состояние, сопрягается с потоком нижнего бьефа в форме отогнанного прыжка или прыжка в предельном положении.

Если прыжок за затвором надвинут, то истечение будет несвободным (рис. 13.1, б) и в формулу расхода вместо h_c вводится глубина h_z (которая меньше глубины h_6 в нижнем бьефе, т.к. находится в начале подтопленного прыжка). В данном случае расход определяют по формуле:

$$Q = \mu ab \sqrt{2g(H_0 - h_z)}. \quad (13.3)$$

где h_z - глубина в сжатом сечении, м.

Причём $h_c < h_z < h_6$ (рис. 13.1, б).

Условия формирования отогнанного и надвинутого прыжка здесь такие же, как и в случае сопряжения потока за водосливом.

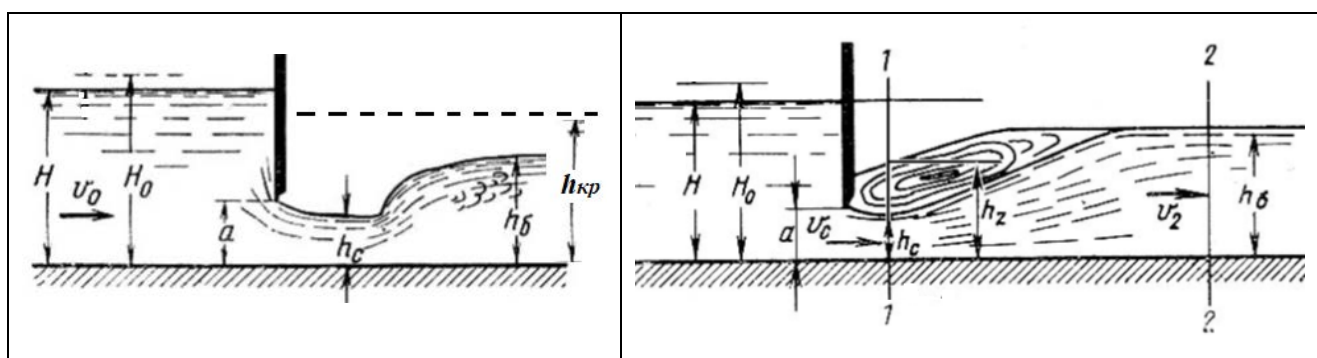


Рис. 13.1. Истечение из-под затвора:

а - свободное

б - подтопленное

При известных значениях расхода Q и величины открытия затвора a , глубину h_z можно определить по формуле:

$$h_z = \sqrt{h_6^2 - \frac{2q^2}{g} \frac{h_6 - h_c}{h_6 \cdot h_c}}. \quad (13.4)$$

Если высоту открытия затвора a увеличить, то при некотором значении a , близком к критической глубине $h_{кр}$, истечение из-под затвора будет происходить, как из большого затопленного отверстия при разностях горизонта Δz верхнего и нижнего бьефов. Расход в этом случае будет равен:

$$Q = \mu ab \sqrt{2g\Delta z}, \quad (13.5)$$

где при установившихся уровнях верхнего и нижнего бьефов разность глубин определяется как $\Delta z = H - h_6$.

При затопленном истечении гидравлический прыжок в нижнем бьефе отсутствует.

Порядок выполнения работы

Работа проводится в гидравлическом лотке.

1. Измеряется высота открытия затвора a и ширина гидравлического лотка b .

Открытием регулирующей задвижки устанавливается расход воды в лотке Q .

В нижнем бьефе за затвором сначала формируется бурный поток, истечение из-под затвора будет свободным. При этом условии нужно произвести измерения напора H перед затвором и глубины h_c в сжатом сечении, которая располагается от затвора на расстоянии, примерно равной высоте открытия a . Данные измерений заносятся в табл. 13.1.

2. При установившемся движении, когда вызванное подтоплением повышение уровня воды за затвором стабилизируется, необходимо измерить напор перед затвором H , глубину в нижнем бьефе $h_б$. Все измерения заносятся в табл. 13.2.

