

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

**УЧРЕЖДЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ
«БРЕСТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

**КАФЕДРА ВОДОСНАБЖЕНИЯ, ВОДООТВЕДЕНИЯ
И ОХРАНЫ ВОДНЫХ РЕСУРСОВ**

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

к выполнению лабораторных работ по дисциплине

«Механика жидкости и газа»

для студентов специальности 1 – 70 02 01

«Промышленное и гражданское строительство»

Брест 2016

Методические указания включают 7 лабораторных работ, наиболее полезных для студентов специальности 1 – 70 02 01 «Промышленное и гражданское строительство».

Основным назначением данных методических указаний является разъяснение физической сущности изучаемых гидравлических явлений, ознакомление студентов с методикой экспериментальных исследований, а также закрепление теоретического материала по курсу «Механика жидкости и газа».

Краткое изложение теории вопроса с подробным описанием методики проведения работ облегчит самостоятельную подготовку к лабораторным занятиям и работу студентов в лаборатории.

Составители: Белов С.Г., доцент, к.т.н.,
Наумчик Г.О., ассистент,
Рыбак Е.С., ассистент

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГИДРОСТАТИЧЕСКОГО ДАВЛЕНИЯ

Цель работы: определение полного гидростатического давления в точке М с помощью пьезометра и мановакуумметра.

1. Теория вопроса

Основным понятием гидростатики является понятие гидростатического давления в данной точке покоящейся среды.

Абсолютное давление в любой точке покоящейся среды определяется по основному уравнению гидростатики:

$$P = P_0 + \rho gh, \quad (1.1)$$

где P_0 – поверхностное давление, действующее на свободную поверхность жидкости;

ρgh – весовое давление, обусловленное весом столба жидкости (h), расположенной над рассматриваемой точкой;

ρ – плотность жидкости;

g – скорение силы тяжести.

Если сосуд открыт, то $P_0 = P_a$, (1.2)

где P_a – атмосферное давление.

Если абсолютное давление в точке превышает атмосферное, то его называют манометрическим, давление меньше атмосферного называют вакуумметрическим.

В системе единиц СИ давление измеряется в паскалях: $1 \text{ Па} = 1 \text{ н/м}^2$.

Давление может быть измерено в атмосферах, метрах водного столба.

Одна техническая атмосфера равна:

$$1 \text{ ат} = 1 \text{ кг/см}^2 = 9,8 \cdot 10^4 \text{ н/м}^2 = 0,1 \text{ МПа} = 10 \text{ м. вод. ст.}$$

Однако не следует отождествлять техническую атмосферу и атмосферу реально существующую, то есть физическую.

Для перехода давления от одной размерности к другой можно воспользоваться формулой:

$$h = \frac{P}{\rho \cdot g} \quad (1.3)$$

2. Схема и описание лабораторной установки

Опыты проводятся на лабораторном стенде, схема которого представлена на рис. 1.1.

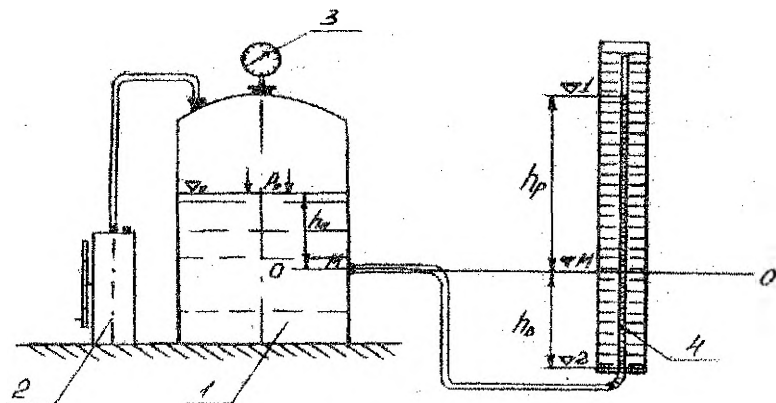


Рисунок 1.1

В цилиндрический стеклянный сосуд 1 помещена жидкость, которая создает давление на его стенки. С помощью насоса 2 на поверхности жидкости можно создавать как манометрическое, так и вакуумметрическое давление.

Величины этих давлений определяются с помощью пружинного мановакуумметра 3 и пьезометра 4.

3. Порядок выполнения работы

1. Соединить гибкую трубку, идущую от сосуда, с нагнетательным штуцером насоса.
2. Вращая маховик насоса, создать некоторую величину давления в сосуде (величина давления ограничивается шкалой делений пьезометра).
3. Записать глубину воды в сосуде h_m , показания мановакуумметра и пьезометра.
4. Повторить опыты при данном подсоединении нагнетательного штуцера.
5. Соединить гибкую трубку со штуцером «разр.» и провести опыты в таком же порядке.

Результаты опытов занести в таблицу.

4. Обработка экспериментальных данных

Таблица 1.1 – Результаты измерений и расчетов

№№ п/п	Показатели	Единицы измерений	Опыты		
			1	2	3
1	2	3	4	5	6
	I серия $P_0 > P_3$				
1.	Отметка точки М, ∇_m	м			
2.	Отметка поверхности воды в сосуде, ∇_0	м			
3.	Отметка уровня воды в пьезометре, ∇_1	м			
4.	Показание манометра	кгс/см ²			

