

МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ

ФГБОУ ВО «Кубанский государственный
аграрный университет имени И. Т. Трубилина»

Факультет гидромелиорации

Кафедра гидравлики и сельскохозяйственного водоснабжения

МЕХАНИКА ЖИДКОСТИ И ГАЗА

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

к выполнению лабораторных работ

для студентов специальности

08.05.01 Строительство уникальных зданий и сооружений

Краснодар
КубГАУ
2019

Составители: А. Н. Куртнезирова, В. В. Моисеев, Х. И. Килиди

Механика жидкости и газа : метод. указания к выполнению лабораторных работ/ сост. А. Н. Куртнезирова, В. В. Моисеев, Х. И. Килиди. – Краснодар : КубГАУ, 2019. – 98 с.

В методических указаниях приведены основные теоретические положения механики жидкости и газа, а также дана методика выполнения лабораторных работ.

Предназначены для студентов, обучающихся по специальности 08.05.01 «Строительство уникальных зданий и сооружений».

Рассмотрено и одобрено методической комиссией архитектурно-строительного факультета Кубанского государственного аграрного университета, протокол № 2 от 22.10.2019.

Председатель
методической комиссии



А. М. Блягоз

- © Куртнезирова А. Н., Моисеев В. В.,
Килиди Х. И.,
составление, 2019
- © ФГБОУ ВО «Кубанский
государственный аграрный
университет имени
И. Т. Трубилкина», 2019

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1

ГИДРОСТАТИЧЕСКОЕ ДАВЛЕНИЕ.

ПРИБОРЫ ДЛЯ ЕГО ИЗМЕРЕНИЯ. ЗАКОН ПАСКАЛЯ

1 ЦЕЛЬ РАБОТЫ

- Ознакомиться с основными теоретическими положениями. Изучить виды давлений и шкалы их отсчета.
- Изучить устройство и принцип действия приборов для измерения давлений. Изучить свойства гидростатического давления.
- Установить связь изменения давления в данной точке жидкости с изменением давления на её поверхности.
- Определить гидростатическое давление в жидкости на различных глубинах от её поверхности.

2 ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

2.1 Понятие о гидростатическом давлении

В гидростатике изучается жидкость, находящаяся в состоянии покоя. В покоящейся жидкости касательные напряжения равны нулю. Поэтому, в покоящейся жидкости, считаем, что в любой её точке может иметь место только нормальные напряжения: $\sigma = \sigma_n$.

Основным понятием гидростатики является понятие гидростатического давления в данной точке покоящейся жидкости. Это давление принято обозначать буквой p . Гидростатическим давлением p в данной точке жидкости называют скалярную величину, равную модулю напряжения σ в рассматриваемой точке

$$p = |\sigma| \quad (1.1)$$

Гидростатическое давление обладает двумя важными свойствами:

1. На поверхности жидкости гидростатическое давление всегда направлено по нормали внутрь рассматриваемого объема.
2. В любой точке внутри жидкости гидростатическое давление по всем направлениям одинаково, т.е. давление не зависит от угла наклона площадки, на которую оно действует в данной точке.

В случае, когда на жидкость, находящуюся в состоянии покоя, действует только одна сила тяжести, величина гидростатического давления определяется по формуле

$$p = p_0 + \rho gh \quad (1.2)$$

где p – абсолютное давление в рассматриваемой точке, $Па$;

p_0 – внешнее поверхностное давление, $Па$;

ρgh – весовое давление, обусловленное весом самой жидкости, $Па$;

h – глубина погружения рассматриваемой точки под уровнем свободной поверхности, $м$.

Из выражения 1.2 видно, что абсолютное давление в точке равно сумме внешнего поверхностного давления и весового давления (избыточного), а также видно, на сколько увеличится внешнее поверхностное давление p_0 , на столько же должно возрасти и абсолютное давление в данной точке покоящейся жидкости.

В случае, когда на поверхность покоящейся жидкости действует атмосферное давление $p_{ат}$ формула (1.2) принимает вид

$$p = p_{ат} + \rho gh, \quad (1.3)$$

Давление, избыточное над атмосферным, называется манометрическим давлением (p_m).

Недостаток давления до атмосферного называется вакуумметрическим давлением или просто вакуумом (p_v).

Связь между абсолютным, избыточным давлением и вакуумом можно представить в виде зависимостей

$$p = p_{ат} + p_m, \quad (1.4)$$

$$p = p_{ат} - p_v. \quad (1.5)$$

2.2 Единицы измерения давления и связь между ними

Величину гидростатического давления в международной системе измерений (СИ) выражают в Паскалях ($Па$). Паскаль ($Па$) равен отношению силы, определяемой в Ньютонах ($Н$), к площади, выраженной в $м^2$, то есть $1 Па = 1 Н / м^2$. Давление можно выражать и в производных единицах измерения, то есть: в Мега Паскалях ($МПа$); кило Паскалях ($кПа$) и др. Соотношение между этими единицами измерения давления следующее

$$1 МПа = 10^6 Па; 1 кПа = 10^3 Па.$$

На практике величину гидростатического давления часто выражают в других единицах измерения (так называемых внесистемных единицах). Наиболее распространены выражения величины давления в $кг/см^2$, $ат$ (техническая атмосфера), $мм.рт.ст.$ (миллиметры ртутного столба). Соотношения между единицами измерения давления

$$1 кг/см^2 = 1 ат = 10 м.вод.ст. = 98100 Па.$$

$$1 \text{ мм.рт.ст.} = 133 \text{ Па};$$

$$1 \text{ кг/см}^2 = 735 \text{ мм.рт.ст.}$$

При переводе единиц измерения давления из одной системы измерения в другую необходимо учитывать температуру жидкости. Температура оказывает влияние на плотность жидкости.

2.3 Приборы для измерения давления

Гидростатическое давление в зависимости от его величины, а также условий его измерения определяется различными по конструкции приборами. Приборы для измерения давления классифицируются по различным признакам: виду и значению измеряемого давления, принципу действия прибора, его назначению и классу точности.

По виду измеряемого давления приборы делятся на манометры, вакуумметры, мано-вакуумметры и барометры.

Манометры – это приборы, предназначенные для измерения давления или разности давлений. Абсолютные давления измеряют манометрами абсолютного давления, а разность давлений в двух произвольных точках – дифференциальными манометрами.

Вакуумметры – это приборы для измерения разряжения (вакуума).

Избыточное давление и разряжение измеряют мановакуумметрами; а атмосферное давление – барометрами.

Приборы, предназначенные для высокоточных измерений малых давлений (до 2,5 кПа), называют **микроманометрами**.

По принципу действия приборы для измерения давления делят на жидкостные, деформационные (пружинные), грузопоршневые и электрические.

Жидкостные приборы – это такие, в которых усилие, вызываемое измеряемым давлением, уравновешивается массой столба жидкости, залитой в прибор.

В деформационных приборах измеряемое давление определяют по деформации различных упругих чувствительных элементов или по развиваемой ими силе.

В грузопоршневых приборах измеряемое давление уравновешивается массой грузов, действующих на поршень определённого диаметра.

По назначению приборы подразделяются на технические (рабочие), контрольные, образцовые и эталонные.

По классу точности приборы для измерения давления выпускаются следующие:

- образцовые – 0,02 (первого разряда), 0,05 – (второго разряда), 0,15 и 0,25 (третьего разряда), 0,4 – (четвертого разряда);
- технические (рабочие) – 0,4; 0,6; 1,0; 1,5; 2,0; 4,0.

ЖИДКОСТНЫЕ ПРИБОРЫ. Жидкостные манометры простые и точные приборы, служащие для определения небольших избыточных давлений или разрежений. Простейшим жидкостным прибором является стеклянная трубка, называемая пьезометром (рисунок 1.1). Нижний конец трубки устанавливается в точке, где измеряется давление, другой конец пьезометра (верхняя его часть) открыт и сообщается с атмосферой.

Двухтрубный U-образный манометр состоит из двух соединенных внизу стеклянных измерительных трубок, закрепленных на вертикальном основании. Служит для измерения давления разрежения. Между трубками помещена шкала с нулевой отметкой посередине. Трубки заполнены уравнивающей жидкостью (ртутью, дисцилированной водой или этиловым спиртом) до нулевой отметки шкалы. Одна из них сообщается с измеряемой средой, другая - с атмосферой. Трубка, соединенная со средой большего давления обозначается знаком $< + >$ (плюсовая трубка), а трубка, соединенная со средой меньшего давления, знаком $< - >$ (минусовая трубка).

При включении манометра измеряемое давление уравнивается столбом жидкости высотой h , отсчитываемой по шкале прибора. Так как уровень жидкости в плюсовой трубке понижается, а в минусовой поднимается, то общая высота будет равна сумме отсчетов по шкале выше или ниже нулевой отметки.

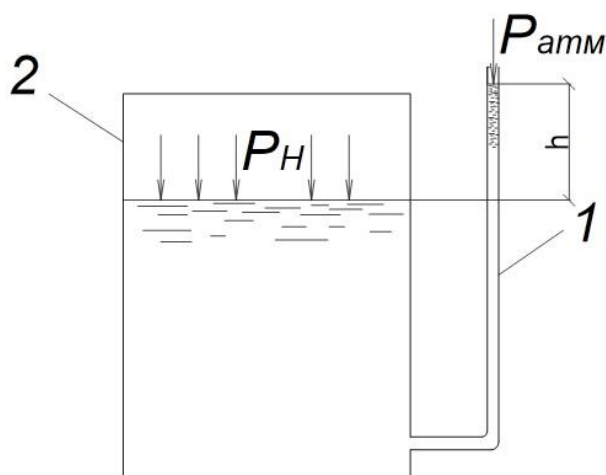
ДЕФОРМАЦИОННЫЕ ПРИБОРЫ. К ним относятся: трубчато-пружинные показывающие манометры, вакуумметры и мановакуумметры; трубчато - пружинные самопишущие манометры, вакуумметры и мановакуумметры; образцовые манометры и вакуумметры.

Деформационные приборы применяют для измерения давления и разрежения жидкостей, газа, и пара в трубопроводах, они обеспечивают достаточно высокую для технических целей точность измерений в широком диапазоне давлений и разрежений (от 100 Па до 1000 МПа).

Действие деформационных приборов основано на уравнивании усилия, вызванного измеряемым давлением, силой упругости чувствительного элемента прибора. Чувствительные элементы прибора бывают различных типов: одновитковые и многovitковые трубчатые пружины; упругие мембраны и мембранные коробки; сифоны и др.

Манометры. Чувствительным элементом показывающего трубчато - пружинного манометра (рисунок 1.2) служит одновитковая трубчатая пружина, представляющая собой пружинную трубку эллиптического или овального сечения, согнутую по спирали. Нижний конец трубки впаян в держатель, в верхний конец трубки впаяно ушко.

Под действием измеряемого давления сечение трубчатой пружины деформируется, стремясь принять круглую форму, вследствие чего в материале возникают напряжения, приводящие к раскручиванию трубки. Для передачи упругой деформации на стрелку прибора служит механизм с зубчатой передачей. При деформации свободный конец перемещается и тянет за собой поводок, поворачивая при этом зубчатый сектор и шестеренку, на оси которой жестко закреплена стрелка. По положению стрелки на шкале судят о значении измеряемого давления. Вакуумметры и мановакуумметры по своему устройству и принципу действия аналогичны трубчато - пружинным манометрам. Вакуумметры имеют одностороннюю шкалу с конечным значением диапазона показаний вакуумметрического давления – 00,6 или 0,1 МПа, а мановакуумметры – двухстороннюю шкалу, влево от нуля, которой нанесены отметки вакуумметрического давления до 0,1 МПа, а вправо – избыточного давления до 0,06 до 0,24 МПа.