3. Для исследования истечения затопленного отверстия при том же расходе Q надо открыть затвор на величину $a > h_{кр}$. Поэтому предварительно нужно рассчитать значение критической глубины $h_{кр}$ по формуле:

$$h_{кр} = \sqrt[3]{\frac{\alpha q^2}{g}}, \quad (13.6)$$

где α – коэффициент Кориолиса, принять равным 1,1; $q = \frac{Q}{b}$ – удельный расход, м³/с на м; g – ускорение свободного падения, м/с².

Глубины в нижнем бьефе должны быть установлены концевым затвором в лотке, причем $h_б > a$. Все измеренные значения напора перед затвором H , глубины в нижнем бьефе $h_б$ заносятся в табл. 13.3.

4. Расход воды в лотке Q определяется объемным способом по формуле:

$$Q = \frac{V}{\tau}, \quad (13.7)$$

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

5. При полученных опытных значениях для свободного истечения определяются:

коэффициент расхода

$$\mu = \frac{Q}{ab\sqrt{2g(H_0 - h_c)}}, \quad (13.8)$$

коэффициент сжатия

$$\varepsilon = \frac{h_c}{\alpha}, \quad (13.9)$$

коэффициент скорости

$$\varphi = \frac{\mu}{\varepsilon} \quad (13.10)$$

и сравниваются со справочными данными.

Напор с учетом скорости подхода определяется по формуле:

$$H_0 = H + \frac{\alpha_0 v_0^2}{2g}, \quad (13.11)$$

где α – коэффициент Кориолиса, принять равным 1,1; $v_0 = \frac{Q}{bH}$ – скорость подхода жидкости, м/с; g – ускорение свободного падения, м/с^2 .

6. При полученных значениях вычислить коэффициент расхода для затопленного затвора по формуле:

$$\mu = \frac{Q}{ab\sqrt{2g(H_0 - h_z)}}, \quad (13.12)$$

и сравнить с коэффициентом μ , полученным при свободном истечении.

Напор с учетом скорости подхода определяется по формуле (13.11), глубину h_z определить по формуле (13.4).

7. Для затопленного истечения определить перепад горизонта Δz верхнего и нижнего бьефов и вычислить коэффициент расхода для затопленного затвора по формуле:

$$\mu = \frac{Q}{ab\sqrt{2g\Delta z}}, \quad (13.13)$$

8. Результаты вычислений занести в табл. 13.1 – 13.3.

Таблица 13.1 - Свободное истечение (неподтопленный затвор)

Измеренные						Вычисленные					Справочные		
b , м	a , м	V , м ³	τ , с	H , м	h_c , м	Q , м ³ /с	H_o , м	μ	ε	φ	μ	ε	φ

Таблица 13.2 - Подтопленный затвор

Измеренные							Вычисленные					
b , м	a , м	V , м ³	τ , с	H , м	h_c , м	h_b , м	Q , м ³ /с	H_o , м	h_z , м	μ	ε	φ

Таблица 13.3 - Затопленный затвор

Измеренные						Вычисленные					
b , м	a , м	V , м ³	τ , с	H , м	h_b , м	$h_{кр}$, м	Q , м ³ /с	H_o , м	Δz , м	μ	

Вопросы для самопроверки

1. Что такое затвор?
2. Написать формулу для нахождения напора с учетом скорости подхода.
3. Как определить значение удельного расхода q ?
4. Начертить схему свободного истечения из-под затвора.
5. Написать формулу для определения коэффициента скорости.
6. Что такое «бытовая глубина»?
7. В каком случае происходит подтопление затвора?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 14.

ИЗУЧЕНИЕ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО ПРЫЖКА В ПРЯМОУГОЛЬНОМ РУСЛЕ

Цель работы: изучить явление гидравлического прыжка в прямоугольном русле.

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

Сведения, необходимые для выполнения работы

Явление гидравлического прыжка возникает во многих гидротехнических сооружениях и поэтому представляет большой практический интерес. Например, при сопряжении бьефов, переход потока воды из бурного состояния в спокойное всегда происходит в виде гидравлического прыжка.

Гидравлический прыжок - явление, при котором на сравнительно небольшой длине происходит увеличение потока с переходом ее через критическое значение, при этом поток из бурного состояния переходит в спокойное.