Продолжение таблицы 1.1

1	2	3	4	5	6
5.	Глубина воды в сосуде $h_M = \nabla_0 - \nabla_M$	м			
6.	Пьезометрическая глубина $h_p = \nabla_1 - \nabla_M$	м			
7.	Гидростатическое давление в точке М, измеренное пьезометром $P_M = P_a + \rho gh_p$	Па			
8.	Гидростатическое давление в точке М, измеренное мановакуумметром $P_M = P_0 + \rho gh_M$ 2 серия $P_0 < P_a$	Па			
1.	Отметка поверхности воды в сосуде, ∇_0	м			
2.	Отметка уровня воды в пьезометре, ∇_2	м			
3.	Показание вакуумметра	кг/см ²			
4.	Глубина воды в сосуде $h_M = \nabla_0 - \nabla_M$	м			
5.	Вакуумметрическая глубина $h_v = \nabla_M - \nabla_2$	м			
6.	Гидростатическое давление в точке М, измеренное пьезометром $P_M = P_a - \rho gh_v$	Па			
7.	Гидростатическое давление в точке М, измеренное мановакуумметром $P_M = P_0 + \rho gh_M$	Па			

Поверхностное давление в первой серии опытов определяется:

$$P_0 = P_a + P_M, \quad (1.4)$$

где P_M – давление, которое показывает манометр, Па.

Во второй серии опытов:

$$P_0 = P_a - P_{\text{внк}}, \quad (1.5)$$

где $P_{\text{внк}}$ – давление, которое показывает вакуумметр, Па.

5. Вопросы для самопроверки

1. Как выглядит основное уравнение гидростатики?
2. Что называется вакуумметрическим и манометрическим давлениями?
3. Напишите соотношение между единицами измерения давления.
4. Какой высоте столба жидкости в пьезометре эквивалентно показание мановакуумметра?
5. При какой температуре вода имеет наибольшую плотность?
6. Какой минимальный диаметр пьезометров?
7. Какими приборами измеряется гидростатическое давление?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМОВ ДВИЖЕНИЯ ЖИДКОСТИ В НАПОРНОМ ТРУБОПРОВОДЕ

Цель работы: установить характер режима движения жидкости в трубопроводе при различной величине расхода.

1. Теория вопроса

При течении реальной жидкости наблюдаются различные режимы ее движения, и в определенных условиях характер движения может претерпевать изменения: происходит переход от одного режима к другому.

Критерием для оценки режима движения жидкости является безразмерный параметр Re – число Рейнольдса. Оно представляет меру отношения сил инерции к силам трения, действующим в движущейся жидкости.

Для труб круглого сечения число Рейнольдса определяется по формуле:

$$Re = \frac{v \cdot d}{\nu}, \quad (2.1.)$$

где v – средняя скорость движения жидкости;

d – внутренний диаметр трубы;

ν – кинематический коэффициент вязкости.

Для всех жидкостей при значениях критерия Re меньших 2320 движение жидкости в трубопроводе ламинарное, а при больших 2320 – турбулентное. Постепенное (количественное) увеличение числа Re приводит к качественному изменению характера движения: жидкость из слоистого упорядоченного движения переходит к беспорядочному, хаотическому.

Необходимо отметить, что существуют нижнее и верхнее критические числа Рейнольдса, то есть до $Re_{кр.н.} = 2320$ – устойчивое ламинарное движение, а после $Re_{кр.в.} = 13800$ – устойчивое турбулентное. Переход от одного режима к другому происходит в указанном промежутке чисел Re и зависит от внешних условий (форма сечения, качество стенок и т. д.). В инженерных расчетах для труб круглого сечения обычно принимают нижнее значение $Re = 2320$.

2. Схема и описание лабораторного стенда

Наблюдение за режимами движения жидкости проводятся на лабораторном стенде, схема которого представлена на рис. 2.1.

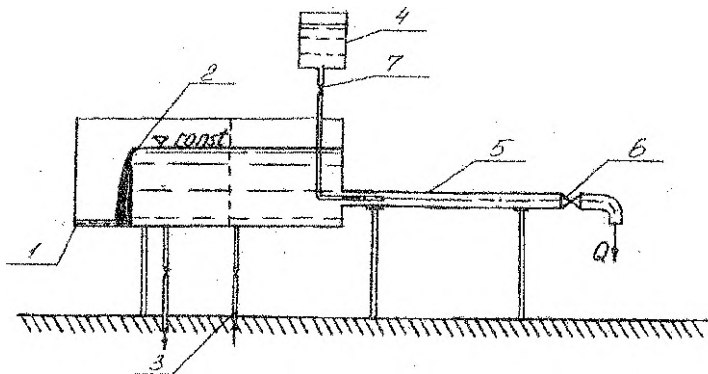


Рисунок 2.1

Жидкость в резервуар 1 поступает из трубопровода 3. Постоянный уровень в резервуаре поддерживается при помощи стенки 2. Подкрашенная жидкость в стеклянную трубу поступает из сосуда 4. Диаметр прозрачной трубы $d = 32$ мм. Величина расхода жидкости Q регулируется вентилем 6 и определяется объемным способом.

3. Порядок выполнения работы

1. Открыть вентиль на подающем трубопроводе.
 2. Убедившись в том, что уровень жидкости в резервуаре не изменяется, открыть вентиль 6.
 3. Приоткрыть вентиль 7 и подать подкрашенную жидкость в стеклянную трубу.
 4. Используя мерный сосуд и секундомер, определить величину пропускаемого расхода.
 5. Измерить температуру воды.
 6. Вести визуальные наблюдения за характером движения подкрашенной жидкости на фоне основного потока.
 7. Изменить с помощью вентилей 6 расход воды в трубе и повторить опыты 2-3 раза.
- Результаты опытов занести в таблицу.

4. Обработка экспериментальных данных

Таблица 2.1 – Результаты измерений и расчетов

№ опыта	Температура воды, $t, ^\circ\text{C}$	Кинематический коэффициент вязкости, $\nu, \text{м}^2/\text{с}$	Объем воды в мерном сосуде, $W, \text{м}^3$	Время наполнения, $\tau, \text{с}$	Расход воды, $Q, \text{м}^3/\text{с}$	Средняя скорость, $v, \text{м}/\text{с}$	Число Рейнольдса, Re	Характер режима движения жидкости

Кинематический коэффициент вязкости принимается по справочной литературе в зависимости от температуры воды.