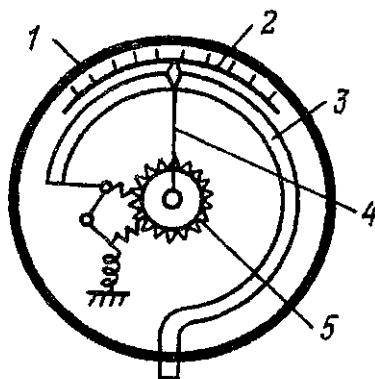


1 – пьезометр; 2 – мерная ёмкость

Рисунок 1.1– Схема подключения пьезометра

3 ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

Установка для изучения методов измерения давления и вакуума, а также демонстрация закона Паскаля представляет собой стальную вертикальную трубу, которая заполняется водой. Для измерения давления в различных точках емкости используются мановакуумметры (MV_1 , MV_2 , MV_0), пьезометр 5. На свободной поверхности можно создать давление: атмосферное, с помощью крана 6; избыточное – воздушного компрессора «К» и вакуум – вакуумметрического насоса «В». После проведения опытов воду из емкости сбрасывают в канализацию через вентиль 8.



1 –корпус; 2 –шкала; 3 –латунная трубка; 4 –стрелка; 5 –передаточный механизм

Рисунок 1.2 –Схема механического пружинного манометра

4 ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

При выполнении работы необходимо рассматривать три случая:

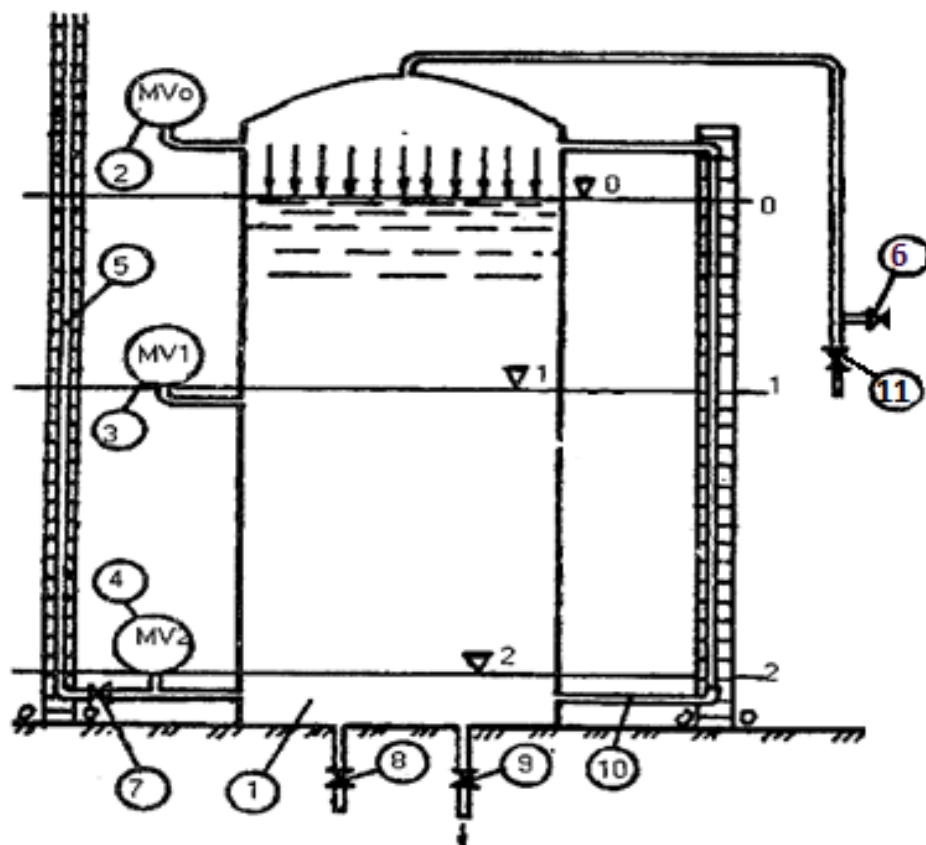
- давление на свободной поверхности жидкости равно атмосферному;
- давление на свободной поверхности жидкости больше атмосферного;
- давление на свободной поверхности жидкости меньше атмосферного.

С помощью крана 8 емкость 1 заполняется водой до определенного уровня, затем на свободной поверхности создается атмосферное давление с помощью крана 12 или 14, измеряются давления мановакумметрами MV_1 , MV_2 , MV_0 , показания пьезометра 5 и высоты h_0 , h_1 и h_2 , показания заносятся в таблицу 1.1.

Затем кран 12 или 14 закрывается, и с помощью крана 8 создается определенное избыточное давление на свободной поверхности, измеряются давления мановакумметрами MV_1 , MV_2 , MV_0 , показания пьезометра 5 и высоты h_0 , h_1 и h_2 , показания заносятся в таблицу 1.1.

С помощью крана 9 создается разрежение на свободной поверхности. Измеряются вакуум по мановакумметрам MV_1 , MV_2 , MV_0 , показания пьезометра 5 и высоты h_0 , h_1 и h_2 , показания заносятся в таблицу 1.1.

Во время всех опытов с помощью термометра измеряется температура воды.



1–напорная емкость; 2,3,4 –мановакумметры; 5 –пьезометр; 6,7,8,9,11–краны; 10 – водомерное стекло.

Рисунок 1.4 –Схема опытной установки

5 ПОРЯДОК РАСЧЕТА

По таблицам, зная температуру воды, определяют ее плотность ρ . Подсчитывают величины $\rho g h_i$ и записывают их в таблицу. Величины избыточных давлений p_{mi} определяют по формуле

$$p_{mi} = p_{0i} + \rho g h_i, \quad (1.6)$$

Затем полученные значения сравнивают с показаниями мановакуметров p_0 , p_1 , p_2 . Давление в точке, измеренное с помощью пьезометра, сравнивается с показанием мановакуметра MV_2 . Величину вакуума определяют по формуле

$$p_{vi} = p_{0i} - \rho g h_i, \quad (1.7)$$

Контрольные вопросы:

1. Что такое гидростатическое давление.
2. В каких единицах измеряется гидростатическое давление.
3. Написать и пояснить формулы для расчета гидростатического давления.
4. Виды давлений.

5. Сколько и какие случаи внешнего поверхностного давления рассмотрено в лабораторной работе.
6. От чего зависит весовое давление.
7. От каких параметров зависит плотность рассматриваемой жидкости.
8. Какие приборы для измерения давления Вы изучили.
9. Как подразделяются по классу точности приборы для измерения давления.
10. Объяснить устройство и принцип действия приборов для измерения давлений.
11. Какие шкалы для отчета давлений Вы изучили.
12. Рассказать о свойствах гидростатического давления.
13. Как на рассматриваемой установке создать вакуумметрическое давление.
14. Как на рассматриваемой установке создать избыточное давление.
15. Каким прибором снимаются показания уровня воды в напорной емкости.

Таблица 1.1 – Результаты измерений и расчетов гидростатического давления

ЗАМЕРЫ													РАСЧЕТ ИЗБЫТОЧНОГО ДАВЛЕНИЯ И ВАКУУМА						
№ п/п	p_0		p_1		p_2		h_0	h_1	h_2	h_B	T	ρ	$\rho g h_0$	$\rho g h_1$	$\rho g h_2$	$\rho g h_B$	P_0	P_1	P_2
	кгс/см ²	Па	кгс/см ²	Па	кгс/см ²	Па	м	м	м	м	°C	кг/м ³	Па	Па	Па	Па	Па	Па	Па
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
1																			
2																			
3																			

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2
ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТИ РАВНОГО ДАВЛЕНИЯ
ЖИДКОСТИ ВО ВРАЩАЮЩЕМСЯ СОСУДЕ ПРИ
ОТНОСИТЕЛЬНОМ ПОКОЕ

1 ЦЕЛЬ РАБОТЫ

- Исследовать форму поверхности равного давления жидкости во вращающемся сосуде.
- Произвести аналитический расчет координат свободной поверхности.
- Полученные значения сравнить с опытными данными.

2 ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Геометрическое место точек, испытывающих одинаковое гидростатическое давление, определяет поверхность равного давления. Следовательно, поверхностью равного давления можно считать любую форму поверхности, испытывающую равное давление. Поверхности равного давления располагаются по глубине на равном расстоянии относительно друг друга. Свободная поверхность жидкости (граница раздела между жидкой и газообразной средой) является частным случаем поверхности равного давления.

Рассмотрим сосуд цилиндрической формы, наполненный примерно на половину объема жидкостью, вращающийся вокруг вертикальной оси с постоянной угловой скоростью. На жидкость во вращающемся сосуде действует две массовые силы: сила тяжести и центробежная сила. Свободная поверхность в любой точке жидкости должна быть нормальна к направлению равнодействующей массовых сил, приложенных в этой точке. Вследствие переменного значения силы инерции относительно оси вращения переменным будет и направление равнодействующей. Поэтому свободная поверхность принимает форму криволинейной поверхности - форму параболоида вращения.

Координаты точек свободной поверхности во вращающемся сосуде с постоянной угловой скоростью описываются уравнением параболы. В этом случае координаты параболоида вращения находятся по формуле

$$z_i = z_{min} + \frac{\omega^2 r_i^2}{2g} \quad (2.1)$$

где z_i - координаты свободной поверхности параболоида вращения на расстоянии r_i от оси

вращения, м;

Z_{min} - координата свободной поверхности жидкости в центре вращающегося сосуда ($r_i = 0$), м;

ω - угловая скорость, 1/с;

r_i - расстояние от оси вращения (радиус) до соответствующей координаты свободной поверхности параболоида вращения.

Координаты свободной поверхности на оси параболоида и на максимальном удалении от центра его вращения находятся по соответствующим формулам:

$$Z_{min} = Z_0 - \frac{(\omega R)^2}{4g} \quad (2.2)$$

$$Z_{max} = Z_0 + \frac{(\omega R)^2}{4g} \quad (2.3)$$

где Z_0 - глубина воды в сосуде перед вращением, м;

R - внутренний радиус цилиндрического сосуда, м. $R=0,056$ м;

ω - угловая скорость вращения сосуда, 1/с, вычисляется по зависимости (2.4)

$$\omega = \frac{\pi n}{30}, \quad (2.4)$$

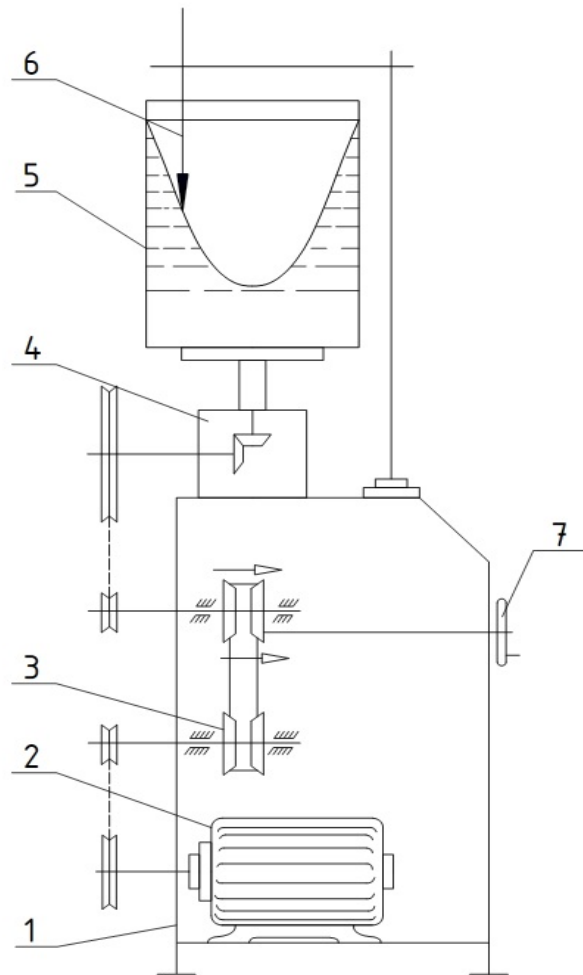
где n - число оборотов вращения цилиндра, об/мин.