В соответствии с СО 34.21.308-2005 *гидравлический прыжок* - переход транзитного потока из бурного состояния в спокойное.

Глубины перед прыжком и за прыжком называются сопряженными. Первая сопряженная глубина, обозначаемая h' , измеряется в бурном потоке непосредственно перед прыжком, вторая сопряженная глубина, обозначаемая h'' , измеряется за прыжком, за вальцом – в сечении, за которым не происходит дальнейшего увеличения глубины (рис. 14.1).

Расстояние между сечениями с сопряженными глубинами называется длиной прыжка $l_{пр}$, а разность $a = h'' - h'$ называется высотой прыжка (рис. 14.1).

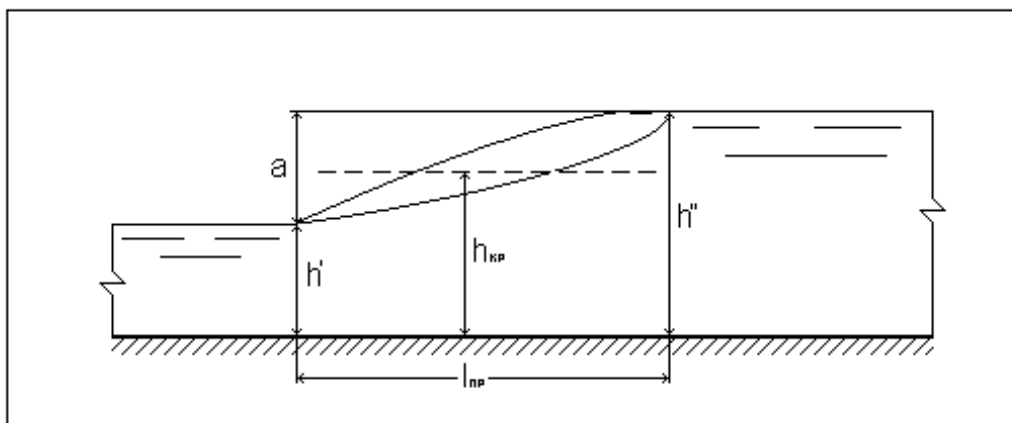


Рис. 14.1. Совершенный гидравлический прыжок:
 h' - первая сопряженная глубина; h'' - вторая сопряженная глубина; $l_{пр}$ - длина прыжка; a - высота прыжка

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

$$h_{кр} = \sqrt[3]{\frac{\alpha Q^2}{g b^2}}, \quad (14.1)$$

$$\Pi_k = \frac{\alpha Q^2 B}{g \omega^3}, \quad (14.2)$$

где Q – расход, $\text{м}^3/\text{с}$; g – ускорение свободного падения, $\text{м}/\text{с}^2$; b , B – ширина русла, м ; α – коэффициент Кориолиса.

В зависимости от условий, в которых происходит гидравлический прыжок, наблюдаются различные его виды.

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

В совершенном гидравлическом прыжке различаются две зоны – нижняя и верхняя. В нижней зоне движение поступательное, имеет форму расширяющейся в вертикальной плоскости струи. В верхней зоне совершенного прыжка образуется водяной валец, насыщенный воздухом (аэрированный), вращающийся над нижней зоной.

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

В прямоугольном русле сопряженные глубины в совершенном прыжке связаны зависимостями:

$$h' = \frac{h''}{2} (\sqrt{1 + 8\Pi_k''} - 1), \quad (14.3)$$

$$h' = \frac{h''}{2} \left(\sqrt{1 + \left(\frac{h_{кр}}{h''}\right)^3} - 1 \right), \quad (14.4)$$

$$h'' = \frac{h'}{2} \left(\sqrt{1 + 8\left(\frac{h_{кр}}{h'}\right)^3} - 1 \right), \quad (14.5)$$

$$h'' = \frac{h'}{2} (\sqrt{1 + 8\Pi_k' - 1}) \quad (14.6)$$

где для прямоугольного русла $\Pi_k = \frac{\alpha q^2}{gh^3}$. Здесь $q = \frac{Q}{b}$ – удельный расход, м³/с на 1м.