Расход воды:

$$Q = \frac{W}{\tau}, \text{ м}^3/\text{с}. \quad (2.2)$$

Средняя скорость:

$$v = \frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot d^2}; \bar{n} = 3,14; d - \text{в метрах}. \quad (2.3)$$

Число Рейнольдса определяется по формуле (2.1).

5. Вопросы для самопроверки

1. Какие режимы движения жидкости существуют? Чем они характеризуются?
2. От чего зависит число Рейнольдса?
3. Влияет ли форма трубы (канала) на величину критического числа Рейнольдса?
4. Зависит ли критическое число Рейнольдса от обычно встречающейся шероховатости стенок труб?
5. Что называют расходом жидкости?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3

ИССЛЕДОВАНИЕ УРАВНЕНИЯ БЕРНУЛЛИ ДЛЯ ПОТОКА ВЯЗКОЙ ЖИДКОСТИ

Цель работы: построение геометрической, пьезометрической и напорной линий для трубопровода переменного сечения.

1. Теория вопроса

Уравнение Бернулли для потока вязкой жидкости, одно из основных уравнений гидравлики, имеет следующий вид:

$$z_1 + \frac{P_1}{\gamma} + \frac{\alpha \cdot v_1^2}{2g} = z_2 + \frac{P_2}{\gamma} + \frac{\alpha \cdot v_2^2}{2g} + h_w, \quad (3.1)$$

где z_1 и z_2 – расстояние от плоскости сравнения (горизонтальной плоскости) до центра рассматриваемых сечений;

P_1 и P_2 – гидродинамические давления в тех же сечениях, для которых определяется z_1 и z_2 ;

v_1 и v_2 – средние скорости в рассматриваемых сечениях;

α – коэффициент кинетической энергии потока (коэффициент Кориолиса), учитывающий неравномерность распределения скоростей в живом сечении потока;

h_w – суммарные потери напора.

Индексами 1 и 2 обозначены величины, относящиеся к сечениям потока соответственно выше и ниже по течению.

Сумму $z + \frac{P}{\gamma}$ называют пьезометрическим напором. Этот напор показывает пьезометр, установленный в рассматриваемом сечении. Линия, соединяющая уровни жидкости в пьезометрах, называется пьезометрической. Величину $\frac{\alpha \cdot v^2}{2g}$ называют скоростным напором. Если от пьезометрической линии отложить в

каждом сечении потока отрезки, равные соответствующим скоростным напорам, и концы этих отрезков соединить, то получим напорную линию.

Расстояние от плоскости сравнения до напорной линии называют гидродинамическим напором.

Если от напорной линии первого сечения трубопровода провести горизонтальную прямую, расстояние от этой прямой до напорной линии второго сечения определит величину, которую называют потерей напора (рис. 3.1).

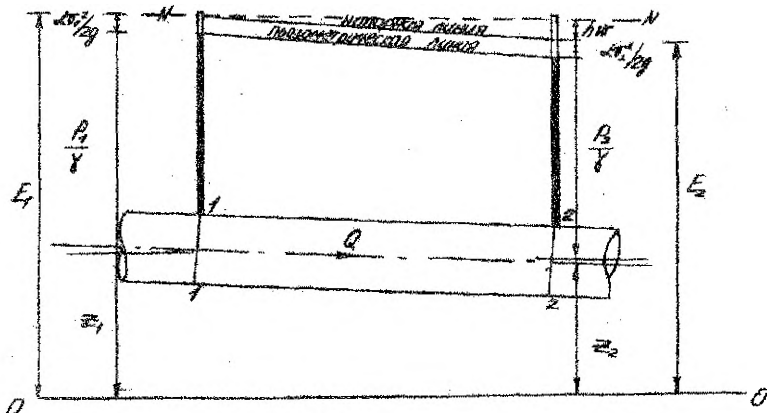


Рисунок 3.1

Величины E_1 и E_2 характеризуют полную удельную энергию потока в сечениях 1-1 и 2-2.

Величина $z_1 + \frac{P_1}{\gamma}$ характеризует потенциальную энергию в сечении 1-1, а $z_2 + \frac{P_2}{\gamma}$ - в сечении 2-2; $\frac{\alpha_1 \cdot v_1^2}{2g}$ и $\frac{\alpha_2 \cdot v_2^2}{2g}$ характеризуют величину кинетической энергии в тех же сечениях потока. Потери полной удельной энергии потока между сечениями 1-1 и 2-2 будут:

$$h_w = E_1 - E_2. \quad (3.2)$$

Применение уравнения Бернулли основывается на соблюдении двух основных условий: 1) движение жидкости между сечениями потока должно быть установившимся; 2) движение жидкости в рассматриваемых сечениях должно быть параллельно-струйным или плавно изменяющимся.

2. Схема и описание лабораторной установки

Опыты проводятся на трубопроводе переменного сечения ($d_1 = 25$ мм, $d_2 = 40$ мм и $d_3 = 20$ мм) (рис.3.2).