Число оборотов вращения цилиндра определяется по формуле

$$n = \frac{30}{\pi R} \sqrt{2g(z_{max} - z_{min})} \quad (2.5)$$

3 ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

Исследование поверхностей равного давления проводится на опытной установке, схема которой приведена на рисунке 2.1. Установка состоит из стеклянного цилиндрического сосуда 5 радиусом равным 0,056м, в котором находится подкрашенная жидкость. Сосуд установлен на станине 1 и приводится во вращение электродвигателем 2 через вариатор 3 и редуктор 4. Регулировка частоты вращения сосуда 5 производится при помощи маховика 7. Уровни жидкости в соответствующих точках измеряются шпигенмасштабом 6.



1 – станина; 2 - электродвигатель 3 – вариатор; 4 – редуктор; 5 – сосуд;
6 - шпигенмасштаб; 7 - маховик

Рисунок 2.1 – Схема опытной установки

4 ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

Измеряются отметки дна сосуда (∇_0 и ∇_d). Затем включается электродвигатель, приводя сосуд с жидкостью во вращение. Вращающаяся жидкость относительно стенок сосуда находится в состоянии относительного покоя. По истечении определенного промежутка времени поверхность жидкости примет установившуюся форму параболоида вращения. В пяти намеченных точках шпигенмасштабом определяются отметки уровня жидкости. Данные замеров заносятся в таблицу 2.1. Частота вращения сосуда вычисляется по формуле (2.5) и с помощью тахометра.

Перед опытом необходимо определить отметки уровня жидкости и дна сосуда.

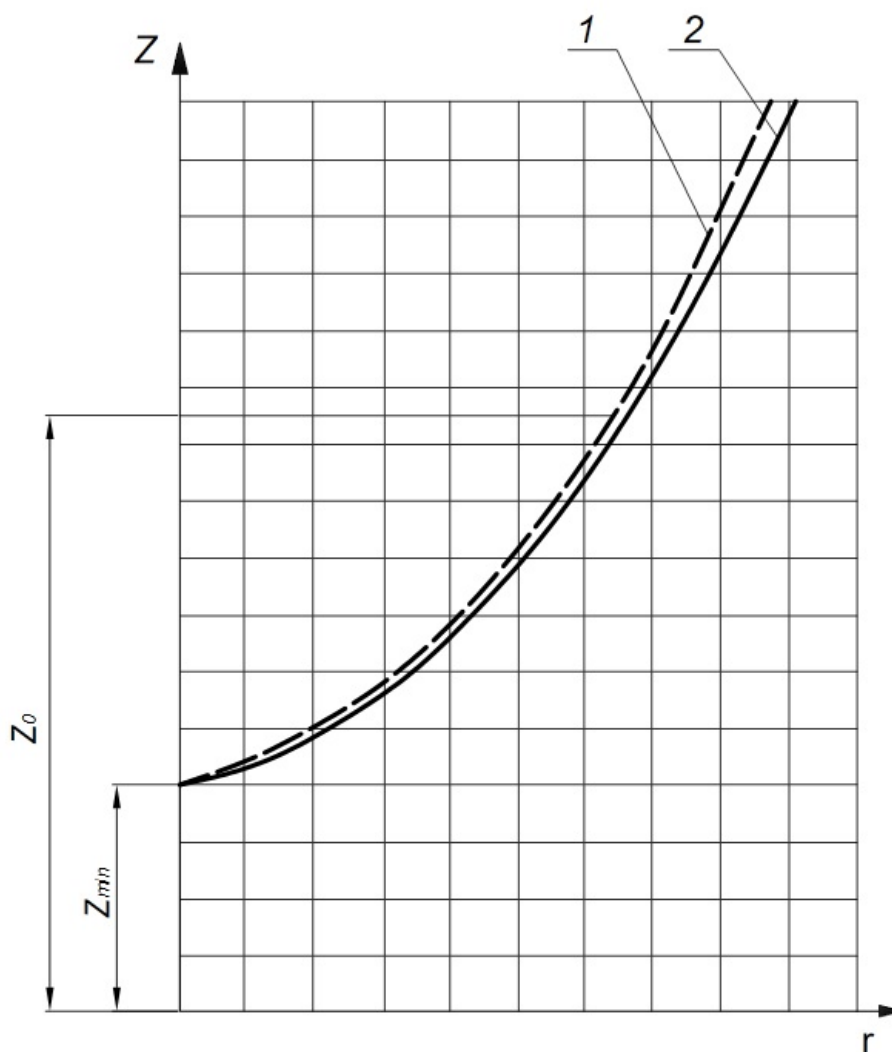
5 ПОРЯДОК РАСЧЕТА

1. Определяется глубина воды в сосуде при $n = 0$; $Z_0 = V_0 - V_d$.
2. Находятся координаты свободной поверхности жидкости во вращающемся сосуде:
при $R_0 = 0$ $Z_{min} = V_{min} - V_d$;
 $R_1 = 0,01м$ $Z_1 = V_1 - V_d$;
 $R_2 = 0,02м$ $Z_2 = V_2 - V_d$;
 $R_3 = 0,03м$ $Z_3 = V_3 - V_d$;
 $R = 0,056м$ $Z_{max} = V_{max} - V_d$.
3. Определяются частота вращения и угловая скорость сосуда с жидкостью по формуле 2.5.
4. Вычисляются расчетные ординаты Z свободной поверхности жидкости во вращающемся сосуде для заданных R_1 ; R_2 и т.д. по формулам (2.1) - (2.3).
5. По опытным и расчетным значениям координат на графике $Z = f(r)$ (рисунок 2.2) строятся опытная и рассчитанная кривая свободной поверхности параболоида вращения.
6. Находится процент отклонения опытных данных от расчетных по формуле (2.6) и заносится в таблицу 2.1

$$\Delta Z = \frac{Z_{оп} - Z_{расч}}{Z_{оп}} \cdot 100\% < 5\% \quad (2.6)$$

Таблица 2.1 - Результаты опыта и вычислений

Наименование параметров	Опытные данные	Расчетные данные	Процент отклонения
Отметка уровня жидкости, ∇_0 , м		-	-
Отметка дна сосуда, ∇_d , м		-	-
Глубина жидкости в сосуде, Z_0 м		-	-
Отметки уровня параболоида вращения на расстоянии R_i от оси, м			
$\nabla_{\min}$		-	-
∇_i		-	-
∇_2		-	-
∇_3		-	-
$\nabla_{\max}$		-	-
Частота вращения, об / мин			
Угловая скорость, 1/с			
Уровни параболоида на расстоянии R_i от оси вращения, м			
$Z_{\min}$			
Z_1			
Z_2			
Z_3			
$Z_{\max}$			



1 - опытный параболоид вращения;

2 - расчетный параболоид вращения

Рисунок 2.2 – Профиль свободной поверхности жидкости во вращающемся сосуде с постоянной угловой скоростью

Контрольные вопросы:

1. Что такое поверхность равного давления?
2. Расположение по вертикали поверхностей равного давления относительно друг друга?
3. Каким уравнением описываются координаты точек свободной поверхности во вращающемся сосуде?
4. Какова величина угловой скорости сосуда, при образовании поверхности равного давления?

5. Под действием каких сил скорость вращения сосуда и находящейся в ней жидкости будут одинаковы?
6. Какие силы действуют на любую точку, находящуюся в жидкости при постоянной угловой скорости?
7. Частный случай поверхности равного давления?
8. От чего зависит ордината вершина параболоида свободной поверхности при постоянной угловой скорости?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №3

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СИЛЫ ГИДРОСТАТИЧЕСКОГО ДАВЛЕНИЯ НА ПЛОСКИЕ ПОВЕРХНОСТИ

1 ЦЕЛЬ РАБОТЫ

- Определить силу избыточного гидростатического давления (силу давления воды) на плоскую вертикальную стенку с помощью графоаналитического расчета.
- Сравнить результаты расчета с результатами опыта.

2 ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Одной из основных задач гидростатики является определение силы давления покоящейся жидкости на различном рода поверхности. По этой силе и точке её приложения производят расчет стенок сосудов, плотин, щитов и т.д.

При изучение раздела «Гидростатическое давление» указывалось, что различают следующие виды давления: барометрическое, абсолютное, избыточное и вакуумметрическое.

Также различают и силы давления: сила барометрического давления, сила абсолютного давления, сила избыточного давления, сила вакуумметрического давления.

Наибольший интерес в инженерной практике представляет сила избыточного (манометрического) давления.

Сила давления воды на плоскую стенку определяется по формуле

$$P = \rho \cdot g \cdot h_c \cdot \omega, \quad (3.1)$$

где P – сила давления воды, H ;

ρ – плотность жидкости, $кг/м^3$.

g – ускорение свободного падения, $м/с$ ($g = 9,81 м/с$);

h_c – глубина погружения центра тяжести стенки, $м$;

ω – площадь стенки, $м$.

Глубина погружения центра тяжести стенки определяется по формуле:

$$h_c = h_n - \frac{h}{2}, \quad (3.2)$$

Площадь стенки определяем по формуле:

$$w = b \cdot h, \quad (3.3)$$

b – ширина стенки.

Кроме силы давления, надо знать точку, через которую проходит её равнодействующая. Эта точка называется центром давления и обозначается D . Для нахождения координаты центра давления пользуются формулой

$$I_d = I_c + \frac{I_0}{I_c \cdot w}, \quad (2.4)$$

где I_d – координата центра давления, м. Определяется как расстояние от свободной поверхности жидкости до точки приложения равнодействующей силы P ; I_c – расстояние по стенке от уреза жидкости до центра тяжести стенки, м;

I_0 – момент инерции площади стенки относительно горизонтальной оси, проходящей через центр тяжести стенки, м.

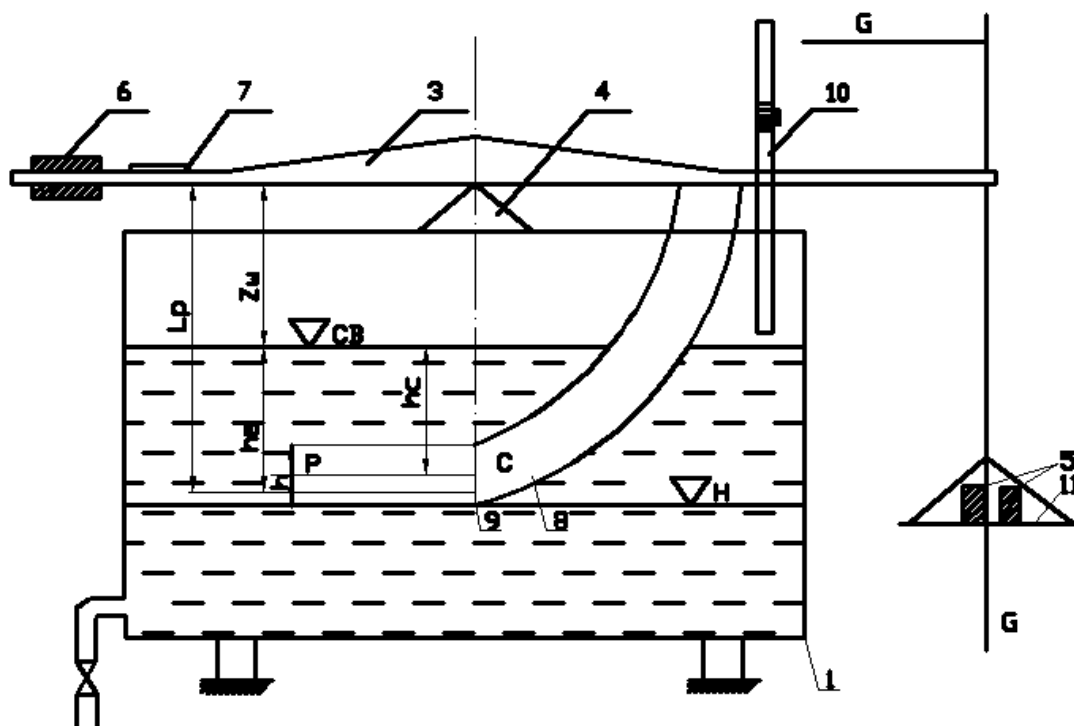
$$I_0 = \frac{b \cdot h^3}{12}, \quad (2.5)$$

Через найденный центр давления проходит равнодействующая сила давления перпендикулярно плоской стенке.