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

формула Н. Н. Павловского

$$l_{пр} = 2,5(1,9h'' - h'), \quad (14.7)$$

формула М. Д. Чертоусова

$$l_{пр} = 10,3h'(\Pi_k' - 1)^{0,81}, \quad (14.8)$$

формула Ф.И. Пикалова

$$l_{пр} = 4h'\sqrt{1 + 2\Pi_k'}, \quad (14.9)$$

формула Айвазяна, полученная для значений $\Pi_k' \geq 3$.

$$l_{пр} = \frac{80 + 8\sqrt{\Pi_k'}}{\Pi_k'}. \quad (14.10)$$

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

$$h_{тр} = \left(h' + \frac{\alpha_1 v_1^2}{2g} \right) - \left(h'' + \frac{\alpha_2 v_2^2}{2g} \right), \quad (14.11)$$

где $h_{\text{тр}}$ – потери удельной энергии в гидравлическом прыжке, м; α_1, α_2 – коэффициенты Кориолиса в сечениях 1-1 и 2-2 соответственно; v_1, v_2 – скорости в сечениях 1-1 и 2-2 соответственно, м/с.

Для прямоугольного русла из уравнения (13.11) и уравнения прыжка после преобразований получена формула потерь энергии в сечениях 1-1 и 2-2 гидравлического прыжка:

$$h_{\text{тр}} = \frac{(h'' - h')^3}{4h'h''}. \quad (14.12)$$

Если расход равен Q , то потери энергии в гидравлическом прыжке, происходящем в единицу времени, равны $\rho g Q h_{\text{тр}}$.

Если переход бурного потока в спокойный происходит при $a < h'$ (или $\frac{h''}{h'} < 2$), то прыжок будет *несовершенный*, или *волнистый*. При этом параметр кинетичности будет в пределах $1,5 < \Pi_k < 3,0$.

В соответствии с СО 34.21.308-2005 *волнистый гидравлический прыжок* (прыжок-волна) - гидравлический прыжок, характеризующийся отсутствием поверхностного водоворота (вальца) и наличием ряда волн на свободной поверхности потока ниже прыжка.

Волнистый прыжок изучен сравнительно мало. Максимальную глубину воды под первым гребнем можно найти по формуле, предложенной В.В. Смысловым:

$$h_{\text{гр}} = 0,59h'(\sqrt{1 + 8\Pi'_k} - 1) \quad (14.13)$$

или

$$h_{\text{гр}} = 1,18h''. \quad (14.14)$$

Глубину воды под первым гребнем можно получить также по приближённой формуле, полученной А.А. Турсуновым для потенциального движения невязкой жидкости применительно к условиям прыжка-волны:

$$h_{\text{гр}} = 0,75(\sqrt{1 + 8\Pi'_k} - 1,25). \quad (14.15)$$

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

$$l_{\text{пр}} = 10,6a = 10,6h'(P'_k - 1). \quad (14.16)$$

Порядок выполнения работы

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

1. В лоток подается постоянный расход Q . Гидравлический прыжок можно получить, пропуская поток через водослив, или из-под затвора, или в свободном лотке (без водослива и затвора), если при открытом концевом затворе лотка поток будет находиться в бурном состоянии.

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

2. Мерной иглой измеряются сопряженные глубины h' и h'' и длина прыжка $l_{\text{пр}}$.

3. Определяются высота прыжка a и его вид. Для визуализации (видимости) траекторий струй в поток рекомендуется пускать краску или небольшие поплавки, имеющие одинаковый удельный вес с водой.

4. Производится зарисовка прыжка с натуры.

5. По формулам вычисляются сопряжения глубина, длина прыжка и сравниваются с опытными данными. Из уравнения Бернулли определяются потери энергии в прыжке.

6. Измеренные и вычисленные значения параметров записываются в табл. 14.1-14.2.