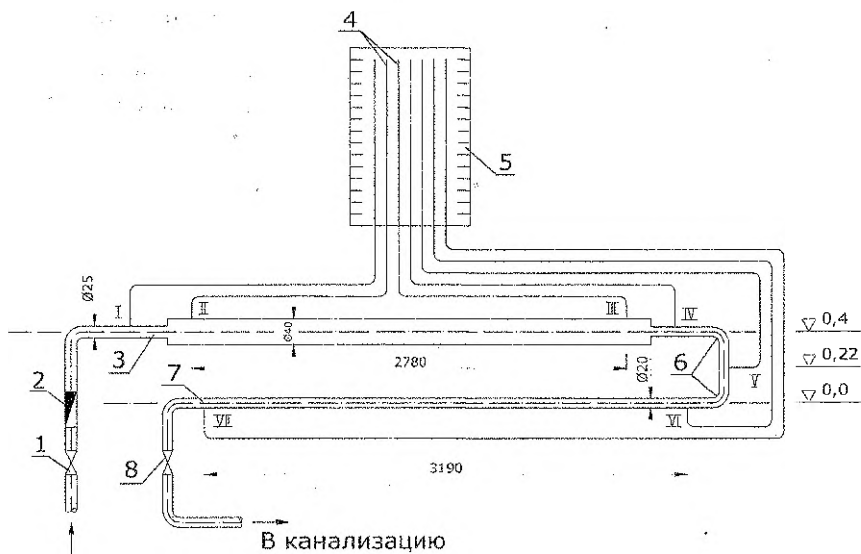


Рисунок 3.2.

На характерных участках верхней части трубопровода 3 и нижней части трубопровода 7 установлены пьезометры 4. Все пьезометры выведены на специальный щит 5 с измерительной шкалой. Плоскость сравнения проходит по оси нижнего трубопровода. Расход воды в трубопроводе определяется с помощью водомера 2.

3. Порядок выполнения работы

1. До начала работы убедиться, что вентиль 8 полностью открыт.
2. Открыть вентиль 1 и подать в трубопровод некоторую величину расхода.
3. Убедившись в том, что режим движения жидкости в трубе установившийся (характеризуется постоянством уровней в пьезометрах), снять показания пьезометров и занести в таблицу.
4. С помощью водомера и секундомера установить величину расхода, подаваемого в трубопровод.
5. На основании результатов таблицы 1 построить геометрическую, пьезометрическую и напорную линии.

4. Обработка экспериментальных данных

Таблица 3.1 – Результаты измерений и расчетов

№№ п/п	Величина	Размерность	Номера сечений (пъезометров)							
			1	2	3	4	5	6	7	
1.	Расстояние от плоскости сравнения, z	м								
2.	Удельная потенциальная энергия, $z + \frac{P}{\gamma}$	м								
3.	Внутренний диаметр трубопровода, d	м								
4.	Площадь живых сечений, w	м ²								
5.	Скорость, v	м/с								
6.	Удельная кинетическая энергия, $\frac{\alpha \cdot v^2}{2g}$	м								
7.	Полная удельная энергия, E	м								
8.	Потери энергии между соседними сечениями, h_w	м								

Расход жидкости определяется по формуле:

$$Q = \frac{W}{\tau}, \text{ м}^3/\text{с}, \quad (3.3)$$

где W – объем жидкости по показаниям водомера, м³;
 τ – время отсчета, с.

Средняя скорость в сечениях подсчитывается по формуле:

$$v = \frac{Q}{w}, \text{ м/с}, \quad (3.4)$$

где w – площадь живого сечения потока, м².

При определении удельной кинетической энергии потока принять $\alpha = 1,1$.

Полная удельная энергия потока определяется по формуле 3.1.

Потери энергии между сечениями определяются по формуле 3.2. На основании 1, 2 и 6 граф таблицы над схемой трубопровода строятся геометрическая, пьезометрическая и напорная линии.

5. Вопросы для самопроверки

1. Объясните геометрический и энергетический смысл уравнения Бернулли.
2. Какие существуют ограничения для применения уравнения Бернулли?
3. Что учитывает коэффициент Кориолиса?
4. В каком случае соседние пьезометры, установленные на трубопроводе переменного сечения, покажут одинаковые значения напоров?
5. Будут ли отличаться показания первого и седьмого пьезометров при открытом вентиле на входе и закрытом вентиле на выходе из трубопровода?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ГИДРАВЛИЧЕСКОГО ТРЕНИЯ СТАЛЬНОГО ТРУБОПРОВОДА

Цель работы: экспериментальные определения коэффициента гидравлического трения и сравнение его с результатами, вычисленными по формулам.

1. Теория вопроса

Суммарные потери напора, входящие в уравнение Бернулли, включают в себя потери напора по длине и местные потери. Потерями напора по длине называют потери напора, обусловленные работой сил трения, возникающей в движущейся реальной (вязкой) жидкости. При движении реальной жидкости в напорном цилиндрическом трубопроводе потери напора h_l по длине определяются по формуле Дарси-Вейсбаха:

$$h_l = \lambda \cdot \frac{l \cdot v^2}{d \cdot 2g}, \quad (4.1)$$

где λ – коэффициент гидравлического трения, или коэффициент Дарси;

l – длина расчетного участка, м;

d – диаметр расчетного трубопровода, м;

v – средняя скорость потока, м/с;

g – ускорение силы тяжести, м/с².

Коэффициент λ в общем случае зависит от шероховатости стенок трубопровода и числа Рейнольдса, влияние которых проявляется по-разному.

Для определения коэффициента λ существует ряд эмпирических и полуэмпирических формул. При ламинарном режиме (т. е. при $Re \leq 2320$) λ определяется по формуле Пуайзеля.

$$\lambda = \frac{64}{Re}. \quad (4.2)$$

При турбулентном режиме следует выделить три области:

1) область гидравлически гладких труб при значениях числа Рейнольдса в пределах $2320 \leq Re \leq 200 \frac{d}{\Delta}$; коэффициент λ для этой области определяется по формуле П.К. Конакова:

$$\lambda = \frac{1}{(1,81g Re - 1,5)^2}; \quad (4.3)$$

2) переходная область при значениях числа Рейнольдса в пределах

$$200 \frac{d}{\Delta_s} \leq \text{Re} \leq 500 \frac{d}{\Delta_s}.$$

Коэффициент λ для этой области определяется по формуле А.Д. Альтшуля:

$$\lambda = 0,11 \left(\frac{d}{\Delta_s} + \frac{68}{\text{Re}} \right)^{0,25}; \quad (4.4)$$

3) область гидравлически шероховатых труб при значениях числа Рейнольдса

$$\text{Re} > 500 \frac{d}{\Delta_s}.$$

Коэффициент λ для этой области определяется по формуле Б.Л. Шифрина:

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

В вышеперечисленных формулах Δ_s – эквивалентная абсолютная шероховатость стенки трубы (принимается из справочной литературы).