3 ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

Лабораторная установка представляет собой прозрачный прямоугольный резервуар 1, в который заливается вода (рисунок 2.1). В верхней его части, на шарнире 2 устанавливается коромысло 3, с одной стороны которого закрепляется площадка 4 для сменных грузов 5, а с другой стороны находится перемещающийся контргруз 6 для уравнивания коромысла. На коромысле располагаются два уровня 7 для контроля горизонтального положения. С одной стороны от шарнира на коромысле закреплено тело 8, представляющее собой четверть кольца с прямоугольным сечением 9. Ось шарнира является центром этого кольца. Таким образом, равнодействующие сил давления жидкости на верхнюю и нижнюю криволинейные поверхности тела проходят через ось шарнира, и их моменты равны нулю.

Торцевая часть кольца представляет собой плоскую стенку. Сила давления воды, действующая на эту поверхность создает момент силы давления воды, который вращает коромысло вокруг оси шарнира.



1 – резервуар, 2 – шарнир, 3 – коромысло, 4 – площадка, 5 – грузы,
6 – контргруз, 7 – уровни, 8 – тело, 9 – прямоугольное сечение, 10– уровнемер.

Рисунок 2.1 – Схема опытной установки

4 ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

Перед началом работы сливают воду из резервуара и освобождают площадку от грузов. С помощью контргруза устанавливают коромысло в горизонтальное положение, осуществляя контроль по уровням.

Затем в резервуар заливается вода до касания с нижней частью плоской стенки и определяется отметка воды в резервуаре, которая одновременно является отметкой низа плоской стенки.

После этих замеров заполняют водой на произвольную глубину (примерно на 3/4) и определяют отметку свободной поверхности жидкости в резервуаре. Для нахождения отметок низа стенки и свободной поверхности жидкости в резервуаре используют уровнемер.

Под действием силы, действующей на плоскую стенку, коромысло поворачивается вокруг шарнира. С помощью равновесов, установленных на площадке, возвращают коромысло в горизонтальное положение, контролируя по уровням. Все необходимые замеры записываются в таблицу 2.1 и производят расчет.

5 ПОРЯДОК РАСЧЕТА

1. Вычисляем площадь плоской стенки, m^2 по формуле 2.3.

2. Находим глубину погружения низа плоской стенки, m

$$h_n = \nabla_{св} - \nabla_n (2.6)$$

3. Находим глубину погружения центра тяжести плоской стенки, m по формуле 2.2.

4. Определяется теоретическая сила давления воды на плоскую стенку, H по формуле 2.1

5. Находится теоретический центр давления силы P по формуле 2.4, m

6. Вычисляется момент силы давления, Hm

$$M_p = L_p \cdot P, \quad (2.7)$$

где $L_p = h_d + Z_{ш}$ – плечо силы давления, m .

7. Находится момент груза, Hm

$$M_G = L_G \cdot G, \quad (2.8)$$

где L_G – плечо груза, m .

8. $M_p = M_G$

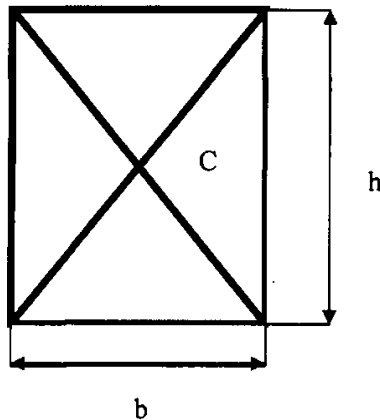


Рисунок 2.2 - Форма и размеры плоской стенки

Таблица 2.1– Данные для выполнения расчета

№ п/п	Наименование	Обозначение	Единица измерения	Данные опыта
1.	Жидкость	<i>вода</i>		
2.	Плотность жидкости	ρ	кг/м^3	
3.	Ускорение свободного падения	g	м/с^2	
4.	Форма стенки	<i>прямоугольная</i>		
5.	Высота стенки	h	м	
6.	Ширина стенки	b	м	
7.	Площадь стенки	w	м^2	
8.	Отметка низа стенки	$\nabla_{\text{н}}$	м	
9.	Отметка свободной поверхности	$\nabla_{\text{св}}$	м	
10.	Глубина погружения низа стенки	$h_{\text{н}}$	м.	
11.	Расстояние от свободной поверхности до оси вращения	$Z_{\text{ш}}$	м	
12.	Глубина погружения центра тяжести стенки	h_c	м	
13.	Сила давления жидкости на стенку	P	Н	
14.	Момент инерции стенки	I_0	м^4	
15.	Центр давления	h_d	м	
16.	Плечо силы давления	L_p	м	
17.	Момент силы давления	M_p	Нм	
18.	Вес груза	G	Н	
19.	Плечо груза	L_G	м	
20.	Момент груза	M_G	Нм	

Контрольные вопросы:

1. Что мы понимаем под гидростатическим давлением.
2. как определить силу избыточного гидростатического давления.
3. Область применения расчетов избыточного гидростатического давления.
4. Какие виды давления были изучены.
5. Какие силы давления были изучены.
6. Привести формулу к расчету силы давления на плоскую стенку и дать к ней пояснения.

7. От чего зависит величина силы давления воды.
8. Привести формулу к расчету координаты центра давления и дать к ней пояснения.
9. Привести формулу к расчету момента инерции и дать к ней пояснения.
10. Как рассчитывается момент груза.
11. Как рассчитывается момент силы давления.
12. Какое устройство используют для нахождения отметок низа стенки и свободной поверхности жидкости в резервуаре.
13. Как рассчитывается плечо силы давления.
14. Как рассчитывается глубина погружения центра тяжести плоской стенки.
15. Какое влияние оказывает плотность жидкости на величину гидростатического давления.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4

ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ ГИДРОДИНАМИКИ

1 ЦЕЛЬ РАБОТЫ

- Изучить характеристики потока жидкости.
- Определить расход потока жидкости различными методами.
- Подтвердить уравнение неразрывности потока.
- Изучить виды движения жидкости.

2 ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

В гидродинамике рассматриваются законы механического движения жидкостей и методы применения этих законов в инженерной практике. Большинство этих задач связано с движением жидкости: движение воды в водопроводных сетях, канализационных и дренажных трубах, в каналах и реках, в судоходных шлюзах, через плотины, в насосах и турбинах и т.п. Во всех этих случаях рассматривается поток воды или другой какой-либо жидкости.

Под потоком жидкости подразумевают движение её массы, огражденной поверхностью твердых или газообразных тел.

В гидродинамике рассматривается жидкость, сплошь заполняющая пространство, не имеющая пустот или разрывов. При движении жидкости действуют силы:

1. Поверхностные силы – силы давления и внутреннего трения.
2. Массовые (объемные) силы – силы тяжести, силы инерции.

Определение скорости, гидродинамического давления, их взаимосвязи и сопротивлений движению жидкости составляет основную задачу гидродинамики.

Всякое движение жидкости характеризуется скоростями движения в отдельных точках жидкости, давлениями, возникающими на различных глубинах, самими глубинами, а также общей формой потока. Указанные компоненты принято называть элементами движения. Очевидно, что элементы движения зависят от положения точек, которое определяется координатами x , y , z . Кроме того, указанные элементы движения могут изменяться и со временем, являясь также функцией времени t .

В связи с этим различают два вида движения: установившееся и неустановившееся.

Установившийся вид движения – это такой вид движения, когда в каждой точке потока местная скорость и давление не изменяются во времени. Установившееся движение разделяется на движение равномерное и неравномерное.

Неустановившийся вид движения – это такой вид движения, когда в точках области, где движется жидкость, местные скорости и давления изменяются во времени.

Равномерный вид движения – это такой вид движения потока жидкости, при котором его размеры и форма живых сечений не меняются по длине потока.

Неравномерный вид движения – это такой вид движения, при котором размеры и форма живых сечений потока жидкости изменяются по длине потока.

В зависимости от причин и общих условий, при которых происходит движение, различают напорный и безнапорный вид движения.

Напорный вид движения – это такой вид движения, при котором жидкость полностью заполняет поперечное сечение, образуемое ограничивающими поток твердыми стенками.

Безнапорный вид движения – это такой вид движения, при котором поток не со всех сторон ограничен твердыми стенками, а при своем движении имеет свободную поверхность.

При исследовании потока жидкости различают следующие его характеристики: площадь живого сечения, смоченный периметр и гидравлический радиус.

Живым сечением называется поперечное сечение потока, нормальное ко всем линиям тока, его пересекающим. Общепринятое обозначение площади живого сечения ω , единицы измерения – м².

Смоченный периметр – линия, по которой жидкость соприкасается с поверхностями русла в данном живом сечении. Обозначается через χ , единицы измерения – м.

Гидравлическим радиусом называется весьма важная характеристика, представляющая собой отношение площади живого сечения к смоченному периметру. Обозначается гидравлический радиус R , единица измерения – м, т.е.

$$R = \omega / \chi. \quad (4.1)$$

При решении гидравлических задач часто приходится использовать понятие расхода и средней скорости потока.

Расход жидкости – объем жидкости, протекающий в единицу времени через данное живое сечение потока. Расход жидкости измеряется в м³/с или л/с, обозначается Q или q. Математически расход жидкости выражается зависимостью

$$Q = \omega \cdot V. \quad (4.2)$$

Второй множитель V, входящий в формулу (4.2), выражает среднюю скорость потока.

Средняя скорость потока в данном сечении – это воображаемая, фиктивная скорость потока, одинаковая для всех точек данного живого сечения, при которой через живое сечение проходил бы расход, равный фактическому. Скорость потока имеет размерность м/с.

Одним из основных уравнений гидродинамики является уравнение неразрывности потока

$$V_1 \cdot \omega_1 = V_2 \cdot \omega_2 = Q = \text{const} \quad (4.3)$$

Оно показывает, что при установившемся движении произведение площади живого сечения на среднюю скорость в этом живом сечении, т.е. расход Q, есть величина постоянная по длине потока.

3 ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

Канал (лоток) прямоугольного сечения 1 установлен так, что питающий его резервуар 2 находится в начале лотка. В боковой стенке резервуара располагается треугольный водослив Томсона. Вода из питающего резервуара через водослив поступает в лоток, образуя в нем поток жидкости, и сбрасывается в приемный (мерный) резервуар 3, снабженный пьезометром 4. На лотке устанавливаются уровнемеры (шпиценмасштабы), с помощью которых определяется глубина воды в нем.

Определяется расход воды с помощью:

- треугольного водослива;
- объемным методом;
- поплавковым методом.

4 ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

Перед началом проведения опыта в конце лотка ставится перегородка, с помощью которой устанавливаются определенные характеристики потока жидкости.