Таблица 14.1 – Протокол исследований

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

Таблица 14.1 – Протокол исследований (продолжение)

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

Таблица 14.2 – Расчетные значения при изучении совершенного гидравлического прыжка

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

Таблица 14.2 - Расчетные значения при изучении совершенного гидравлического прыжка (продолжение)

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

Вопросы для самопроверки

1. Что такое гидравлический прыжок?
2. Напишите формулу, по которой определяется критическая глубина.
3. Дать определение термину «волнистый гидравлический прыжок».
4. Начертить схему совершенного гидравлического прыжка с указанием всех основных параметров потока.
5. В каком состоянии находится поток в открытом русле при первой сопряженной глубине?
6. Где измеряется вторая сопряженная глубина h'' при исследовании совершенного гидравлического прыжка?
7. Какой прыжок наблюдается при высоте прыжка $a \geq h'$ или $\frac{h''}{h'} \geq 2$?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 15.

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРА СОПРЯЖЕНИЯ ПОТОКА В НИЖНЕМ БЬЕФЕ

Цель работы: исследовать виды сопряжения потока.

Задание: определить вид прыжкового сопряжения, начертить схему сопряжения потока в нижнем бьефе.

Сведения, необходимые для выполнения работы

В зависимости от местоположения гидравлического прыжка в нижнем бьефе за перегораживающим сооружением различают следующие его виды: *отогнанный, надвинутый и затопленный* (рис. 15.1).

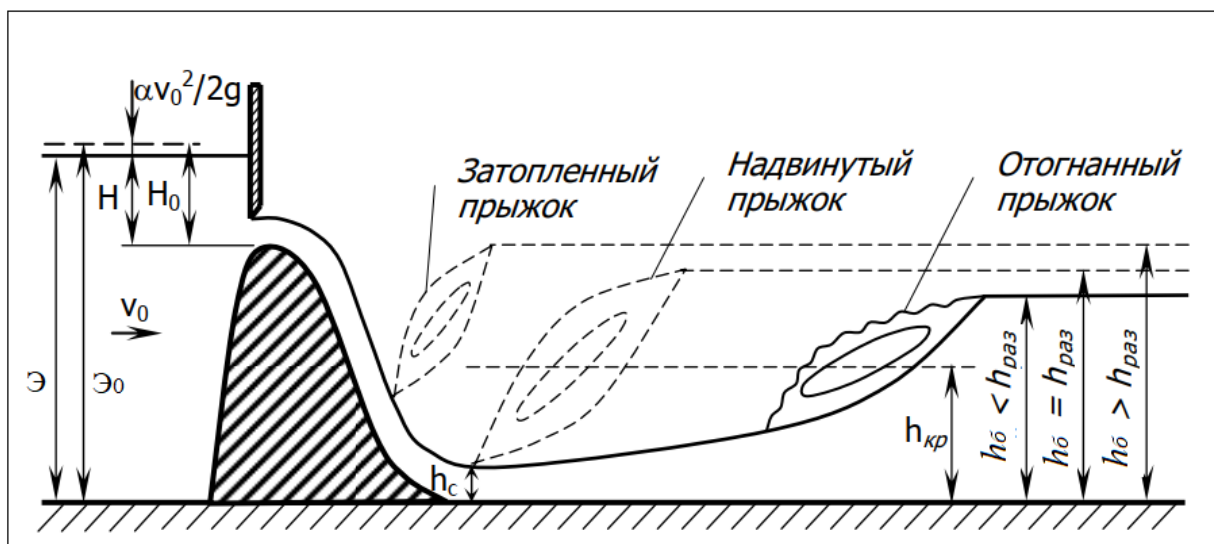


Рис. 15.1. Виды прыжкового сопряжения за перегораживающим сооружением (водослив практического профиля)

Для определения местоположения прыжка сравнивают две величины – раздельную глубину $h_{раз}$, сопряженную с глубиной h_c сжатого сечения, и бытовую глубину $h_б$ в нижнем бьефе.

Отогнанный прыжок образуется на некотором удалении, возникает в том случае, когда у $h_{раз} > h_б$. *Надвинутый прыжок* образуется при условии $h_{раз} = h_б$. *Затопленный гидравлический прыжок* образуется, например, при несвободном истечении из-под затвора, когда нижний бьеф не позволяет прыжку сместиться вдале от сооружения по направлению течения и «подтапливает» гидравлический прыжок, $h_{раз} < h_б$.