Определение λ по указанным формулам облегчается использованием существующих номограмм.

2. Схема и описание лабораторной установки

Схема лабораторной установки представлена на рис. 3.2 лабораторной работы № 3. Установка имеет два опытных участка трубопровода:

1 - длиной 2,78 м и диаметром 40 мм между сечениями на II и III пьезометрах; 2 - длиной 3,19 м и диаметром 20 мм между сечениями на VI и VII пьезометрах.

3. Порядок выполнения работы

1. До начала работы убедиться, что вентиль 8 полностью открыт.
2. Открыть вентиль 1 и подать в трубопровод некоторую величину расхода.
3. Убедившись в том, что режим движения жидкости в трубе установившийся (характеризуется постоянством уровней в пьезометрах), снять показания пьезометров и занести в таблицу.
4. С помощью водомера и секундомера установить величину расхода, подаваемого в трубопровод.
5. Измерить температуру воды в начале и в конце опыта.
6. Опыты повторяются 4-5 раз.

4. Обработка экспериментальных данных

Таблица 4.1 – Результаты измерений и расчетов

№№ опыта	Средняя температура воды, t, °С	Кинематический коэффициент вязкости, ν , м ² /с	Пьезометрические напоры в сечениях, м		Потери напора по длине, h_f , м	Средняя скорость, v , м/с	Число Рейнольдса, Re	Коэффициент гидравлического трения	
			Начальное сечение, II или VI	Конечное сечение, III или VII				Опытный	Вычисленный

Кинематический коэффициент вязкости определяется по справочной литературе в зависимости от средней температуры воды. Потери напора по длине определяются как разность пьезометрических напоров во II и III сечениях и в VI и VII сечениях.

Средняя скорость воды в трубопроводе вычисляется по известной формуле:

$$v = \frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot d^2}, \text{ м/с} \quad (4.6)$$

где $Q = \frac{W}{\tau}, \text{ м}^3/\text{с}.$

Число Рейнольдса вычисляется по формуле $Re = \frac{v \cdot d}{\nu}$, и по его величине определяется режим движения и область сопротивления воды в трубопроводе. Опытные значения λ получают из формулы 4.1.

$$\lambda = \frac{2g \cdot d \cdot h_f}{l \cdot v^2}. \quad (4.7)$$

В зависимости от области сопротивления вычисляется величина коэффициента λ по формулам (4.2) – (4.5) и сравнивается с экспериментальными значениями.

5. Вопросы для самопроверки

1. Дайте определение потерям напора по длине.
2. Как выглядит формула Дарси-Вейсбаха?
3. Какие области сопротивления существуют при турбулентном движении жидкости в трубопроводе?
4. От чего в общем случае зависит коэффициент гидравлического трения?
5. Почему потери напора по длине для трубопровода постоянного сечения равны разности пьезометрических напоров?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 5

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТОВ МЕСТНЫХ СОПРОТИВЛЕНИЙ

Цель работы: определение экспериментальных значений коэффициентов местных сопротивлений в случае резкого расширения, резкого сужения, поворота трубопровода и сопоставление их со справочными данными.

1. Теория вопроса

На отдельных участках трубопровода, где имеются повороты, изменения сечений и т.д., возникают местные потери, обусловленные работой сил трения. Эти силы трения в зонах резко изменяющегося движения жидкости распределяются в потоке весьма неравномерно. В этих местах происходит изменение скоростей потока по величине и направлению, отрыв транзитной струи от стенок трубы с образованием водоворотных областей. Возмущение сопротивления сказывается на расстоянии 10-15 диаметров трубопровода.

Местную потерю напора принято вычислять по формуле Вейсбаха в долях скоростного напора:

$$h_m = \zeta_m \frac{v^2}{2g}, \text{ м,} \quad (5.1)$$

где ζ_m – безразмерный коэффициент местного сопротивления;

v – средняя скорость потока за участком с местным сопротивлением, м/с.

Из выражения (5.1) опытное значение коэффициента местного сопротивления:

$$\zeta_m = \frac{2gh_m}{v^2}. \quad (5.2)$$

2. Схема и описание лабораторной установки

Схема лабораторной установки представлена в лабораторной работе № 3 (рис. 3.2).

Резкое расширение исследуется на участке трубопровода между сечениями I и II, резкое сужение – между сечениями III и IV.

Выходной участок трубопровода (между сечениями IV и VI) представлен двумя поворотами ($\alpha = 90^\circ$). На этом участке определяется величина потерь напора как на резком повороте.

3. Порядок выполнения работы

1. До начала работы убедиться, что вентиль 8 полностью открыт.
2. Открыть вентиль 1 и подать в трубопровод некоторую величину расхода.

3. Убедившись в том, что режим движения жидкости в трубе установившийся (характеризуется постоянством уровней в пьезометрах), снять показания пьезометров и занести в таблицу.

4. С помощью водомера и секундомера установить величину расхода, подаваемого в трубопровод.

5. Измерить температуру воды в начале и в конце опыта.

6. Опыты повторяются 4-5 раз.