Открывая задвижку на трубопроводе, подают некоторый расход в питающий резервуар, из которого через водослив вода поступает в лоток. С помощью пьезометра на питающем резервуаре определяют напор на гребне водослива $H_{тр}$. Определяется расход $Q_{тр}$. Закрыв задвижку на приемном резервуаре определяют объем воды, поступивший в него за определенный промежуток времени, отсчитанный по секундомеру. Определяется расход $Q_{об}$.

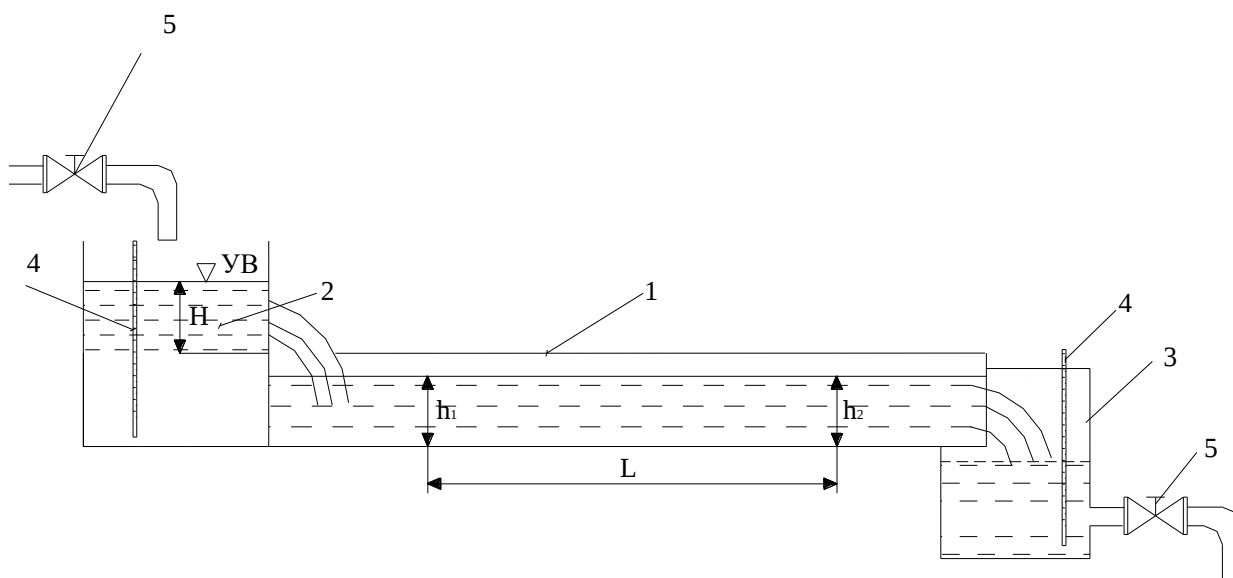
Для определения расхода поплавковым методом выбирают два створа по длине потока и замеряется расстояние между ними. С помощью шпигельмасштаба определяется глубина воды в этих створах. Для расчетов берется средняя глубина.

Затем выше первого створа пускается поплавок, в момент его прохождения через первый створ пускается секундомер, а при его прохождении поплавок через второй створ секундомер останавливается.

Получаем время t движения поплавка между створами. Зная расстояние и время можно определить скорость движения поплавка. Но полученная скорость является только поверхностной скоростью. Средняя скорость потока будет несколько меньше, что учитывается коэффициентом перехода поверхностной скорости к средней $K_{пер}$. Для потоков этот коэффициент можно принять равным 0,8.

Определяется расход $Q_{попл.}$.

Когда все измерения при первом варианте будут выполнены, не изменяя расхода воды, в конце лотка ставится перегородка другой высоты. В результате меняются скорости и живое сечение потока. Через некоторое время снова проводится весь комплекс наблюдений и измерений, как и в первом случае. Результаты всех измерений заносятся в таблицу 4.1.



1 -Канал прямоугольного сечения; 2 - Питающий резервуар;
3- Приемный резервуар; 4- Пьезометры; 5 - Задвижка.

Рисунок 4.1 – Схема лабораторной установки

5 ПОРЯДОК РАСЧЕТА

а) Метод треугольного водослива

Расход воды, проходящей через водослив, определяется по формуле

$$Q_{тр} = 1,4 H_{тр}^{5/2}, \quad (4.4)$$

где $Q_{тр}$ - расход воды через водослив, м³/с;

$H_{тр}$ – напор на гребне треугольного водослива, м.

Также расход можно определить по тарировочной кривой, полученной по вышеуказанной формуле и по таблицам.

б) Объемный метод.

Этот метод определения расхода является самым точным, его ещё называют истинный метод измерения расхода.

Определение расхода осуществляется по формуле

$$Q_{об} = \frac{W_{об}}{\tau_{об}}, \quad (4.5)$$

где $Q_{об}$ - расход воды, поступающий в приемный резервуар и естественно протекающий по лотку, м³/с;
 $W_{об}$ - объем воды, поступивший в приемный резервуар в м³ за промежуток времени $t_{об}$.

$$W_{об} = a_{об} \cdot b_{об} \cdot h_{об} , \quad (4.6)$$

где $a_{об}$ – длина приемного (мерного) резервуара, м;
 $b_{об}$ – ширина приемного (мерного) резервуара, м;
 $h_{об}$ - высота поднятия уровня воды в пьезометре между началом и концом отсчета времени, м.

$$h_{об} = h''_{об} - h'_{об} . \quad (4.7)$$

в) Поплавковый метод.

Основан на применении одной из основных формул гидродинамики – формулы расхода

$$Q_{пол} = V \cdot \omega , \quad (4.8)$$

где V – средняя скорость движения потока, м/с;
 ω – площадь живого сечения потока, м².

$$V = V_{пов} \cdot 0,8, \quad (4.9)$$

где $V_{пов}$ – поверхностная скорость потока, м/с;
0,8 – коэффициент перехода от поверхностной скорости к средней.

$$V_{пов} = I_{лот} / \tau_{лот}^{cp} , \quad (4.10)$$

где $I_{лот}$ - расстояние между створами, м;
 $\tau_{лот}^{cp}$ - среднее время движения поплавка между створами, с.

$$\tau = \frac{\tau_{лот}^I + \tau_{лот}^{II} + \tau_{лот}^{III}}{3}, \quad (4.11)$$

$$\omega = b_{лот} \cdot h_{лот}^{cp}, \quad (4.12)$$

где $b_{лот}$ - ширина лотка, м;

$h_{лот}^{cp}$ - средняя глубина потока, м.

$$h_{лот}^{cp} = \frac{h'_{лот} + h''_{лот}}{2}. \quad (4.13)$$

Сравнивая расходы, полученные поплавковым методом для двух вариантов опытов, можно сделать вывод, что если их величины примерно равны – уравнение неразрывности подтверждается: изменяя уклон лотка, можно наблюдать различные виды движения жидкости.

Таблица 4.1 - Данные для выполнения расчета

Показатели		Обозначение	Ед. измерения	1-й опыт	2-й опыт
метод водослива	Напор на гребне треугольного водослива	$H_{тр}$	м		
	Расход	$Q_{тр}$	м ³ /с		
Объемный метод	Длина приемного (мерного) резервуара	$a_{об}$	м		
	Ширина приемного (мерного) резервуара	$b_{об}$	м		
	Показание пьезометра приемного (мерного) резервуара в начале отсчета времени	$h'_{об}$	м		
	Показание пьезометра приемного (мерного) резервуара в конце отсчета времени	$h''_{об}$	м		
	Высота поднятия уровня воды в пьезометре между началом и концом отсчета времени	$h_{об}$	м		
	Время отсчета	$\tau_{об}$	с		
	Расход	$Q_{об}$	м ³ /с		
Поплавковый метод	Расстояние между створами	$l_{лот}$	м		
	Ширина лотка	$b_{лот}$	м		
	Глубина потока в первом створе	$h'_{лот}$	м		
	Глубина потока во втором створе	$h''_{лот}$	м		
	Средняя глубина потока	$h_{лот}^{cp}$	м		
	Время движения поплавка (1 раз)	$\tau^I_{лот}$	с		
	Время движения поплавка (2 раз)	$\tau^{II}_{лот}$	с		
	Время движения поплавка (3 раз)	$\tau^{III}_{лот}$	с		
	Среднее время движения поплавка	$\tau_{лот}^{cp}$	с		
	Расход	$Q_{попл}$	м ³ /с		

Контрольные вопросы:

1. Силы действующие на движущуюся жидкость.
2. Способы определения скорости жидкости.
3. Понятие жидкости.
4. Виды движения жидкости.
5. Определение установившегося вида движения.

6. Определение не установившегося вида движения.
7. Определение неравномерного вида движения.
8. Определение напорного вида движения.
9. Основные параметры потока жидкости.
10. Определение живого сечения.
11. Определение смоченного периметра.
12. Определение гидравлического радиуса.
13. Определение расхода жидкости.
14. Определения средней скорости в данном сечении.
15. Уравнение неразрывности потока.
16. Определение линии тока.
17. По каким формулам определяется расход и скорость жидкости.
18. Определение элементарной струйки.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 5
УРАВНЕНИЕ НЕРАЗРЫВНОСТИ.
ОПРЕДЕЛЕНИЕ СКОРОСТЕЙ В ПОТОКЕ ЖИДКОСТИ

1 ЦЕЛЬ РАБОТЫ

- Опытное определение гидравлических элементов потока.
- Определение скоростей потока.
- Экспериментальное подтверждение уравнения неразрывности.

2 ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

В гидравлике жидкость изучается не как материальное тело, состоящее из множества молекул, а как непрерывная среда, сплошь заполняющая пространство без образования пустот.

При изучении законов движения важно различать два понятия: точка пространства и частица жидкости. Точка пространства - это геометрический образ, не имеющий размеров, положение ее в пространстве определяется координатами x , y , z . Частица жидкости - это физический образ, который представляется как бесконечно малый объем. Следовательно, частица жидкости рассматривается как точка пространства, обладающая всеми физическими свойствами этой жидкости.

При движении жидкости давление, отнесенное к единице площади, рассматривается как напряжение гидродинамического давления. Вместо этого термина будем пользоваться термином гидродинамического давлений или просто давлением P .

Скорость движения частицы жидкости обозначают U . Так как величины U и P являются, в общем случае, функциями координат и времени, то решение гидродинамических задач сводится к отысканию непрерывных функций $U=f_1(x, y, z, t)$ и $P=f_2(x, y, z, t)$.

Движение бывает вихревым и безвихревым.

Вихревым движением называется такое, при котором вектор угловой скорости частиц жидкости не равен нулю ($\omega \neq 0$) т. е. частицы вращаются вокруг своих осей. Если этот вектор совпадает с вектором линейной скорости, то такой случай движения называется винтовым движением.

Безвихревое движение называется потенциальным в том случае, если отсутствует

вращение отдельных частиц жидкости.

Кинематические характеристики движения.

След движения отдельной частицы жидкости в пространстве называется **траекторией движения**. Линия тока, характеризующая направление движения ряда последовательно расположенных частиц жидкости в данный момент времени представляет собой, кривую, в каждой точке которой вектор скорости касателен к ней. При установившемся движении линии тока и траектории движения совпадают, а при неустановившемся - не совпадают. Если в движущейся жидкости выделить бесконечно малый замкнутый контур и через все его точки провести линии тока, соответствующие данному моменту времени, то получившаяся как бы непроницаемая трубчатая поверхность называется трубкой тока, а масса жидкости, находящаяся в ней - элементарной струйкой.

Совокупность элементарных струек жидкости, протекающих через достаточно большую площадку, называется **потокom жидкости**. Потоки могут быть: напорные, безнапорные и струи.

Средняя скорость в турбулентном потоке - это скорость, определяемая не из действительных скоростей, а из осредненных, которые являются фиктивными средними по времени скоростями в различных точках потока.