В случае отгона прыжка за водосливом формируется кривая подпора в бурном потоке между глубинами h_c и $h_{раз}$.

Для определения раздельной глубины $h_{раз}$ в прямоугольном цилиндрическом русле используют основное уравнение прыжка в виде:

$$h_{раз} = \frac{h_c}{2} \left[\sqrt{1 + 8 \left(\frac{h_{кр}}{h_c} \right)^3} - 1 \right], \quad (15.1)$$

где h_c – глубина в сжатом сечении, м; $h_{кр}$ - критическая глубина, м.

Критической глубиной $h_{кр.}$ называется глубина, при которой полная энергия потока минимальна. Для прямоугольного русла определяется по формуле:

$$h_{кр} = \sqrt[3]{\frac{\alpha q^2}{g}}, \quad (15.2)$$

где α – коэффициент Кориолиса, принять равным 1,1; $q = \frac{Q}{b}$ – удельный расход, м³/с на м; g – ускорение свободного падения, м/с².

Порядок выполнения работы

Работа проводится в гидравлическом лотке.

1. Измеряется ширина b водослива.

Через водослив, установленный в прямоугольном лотке, пропускается расход Q , который определяется объемным способом по формуле:

$$Q = \frac{V}{\tau}, \quad (15.3)$$

где V – объем жидкости, м³; τ – время прохождения жидкости через данное поперечное сечение, с.

2. В нижнем бьефе регулированием концевого затвора создается спокойный поток, от глубины которого будет зависеть характер прыжка за водосливом.

Измеряются напор перед водосливом H , глубина в сжатом сечении h_c за водосливом и ∇ УВНБ за прыжком.

3. По формуле (15.2) определяется значение критической глубины $h_{кр.}$, по формуле (15.1) – раздельной глубины $h_{раз.}$ Полученные значения сравниваются, на основании чего делается вывод о виде прыжкового сопряжения.

4. Результаты измерений и вычислений заносятся в табл. 15.1.

Таблица 15.1 – Протокол исследований

<i>Измеренные</i>					<i>Вычисленные</i>			
b , м	V , м ³	τ , с	∇ УВНБ, м	h_c , м	Q , м ³ /с	$h_{кр}$, м	$h_{раз}$, м	Вид прыжкового сопряжения
1								
...								
n								

Вопросы для самопроверки

1. Написать формулу, по которой определяется критическая глубина.
2. Начертить схему отогнанного прыжка с указанием всех основных параметров потока.
3. По каким признакам определяется состояние потока (бурное, спокойное)?
4. С какой глубиной сопряжена раздельная глубина $h_{раз}$?
5. Назвать виды гидравлического прыжка в зависимости от местоположения в нижнем бьефе за перегораживающим сооружением.
6. Назвать вид прыжкового сопряжения при $h_{раз} < h_{б}$.
7. Написать формулу определения расхода объемным способом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. СО 34.21.308-2005. Гидротехника. Основные понятия. Термины и определения.
2. Афанасьев, В. В. Гидравлика: метод. указ. по вып. лаб. раб. для студ. вузов, обуч. по напр. подгот. бакалавров 280100.62 - Природообустройство и водопользование / ФГБОУ ВПО "КГТУ"; В. В. Афанасьев, Н. Р. Ахмедова. - Калининград: ФГБОУ ВПО "КГТУ", 2012. - 25 с.
3. Чугаев, Р.Р. Гидравлика (техническая механика жидкости): учебник / Р.Р. Чугаев. – Москва, БАСТЕТ, 2013. – 672 с.

Учебное издание

Наталья Равиловна Ахмедова

ГИДРАВЛИКА

Редактор И.В. Голубева

Подписано в печать 28.10. 2021 г. Формат 60x90 1/16. Уч.-изд. л. 4,9.

Печ. л. 5,8. Тираж 20 экз. Заказ 94.

Издательство федерального государственного бюджетного
образовательного учреждения высшего образования
«КАЛИНИНГРАДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»
236022, Калининград, Советский проспект, 1