Таблица 5.1 – Результаты измерений

Вид сопротивления	Отсчеты по пьезометрам						Объем воды по показаниям водомера, W, л	Время отсчета, τ, с
	I	II	III	IV	IV	VI		
Резкое расширение	+	+						
Резкое сужение			+	+				
Поворот трубы					+	+		

4. Обработка экспериментальных данных

Расход воды в трубопроводе подсчитывается по формуле:

$$Q = \frac{W}{\tau}, \text{ м}^3/\text{с}. \quad (5.3)$$

Средняя скорость движения потока в соответствующих сечениях вычисляется:

$$v = \frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot d^2}, \text{ м/с}. \quad (5.4)$$

Определяется полная удельная энергия потока до местного сопротивления и после него:

$$E = z + \frac{P}{\gamma} + \frac{cv^2}{2g}, \text{ м}, \quad (5.5)$$

где $z + \frac{P}{\gamma}$ – пьезометрический напор в соответствующем сечении (отсчет по пьезометру).

Если пренебречь потерей напора по длине, то местная потеря напора на участке сопротивления определяется как:

$$h_m = E_1 - E_2, \quad (5.6)$$

где E_1 и E_2 – полная удельная энергия потока соответственно до и после сопротивления.

С помощью выражения (5.2) подсчитываются опытные значения коэффициентов сопротивлений, которые сопоставляются с вычисленными или справочными данными.

При определении коэффициента местного сопротивления на повороте трубы по формуле (5.2) величину h_m , как разность полных удельных энергий в сечениях IV и VI, следует разделить на два.

Таблица 5.2 – Результаты расчетов

Вид местных сопротивлений	Средняя скорость в сечениях, v		Полная удельная энергия в сечениях, E		Местные потери напора $h_{\text{м}}$, м	Коэффициент местных потерь	
	до сопротивления, м/с	за сопротивление, м/с	до сопротивления, м	за сопротивление, м		из опыта $\zeta_{\text{м}}$	из справочника $\zeta_{\text{м}}^{\text{с}}$
Резкое расширение							
Резкое сужение							
Повороты трубы							

5. Вопросы для самопроверки

1. Чем вызываются местные потери напора?
2. Как выглядит формула для определения потерь напора?
3. Как опытным путем определить величину местной потери напора на сопротивлении?
4. На какой длине потока сказывается возмущение сопротивления?
5. От каких параметров зависит коэффициент местного сопротивления?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 6

ИССЛЕДОВАНИЕ ИСТЕЧЕНИЯ ЖИДКОСТИ ИЗ ОТВЕРСТИЙ И НАСАДКОВ ПРИ ПОСТОЯННОМ НАПОРЕ

Цель работы: экспериментальное определение коэффициентов расхода, скорости, сжатия и сопротивления при истечении жидкости из отверстия в тонкой стенке и насадок при постоянном напоре и сравнение полученных значений со справочными.

1. Теория вопроса

Малым называется такое отверстие, при расчете истечения из которого пренебрегают скоростью подхода. Для этого должно соблюдаться условие:

$$d \leq 0,1 H, \quad (6.1)$$

где d – диаметр отверстия;

H – напор над центром отверстия.

Стенка считается в гидравлическом смысле тонкой, если ее толщина $\delta \leq (2-2,5)d$. Струя жидкости на выходе из отверстия резко сужается. Такое сжа-

тие обусловлено инерцией частиц жидкости, движущихся при подходе к отверстию по криволинейным траекториям. При этом на расстоянии $l_0 \approx 0,5d$ от внутренней поверхности стенки формируется сжатое сечение. Площадь этого сечения определяется зависимостью:

$$w_c = \varepsilon \cdot w, \quad (6.2)$$

где ε – коэффициент сжатия струи;
 w – площадь отверстия.

Средняя скорость в сжатом сечении определяется по формуле:

$$V_c = \varphi \sqrt{2gH}, \text{ м/с}, \quad (6.3)$$

где φ – безразмерный коэффициент скорости;
 g – ускорение силы тяжести, м/с^2 .

Величину коэффициента скорости можно определить из формулы:

$$\varphi = \frac{x}{2\sqrt{H \cdot y}}, \quad (6.4)$$

где x и y – абсцисса и ордината траектории струи в системе координат с началом, лежащем в центре сжатого сечения.

Расход жидкости при истечении из отверстия определяется по формуле:

$$Q = \mu \cdot w \sqrt{2gH}, \quad (6.5)$$

где μ – коэффициент расхода;
 w – площадь отверстия, м^2 .

Из формулы (6.5):

$$\mu = \frac{Q}{w\sqrt{2gH}}. \quad (6.6)$$

Коэффициент расхода представляет отношение действительного расхода жидкости к расходу идеальной жидкости без учета сжатия струи.

Коэффициент сжатия струи определяется по зависимости:

$$\varepsilon = \frac{\mu}{\varphi}. \quad (6.7)$$

Коэффициент сопротивления определяется по формуле:

$$\zeta = \frac{1}{\varphi^2} - 1. \quad (6.8)$$

Насадком называется короткая напорная труба длиной $(3-4)d$, присоединенная к отверстию. При гидравлическом расчете насадка учитываются только местные потери напора.

Различают следующие основные типы насадков: внешний цилиндрический насадок (насадок Вентури), внутренний цилиндрический насадок (насадок Борда), конический, коноидальный. Насадки увеличивают пропускную способность отверстия.

Расчетные зависимости при истечении жидкости через насадки те же, что и при истечении из отверстий. Следует заметить, что в формуле (6.5) величина w – площадь насадка на выходе.

При движении жидкости в насадке Вентури образуется сжатое сечение, после которого струя расширяется и вытекает полным сечением. Сжатую зону струи в насадке охватывают водоворотные области, где возникает вакуум ($P_{\text{вак}} \approx 0,94H$).

2. Схема и описание лабораторной установки

Схема лабораторной установки представлена на рис. 6.1.