Скорости в различных точках потока рознятся между собой. Распределение осредненных скоростей по вертикали в открытых каналах, лотках описываются формулой

$$\frac{U}{U_n} = \left(\frac{y}{2h} \right)^n, \quad (5.3)$$

где U - осредненное значение скорости на расстоянии y от дна канала, м/с;

U_n - скорость на поверхности воды, м/с;

h - глубина воды в лотке, м;

n - показатель степени, в общем случае связанный с коэффициентом Шези;

C - коэффициент Шези, м^{0,5}/с.

Величину коэффициента Шези можно определить по формуле

$$C = \frac{V}{\sqrt{Ri}}, \quad (5.4)$$

где V - средняя скорость потока в данном сечении, м/с;
 R - гидравлический радиус, м;
 i - уклон дна лотка.

Графическое изображение величин скоростей в соответствующих точках живого сечения по вертикали называется **эпюрой скоростей**, которая характеризует изменение скоростей в данном сечении.

Степень неравномерности распределения скоростей по живому сечению потока характеризуется коэффициентом неравномерности или Кориолиса α . **Коэффициент Кориолиса** - это отношение действительного значения кинетической энергии потока к ее значению, вычисленного по средней скорости, т.е.

$$\alpha = \frac{\int \omega U^3 d\omega}{V^3 \omega}, \quad (5.5)$$

где U - скорость элементарной струйки;
 $d\omega$ - ее площадь;
 V, ω - соответственно средняя скорость и площадь живого сечения потока.

Если измерение скоростей производится в равновеликих по площади частях живого сечения потока, то α определяется по формуле

$$\alpha = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} U_i^3}{n V^3}, \quad (5.6)$$

где U_i - скорость в соответствующей части живого сечения потока, м/с;
 n - количество равновеликих по площади частей.

Согласно уравнению неразрывности, скорости в живых сечениях обратно пропорциональны их площадям, что представляет собой гидравлическое уравнение постоянства расхода

$$V_1 \omega_1 = V_2 \omega_2 = \text{const.} \quad (5.7)$$

3 ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

На рисунке 5.1 представлена схема опытной установки. Вода из трубопровода I

подается в приемную камеру 3, в которой поддерживается постоянный напор H , устанавливаемый с помощью регулирования задвижкой а и контролируемый пьезометром 4. Расход воды в лотке 6 определяется при помощи треугольного водослива 5. Для измерения глубины воды в сечении III-III используется шпигенмасштаб 8. Измерение скоростей в различных точках живого сечения потока III-III производится трубкой Пито или микровертушкой 9. Для изменения режима движения жидкости в лотке используются водосливы 1 различной высоты. Расход воды в лотке измеряется объемным способом при помощи мерной емкости 10, оборудованной пьезометром II и секундомером. На рисунке 5.2 представлена схема опытной напорной установки. Вода из бака I центробежным насосом 2 подается в стеклянный трубопровод 5 попеременного поперечного сечения.

Расход воды изменяется открытием или закрытием задвижек 3, 4, 6 и измеряется объемным методом с помощью мерной емкости 7, оборудованной пьезометром 8, и с помощью секундомера.

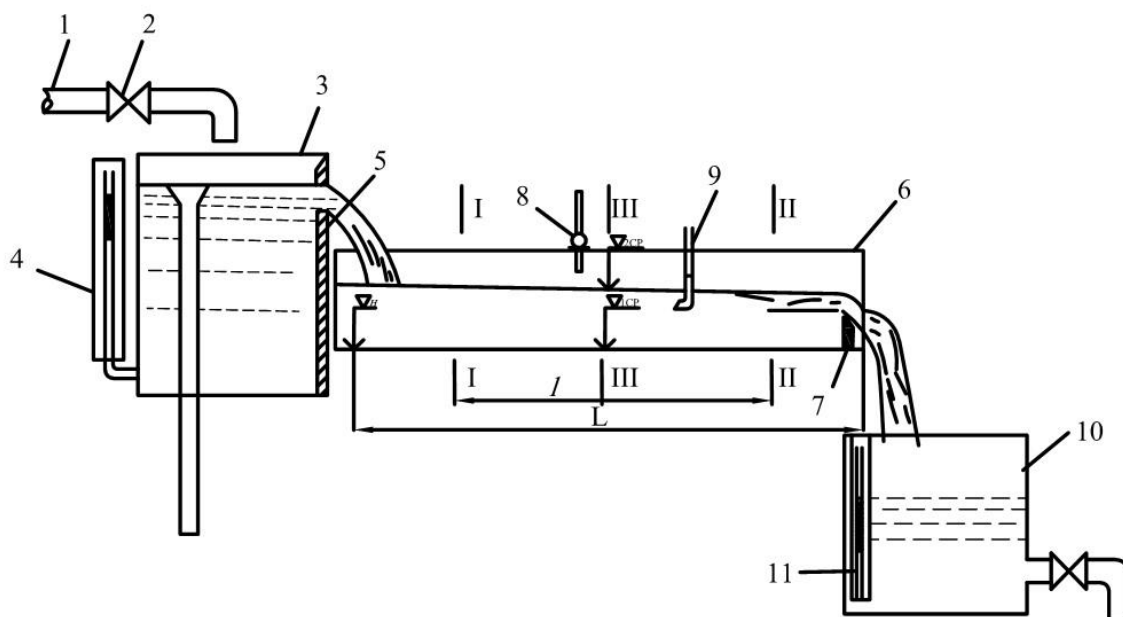
4 ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

Устанавливается режим движения жидкости в лотке 6 с помощью задвижки 2 и водослива 7 (рисунок 5.2). Измеряют расход воды с помощью: а) водослива 5 и пьезометра 4; б) мерной емкости 10 с пьезометром II и секундомера.

Выбираются два створа I-I и II-II, замеряется между ними расстояние L , и выше створа I-I пускается поплавков для замера поверхностной скорости. Измеряется время прохождения поплавком расстояния между сечениями I-I и II-II. Запускается не менее 3 поплавков. Между сечениями I-I и II-II выбирается сечение III-III, в котором замеряют глубины воды с помощью шпигенмасштаба 8 ∇_1 и ∇_2 (рисунок 5.3). Для определения величины α измеряются с помощью трубки Пито или микровертушки 9 скорости U_i в точках 1...9 живого сечения потока в сечении III-III. Затем измеряются скорости по вертикали, проходящей через центральную ось в точках, соответствующих глубинам 0,05h; 0,2h; 0,6h; 0,8h; 0,95h.

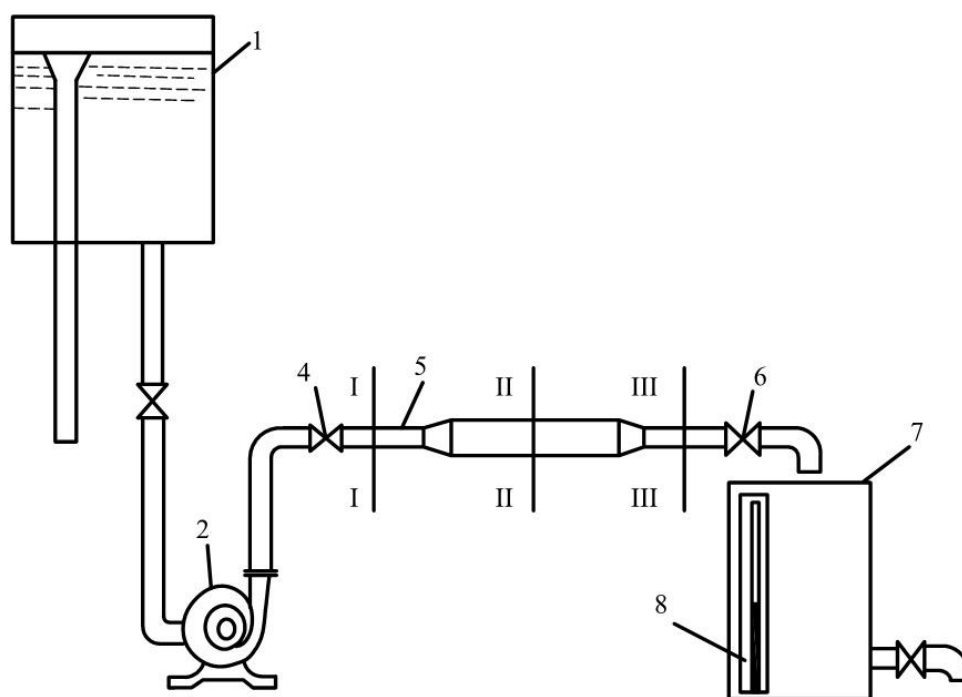
По уклономеру определяют уклон дна лотка i . Уклон лотка можно подсчитать, имея отметки ∇_1 и ∇_2 в начале и конце лотка (измеренные с помощью шпигенмасштаба), отстоящие друг от друга на расстоянии L .

Заменяв водослив 7, производят аналогичные замеры при том же расходе.



I - трубопровод; 2 - задвижка 3 – приемная камера; 4 - пьезометр;
 5 - треугольный водослив; 6 – лоток; 7 – подпорная стенка 8 - шпигунмасштаб;
 9 - микровертушка; 10 - мерная емкость 11 - пьезометр II

Рисунок 5.1 – Схема безнапорной опытной установки



1 - приемная камера; 2 - центробежным насосом; 4, 6 – задвижки;
 5 – трубопровод; 7 - мерная емкость; 8 - пьезометр;

Рисунок 5.2 – Схема опытной установки

Все полученные данные заносят в таблицы 5.2, 5.3. Открывают задвижку 3 на

всасывающей линии насоса 2, заполняют всасывающую линию и насос водой, затем включают двигатель и медленно открывают задвижку 4 нагнетательной линии насоса. Задвижкой регулируют расход воды в стеклянном трубопроводе 5. При установившемся режиме измеряют расход воды с помощью мерной емкости и пьезометра 8. Измеряют температуру воды термометром.

Данные замеров заносят в таблицу 5.1.

Таблица 5.1 – Замеры расходов потоков в стеклянной трубе

№ Опыта	W, м ³	τ, с

Ширина лотка $b = 0,16$ м, диаметр трубы: в первом сечении $d_1 = 0,05$ во втором сечении $d_2 = 0,1$ м и в третьем сечении $d_3 = 0,05$ м. Площади поперечных сечений: $\omega_1 = 1,96$ м², во втором сечении $\omega_2 = 0,00785$ м², в третьем сечении $\omega_3 = 1,96 \cdot 10^{-3}$ м².

5 ПОРЯДОК РАСЧЕТА

Определяют:

1. Расход воды в лотке:

а) по треугольному водосливу 5

$$Q_B = 1,4 \cdot H^{5/2}, \quad (5.8)$$

где Q_B – расход воды, м³/с;

H – Напор воды перед водосливом, м;

б) по мерной емкости 10

$$Q_E = \frac{W}{\tau}, \quad (5.9)$$

где Q_E – расход воды м³/с;

W – объем воды, м³;

τ – время опыта, с.

в) средний расход

$$Q_{cp} = \frac{Q_E + Q_B}{2}. \quad (5.10)$$

2. Глубину воды в сечении III-III:

$$h = \nabla_{2CP} - \nabla_{1CP}, \quad (5.11)$$

где $\nabla_{1CP}, \nabla_{2CP}$ – средние отметки в сечении III-III соответственно на поверхности потока и у дна, м.

3. Поверхностную скорость в сечении III-III

$$U_n = \frac{L}{\tau_1}, \quad (5.12)$$

где L – расстояние между сечениями I-I, II-II, м;
 τ_1 – время прохождения поплавка между сечениями III-III, с.

4. Гидравлические характеристики потока в сечении III-III:

а) живого сечения, м²:

$$\omega = bh, \quad (5.13)$$

где b – ширина потока, м;
 h – глубина потока, м.

б) смоченного периметра, м:

$$\chi = 2h + b. \quad (5.14)$$

в) гидравлического радиуса, м:

$$R = \frac{\omega}{\chi}, \quad (5.15)$$

5. Среднюю скорость в сечении III-III

$$V_{cp} = \frac{Q_{cp}}{\omega}. \quad (5.16)$$

6. Гидравлический уклон.

$$i = \frac{\nabla_H - \nabla_K}{L}. \quad (5.17)$$

7. Коэффициент Шези по формуле 5.4.

8. Теоретические скорости по вертикали AA в точках, стоящих от дна лотка на расстоянии 0,05h; 0,2h; 0,6h; 0,8h; 0,95h; по формуле 5.3.

9. Коэффициент Кориолиса α по формуле 5.6.

10. Расход для сечения III-III

$$Q_{III-III} = V_{cp} \cdot \omega. \quad (5.18)$$

Данные расчета заносят в таблицу 5.4 и 5.5.

Таблица 5.2 - Данные замеров характеристик потока в лотке

№ опытов	Замеры	H, м	W, м ³	τ , с	L, м	τ_1 , с	∇_1 , м	∇_2 , м	∇_H , м	∇_K , м
	1									
	2									
	3									
	Средние значения									

Таблица 5.3- Замеры скоростей потока в лотке

№	Скорости по сечению III-III, м/с									Скорости по вертикали AA, м/с				
	U _I	U ₂	U ₃	U ₄	U ₅	U ₆	U ₇	U ₈	U ₉	U _I	U _{II}	U _{III}	U _{IV}	U _V
I														
II														

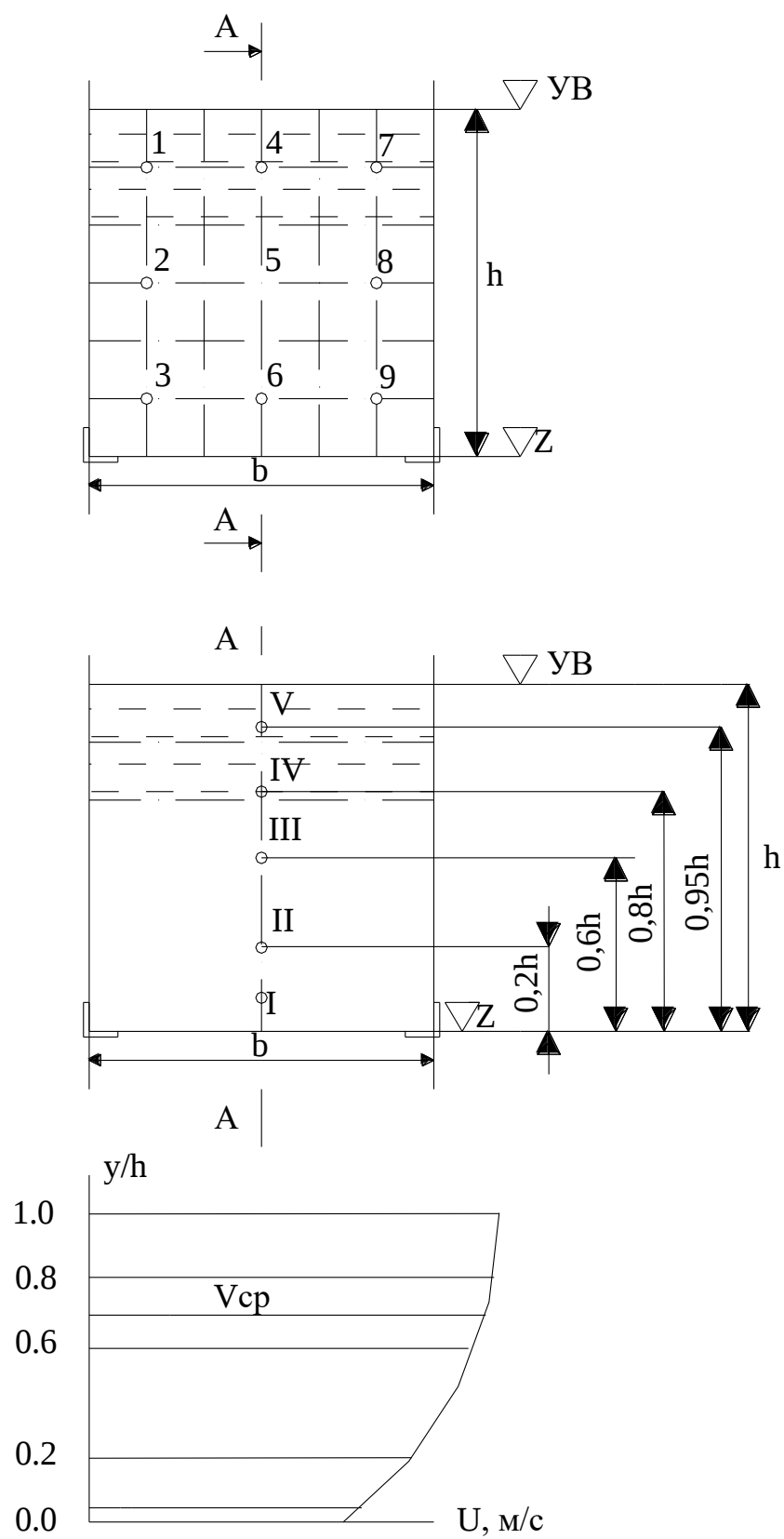


Рисунок 5.3 - Схема расчетов и эпюра скоростей

Расчеты по напорным потокам

Определяют:

11. Гидравлические характеристики потока в сечении II-II

а) смоченный периметр, м

$$\chi = \pi \cdot d_2. \quad (5.19)$$

б) гидравлический радиус, м

$$R = \frac{\omega_2}{\chi} = \frac{d_2}{4}. \quad (5.20)$$

12. Расходы воды в трубопроводе, м³/с

$$Q = \frac{W}{\tau}. \quad (5.21)$$

$$V_i = \frac{Q}{\omega_i}. \quad (5.22)$$

13. Расходы воды по средним скоростям, м³/с

$$Q_i = V_i \cdot \omega_i. \quad (5.23)$$

Расчетные данные заносят в таблицу 5.6. По данным таблицам 5.3, 5.4 и 5.5, строят эпюру скоростей по одному из опытов (рисунок 5.3).

Таблица 5.4 – Расчетные значения характеристик потока

№	$Q_B, \text{м}^3/\text{с}$	$Q_E, \text{м}^3/\text{с}$	$Q_{\text{ср}}, \text{м}^3/\text{с}$	$h, \text{м}$	$\omega, \text{м}^2$	$\chi, \text{м}$	$R, \text{м}$	i	$C, \text{м}^{0,5}/\text{с}$	$V_{\text{ср}}, \text{м}/\text{с}$	$Q_{\text{III-III}}, \text{м}^3/\text{с}$
1											
2											

Таблица 5.5 – Расчеты скоростей потока в лотке

№	$U_n, \text{м}/\text{с}$	$U_{\text{IP}}, \text{м}/\text{с}$	$U_{\text{IIР}}, \text{м}/\text{с}$	$U_{\text{IIIР}}, \text{м}/\text{с}$	$U_{\text{IV}}, \text{м}/\text{с}$	$U_V, \text{м}/\text{с}$	$U_{VP}, \text{м}/\text{с}$
1							
2							

Таблица 5.6 - Расчетные данные напорного потока

№ Опыта	Гидравлические характеристики потока в сечении II-II		Расход воды, $\text{м}^3/\text{с}$	Средние скорости, $\text{м}/\text{с}$			Расходы, $\text{м}^3/\text{с}$		
	$\chi, \text{м}$	$R, \text{м}$		V_I	V_{II}	V_{III}	Q_I	Q_{II}	Q_{III}

Контрольные вопросы:

1. Кинематические характеристики движения.
2. Вихревое и безвихревое движение жидкости.
3. Что называют элементами движения жидкости и чем они определяются.
4. Что такое установившееся и неуставившееся движение.
5. Что такое линия тока и чем она отличается от траектории.
6. Что называют потоком жидкости.
7. Какое движение называется резко изменяющимся. Плавно изменяющимся.
8. Каковы свойства плавно изменяющегося движения.
9. Что такое живое сечение, смоченный периметр и гидравлический радиус.
10. Что называют расходом и средней скоростью потока.
11. Как записывается и формулируется уравнение неразрывности для потока жидкости.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 6
ИЗМЕРЕНИЕ РАСХОДА ВОДЫ ПРИ ПОМОЩИ
ТРЕУГОЛЬНОГО ВОДОСЛИВА С ТОНКОЙ СТЕНКОЙ

1 ЦЕЛЬ РАБОТЫ

- Построить тарировочную кривую $Q = f(H)$ треугольного водослива с тонкой стенкой.
- Научиться измерять расход жидкости объемным способом.

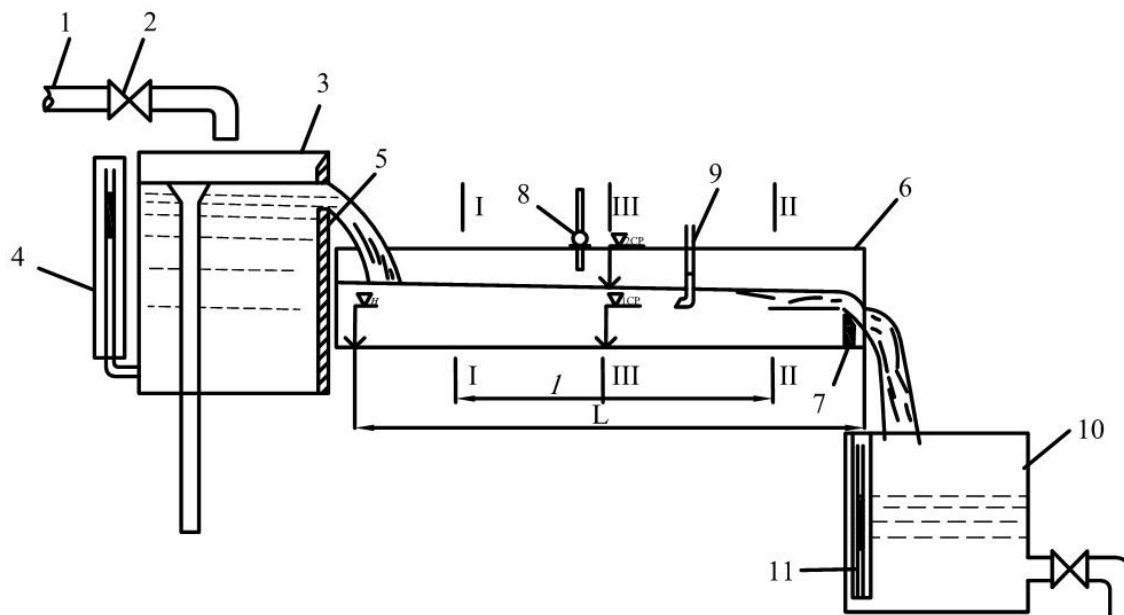
2 ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

В инженерной практике приходится встречаться с учетом объема стока жидкости безнапорных потоков в лотках, оросительных и дренажных каналах и др. гидротехнических сооружениях, где расходы колеблются от 2 до 200 л/с. Как правило, в таких случаях применяются водосливы – водомеры. К ним относятся треугольные, прямоугольные, трапецеидальные, параболические водосливы. Гребень или порог таких водосливов представляет собой острую кромку, которая практически не оказывает сопротивления движению потока на гребне водослива. Наиболее часто для измерения расхода используется треугольный водослив с центральным углом 90° . Опытами ученых установлено, что колебание уровня жидкости перед такими треугольными водосливами не оказывает значительного влияния на гидравлические их характеристики (коэффициенты расхода, скорости). Поэтому эти водосливы рекомендуется использовать в качестве водомерных устройств на гидротехнических сооружениях для учета объема стока.