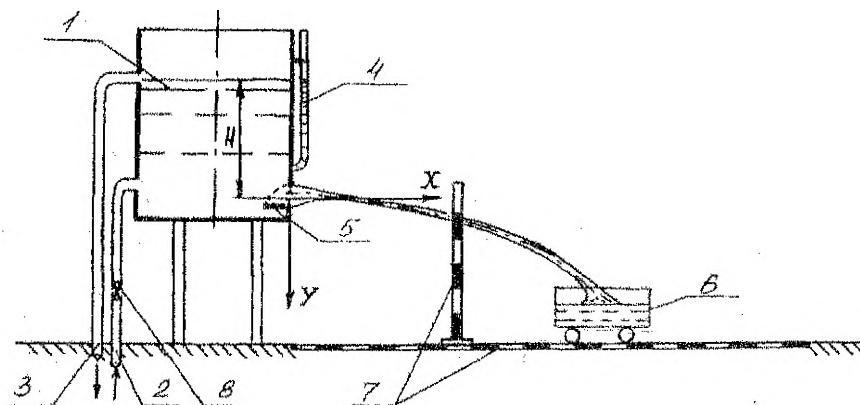


Рисунок 6.1

Вода в емкость 1, в стенке которой сделан специальный круглый вырез, поступает по трубопроводу 2. Расход воды, поступающей в емкость, регулируется вентилем 8. Для поддержания постоянного напора, величина которого измеряется пьезометром 4, служит труба 3. Отверстие в емкости может перекрываться клапаном 5. Измерение расхода струи производится с помощью мерного сосуда 6, установленного на тележке. Для измерения координат центра произвольного сечения струи служит координатник 7.

3. Порядок проведения работы

1. Открыть вентиль на подающем трубопроводе.
2. После установления в емкости постоянного напора, о чем свидетельствует пьезометр, открыть клапан отверстия.

3. По пьезометру измерить напор и с помощью координатника определить координаты в трех произвольных сечениях струи.

4. Измерить объем воды в мерной емкости, наполнившейся за определенный период времени.

5. Отверстие перекрыть и закрепить насадок Вентури.

6. Опыт повторить с измерением вакуума в насадке.

4. Обработка экспериментальных данных

Таблица 6.1 – Результаты измерений и расчетов

Исследуемый объект	Площадь сечения, $w, \text{м}^2$	Объем воды в мерном сосуде, $W, \text{м}^3$	Время наполнения, $\tau, \text{с}$	Расход, $Q, \text{м}^3/\text{с}$	Напор, $H, \text{м}$	μ	φ	ε	ζ	$h_{\text{вак}}, \text{м}$
Отверстие										
Насадок Вентури										

Таблица 6.2 – Координаты сечений струи

Исследуемый объект	Координаты	Точки		
		1	2	3
Отверстие	$x, \text{м}$			
	$y, \text{м}$			
Насадок Вентури	$x, \text{м}$			
	$y, \text{м}$			

Расход воды определяется по формуле:

$$Q = \frac{W}{\tau}, \text{м}^3/\text{с}. \quad (6.9)$$

Коэффициенты расхода, скорости, сжатия и сопротивления для малого отверстия и насадка Вентури подсчитываются по формулам (6.6), (6.4), (6.7) и (6.8) и сравниваются со справочными данными.

6. Вопросы для самопроверки

1. Что подразумевается под малым отверстием, тонкой стенкой, насадком?
2. В чем заключается физический смысл коэффициентов расхода и скорости?
3. Какое соотношение между коэффициентами расхода и скорости, между коэффициентами сопротивления и скорости?
4. Чем объяснить то обстоятельство, что расход жидкости через насадок Вентури больше расхода жидкости через отверстие при прочих равных условиях?
5. Вследствие чего в области сжатия струи насадка возникает вакуум?
6. Как выглядит формула расхода через отверстие и насадок?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 7

ИССЛЕДОВАНИЕ НЕПОДТОПЛЕННОГО ВОДОСЛИВА С ТОНКОЙ СТЕНКОЙ

Цель работы: экспериментальное определение коэффициента расхода неподтопленного прямоугольного водослива с тонкой стенкой без бокового сжатия и сравнение его с результатами, вычисленными по формуле Р.Р. Чугаева

1. Теория вопроса

Сооружение, через гребень которого происходит перелив жидкости, называется водосливом.

По форме стенки (порога) различают водосливы: а) с тонкой стенкой; б) практического профиля; в) с широким порогом.

К водосливам с тонкой стенкой относятся сооружения, при переливе через которые струя полностью отрывается от гребня и толщина стенки не влияет на форму струи. Это происходит в том случае, если гребень имеет заостренную форму или толщина стенки с плоским горизонтальным гребнем относительно мала:

$$\delta \leq 0,67H, \quad (7.1)$$

где δ — толщина стенки водослива;

H — геометрический напор на гребне водослива.

По форме выреза водосливы с тонкой стенкой подразделяются на: а) прямоугольные; б) треугольные; в) трапециевидные; г) параболические.

По условиям протекания через прямоугольные отверстия и в зависимости от соотношения размеров ширины отверстия (b) и подводящего канала (B) водосливы могут быть: а) без бокового сжатия, когда $b = B$; б) с боковым сжатием, когда $b < B$. По типам сопряжения переливающейся струи с нижним бьефом различают водосливы: а) неподтопленные; б) подтопленные.

Прямоугольный водослив будет неподтопленным, если выполняется соотношение:

$$h_6 < P, \quad (7.2)$$

где h_6 — глубина воды в нижнем бьефе (н.б.);

P — высота водослива со стороны н.б.

Расход жидкости через неподтопленный прямоугольный водослив с тонкой стенкой без бокового сжатия определяется по формуле:

$$Q = m_0 b \sqrt{2g} \cdot H^{\frac{3}{2}}, \text{ м}^3/\text{с}, \quad (7.3)$$

где m_0 — коэффициент расхода с учетом скорости подхода потока к водосливу;

g — ускорение силы тяжести.

Коэффициент расхода может быть определен по различным эмпирическим формулам (Базена, Ребока и др.). Наиболее рациональной является формула Р.Р. Чугаева:

$$m_0 = 0,402 + 0,054 \frac{H}{P}. \quad (7.4)$$

2. Схема и описание лабораторной установки

Опыты проводятся на модели водослива, установленного в гидравлическом лотке (рис. 7.1).

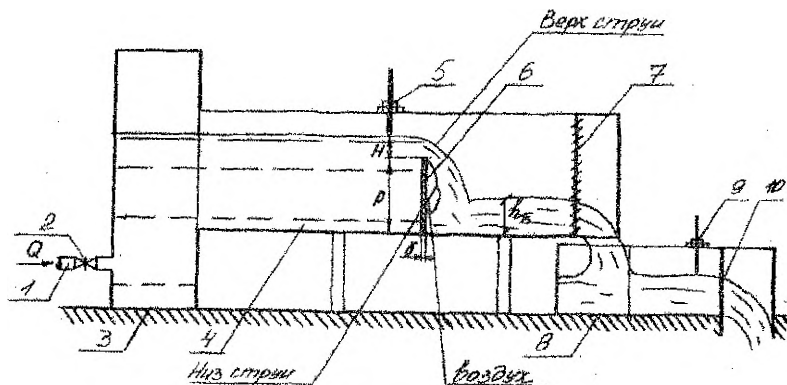


Рисунок 7.1

Расход жидкости, подаваемой в гидравлический лоток 4, определяется с помощью мерного водослива 10, смонтированного в емкости 8. Измерение высоты водослива, напора и глубин потока производится с помощью игольчатых уровнемеров 5 и 9. Для измерения глубины в н.б. используется затвор-жалюзи 7.

3. Порядок выполнения работы

1. Измерить параметры водослива (P , b , δ).
2. Открыть задвижку 2, находящуюся на напорном трубопроводе 1, и подать в лоток через емкость 3 некоторую величину расхода.
3. С помощью затвора установить требуемую глубину воды в н. б. ($h_b < P$).
4. Измерить величину напора на гребне водослива и глубину в н. б. (напор определяется на расстоянии $3H$ от водослива).
5. Определить, используя мерный водослив, величину расхода, подаваемого в гидравлический лоток.
6. Манипулируя задвижкой 2, изменить величину расхода и повторить опыты 2-3 раза.

Результаты опытов заносятся в таблицу.

4. Обработка экспериментальных данных

Расход жидкости определяется по формуле Томсона:

$$Q = 1,4 H_1^{\frac{5}{2}}, \quad (7.5)$$

где Q – расход, м³/с;

H_1 – напор на мерном водосливе, м.

Опытное значение коэффициента расхода $m_{o,оп}$ определяется из формулы (7.3), а теоретическая величина $m_{o,т}$ – из формулы (7.4).

В работе следует определить отклонение опытных и теоретических величин коэффициентов расхода и отразить результат в выводе.

Таблица 7.1 – Результаты измерений и расчетов

№ опыта	Параметры модели водослива			H, м	h _б , м	H ₁ , м	Расчетные величины						
	P, м	b, м	δ, м				$\frac{\delta}{H}$	P-h _б , м	Q, м ³ /с	$m_{o,оп}$	$m_{o,т}$	$\left(\frac{m_{o,оп}}{m_{o,т}} - 1 \right) 100\%$	
1													
2													
3													

5. Вопросы для самопроверки

1. Что называется водосливом?
2. Как классифицируются водосливы?
3. Какие условия затопления водосливов с тонкой стенкой?
4. В каком створе измеряется напор на гребне водослива?
5. Как выглядит основная расчетная формула для прямоугольного водослива?

ЛИТЕРАТУРА

1. Калишун, В.И. Гидравлика, водоснабжение и канализация / В.И. Калишун, В.С. Кедров, Ю.М. Ласков. – М.: Стройиздат, 1980. – 359 с.
2. Альтшуль, А.Д. Гидравлика и аэродинамика / А.Д. Альтшуль, Л.С. Животовский, Л.П. Иванов. – М.: Стройиздат, 1987. – 410 с.
3. Вильнер, Я.М. Лабораторный практикум по гидравлике, гидромашинам и гидроприводу / Я.М. Вильнер, И.П. Вопнярский, В.И. Кузменков [и др.]. – Минск: Выш. школа, 1980. – 224 с.
4. Справочник по гидравлическому расчету / Под ред. П.Г. Киселева [и др.]. – М.: Энергия, 1972. – 312 с.
5. Чугаев, Р.Р. Гидравлика. – Л.: Энергоиздат, 1982. – 672 с.

Учебное издание

Составители:

*Сергей Григорьевич Белов
Григорий Остапович Наумчик
Екатерина Сергеевна Рыбак*

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

к выполнению лабораторных работ по дисциплине
«Механика жидкости и газа»
для студентов специальности 1 – 70 02 01
«Промышленное и гражданское строительство»

Ответственный за выпуск: Наумчик Г.О.
Редактор: Боровикова Е.А.
Компьютерная вёрстка: Соколюк А.П.
Корректор: Никитчик Е.В.

Подписано в печать 24.01.2017 г. Формат 60x84 ¹/₁₆. Бумага «Performer».
Гарнитура «Times New Roman». Усл. печ. л. 1,4. Уч. изд. л. 1,5. Заказ № 1205. Тираж 120 экз.
Отпечатано на ризографе учреждения образования «Брестский государственный
технический университет». 224017, г. Брест, ул. Московская, 267.