3 ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

Треугольный водослив – водомер 1 установлен в гидравлическом лотке 2 прямоугольного сечения в его головной части (рисунок 6.1) и служит для измерения расхода воды в лотке 2, а также может использоваться для определения объема стока воды. Вода в головную часть лотка подается по трубопроводу 3. Регулировка подачи воды в лоток производится задвижкой 4. В головной части лотка перед водосливом имеется успокоительная сетка 5, служащая для гашения пульсации потока. Уровень перед водосливом и отметка гребня измеряются при помощи пьезометра 6. Объем воды, прошедший через лоток, фиксируется мерной емкостью 7, на которой имеется стеклянная

трубка 8 со шкалой. При помощи задвижки 9 и трубы 10 производится сброс воды в канализацию.



1 - трубопровод; 2 - задвижка 3 – приемная камера; 4 - пьезометр;
5 - треугольный водослив; 6 – лоток; 7 – подпорная стенка 8 - шпигонмасштаб; 9 - микровертушка; 10 - мерная емкость 11 - пьезометр

Рисунок 6.1 – Схема опытной установки

4 ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

Для построения тарировочной кривой $Q = f(H)$ треугольного водослива - водомера необходимо выполнить серию опытов, дискретно увеличивая расход воды в лотке от 0 до максимальной величины при помощи задвижки 5 на подающем трубопроводе 4. При каждом открытии задвижки 5 и закрытой задвижке 10 на сбросном трубопроводе 11 производятся следующие измерения:

1. Определяется отметка гребня (порога) треугольного водослива-водомера в головной части лотка по пьезометру 7 при закрытой задвижке 5;
2. Открывается задвижка 5, начинаются дискретные измерения уровня воды в головной части лотка при помощи пьезометра 7;
3. Определяется объем воды в мерной емкости 8 за определенный промежуток времени, который должен составлять около 20 с. Объем воды, прошедший через водослив и лоток, устанавливается по известным поперечным размерам емкости 8 и показанию пьезометра 9;

4. Место определения уровня воды на водосливе, а, следовательно, и место установки пьезометра 7 должно находиться на расстоянии $(3 \div 5) H$ от гребня водослива – водомера;

5. Для построения графика $Q = f(H)$ для треугольного водослива необходимо выполнить не менее 10 опытов, дискретно увеличивая расходы от 0 до максимальной величины.

6. Опытные данные и все расчеты сводятся в таблицу 6.1

Таблица 6.1 - Исходные данные для построения графика $Q = f(H)$ для треугольного водослива – водомера

Параметры	Номера опытов								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1. Отметка гребня водослива, м									
2. Поперечный размер мерной емкости, м x м	0,5 x 1,0								
3. Уровень воды перед водосливом, м									
4. Показания пьезометра мерной емкости, м									
5. Время опыта, с									
6. Объем воды в мерной емкости, м ³									
7. Расход воды в лотке, м ³ /с									
8. Напор воды на водосливе, м									

5 ПОРЯДОК РАСЧЕТА

1. Расход воды в лотке определяется объемным способом. Объем воды W в мерной емкости, прошедший через треугольный водослив и лоток за время τ

$$Q = W/\tau. \quad (6.1)$$

2. Напор на гребне треугольного водослива – водомера находится как разность отметок уровня воды перед гребнем водослива и его порога.

3. По данным таблицы строится график $Q=f(H)$. Этот график показывает изменение расхода в зависимости от колебания уровня воды в верхнем бьефе сооружения. Используя данный график, можно в любой момент времени, зная напор H , определять расход жидкости, который поступает потребителю или им расходуется.

4. Построенный график рекомендуется использовать при дальнейшем выполнении лабораторных работ.

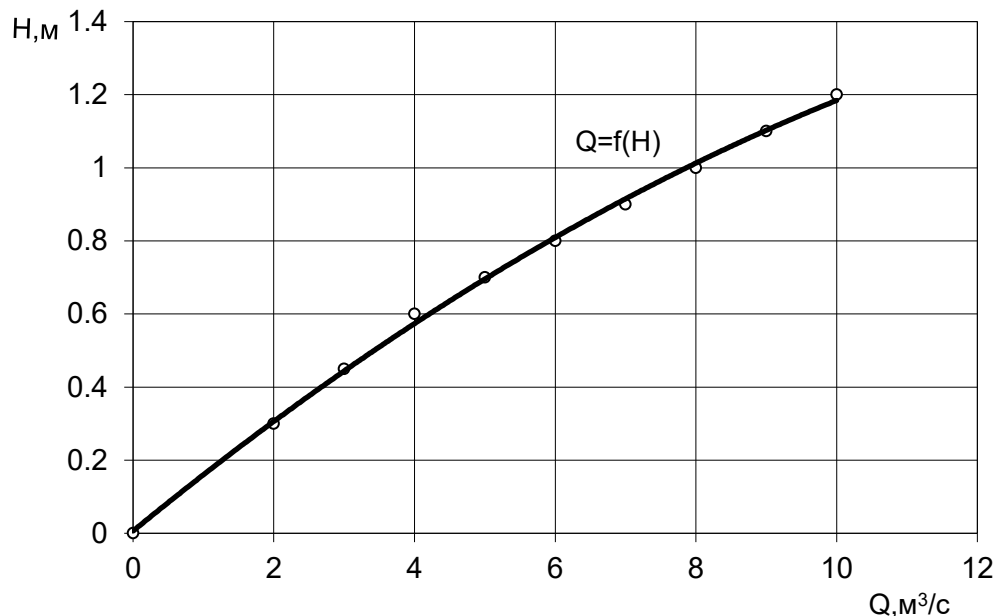


Рисунок 6.2 - Тарировочный график треугольного водослива – водомера.

Контрольные вопросы:

1. Как Вы представляете себе водослив?
2. Понятие жидкости?
3. Способы определения скорости жидкости?
4. Виды движения жидкости?
5. Определения напора?
6. Название приборов для измерения избыточного давления?
7. По какой формуле определяется расход жидкости?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 7

ИЗМЕРЕНИЕ РАСХОДА ЖИДКОСТИ ТРУБКОЙ ВЕНТУРИ

1 ЦЕЛЬ РАБОТЫ

- Изучить принцип работы расходомера Вентури.
- Построить тарировочную кривую расходомера.
- Определить постоянную расходомера.

2 ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Трубка, имеющая искусственное сужение диаметра, называется *расходомером Вентури*. Принцип работы расходомера Вентури основан на перепаде давления, возникающем в суженном и расширенном его сечениях. Регистрация перепада давления в расходомере выполняется при помощи манометров или пьезометров на участке трубопровода.

При измерении расхода в трубопроводе трубкой Вентури потерями удельной энергии потока (потерями напора) пренебрегают. Такое допущение не оказывает значительное влияние на точность инженерных расчетов.

Расход воды в трубопроводе при помощи расходомера Вентури определяется по формуле

$$Q = \mu A_T \cdot \sqrt{h}, \quad (7.1)$$

где μA_T – постоянная величина для данного расходомера (или ее называют *постоянной расходомера*)

μ - коэффициент расхода расходомера;

A_T - параметр, зависящий от размера расходомера;

h – разность показаний пьезометров или манометров.

Расчетный параметр расходомера A_T находится из уравнения баланса энергии (уравнения Д. Бернулли)

$$A_T = \frac{\pi D_2^2}{4} \sqrt{2g \left[1 - \left(\frac{D_2}{D_1} \right)^4 \right]}, \quad (7.2)$$

где D_1 ; D_2 - диаметры вставок расходомера ($D_1 > D_2$), м.

Коэффициент расхода расходомера определяется опытным путем, как средняя величина

$$\mu = (\mu_1 + \mu_2 + \dots + \mu_n) / n, \quad (7.3)$$

где n - число опытов (наблюдений)

Коэффициент расхода в каждом опыте определяется

$$\mu_i = \frac{Q_i}{Q_T}, \quad (7.4)$$

где Q_i ; Q_T - действительный и теоретический расходы жидкости расходомера, м³/с.

Теоретический расход - это максимально возможный расход жидкости, который мог бы пропустить через себя расходомер Вентури. Теоретический расход жидкости определяется по формуле

$$Q_T = A_T \cdot \sqrt{h}. \quad (7.5)$$

3 СХЕМА ОПЫТНОЙ УСТАНОВКИ

Исследование работы расходомера проводится на опытной установке (рис. 7.1). Расходомер Вентури представляет собой гидравлическое сопротивление, обусловленное сужением и расширением трубопровода (рис. 7.2). В расходомере имеется две цилиндрические вставки диаметрами D_1 и D_2 , соединенных между собой конфузоров. За цилиндрической вставкой меньшего диаметра имеется диффузор, обеспечивающий плавный выход потока из расходомера. В сечениях 1-1 и 2-2 расходомера подключены образцовые манометры.

4 ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

Для построения тарировочной кривой $Q = f(h)$ расходомера Вентури и определения постоянного параметра A_T выполняется 5 опытов. Для этого в трубопроводе фиксируется поочередно задвижкой пять различных расходов воды. Расход воды изменяют от минимального до максимального значения. При этом производят

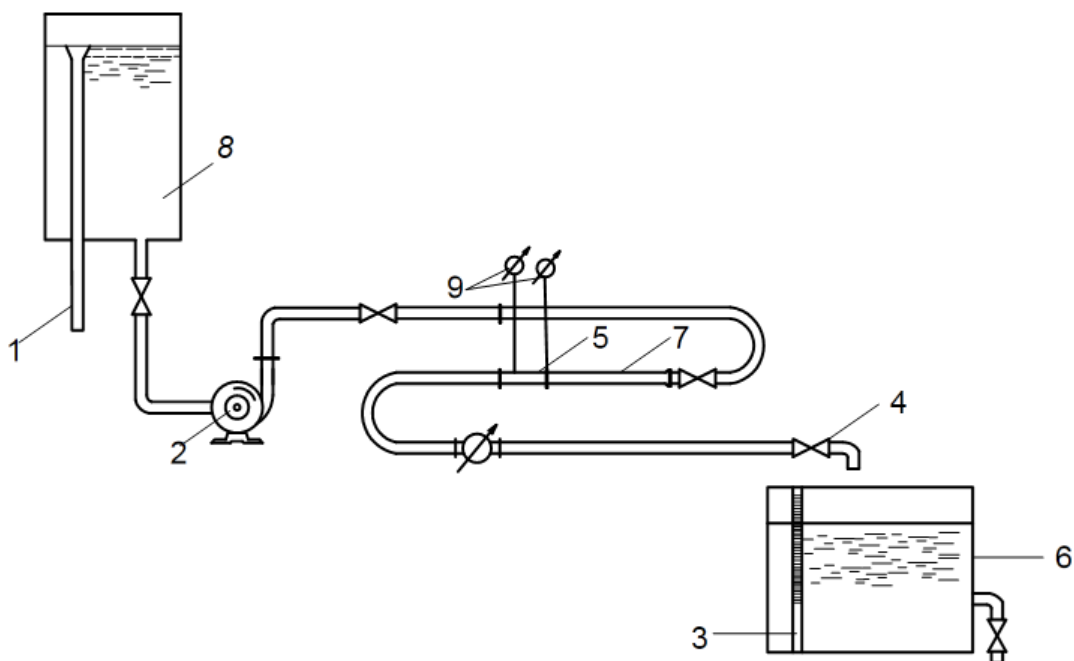
соответствующие замеры. Записывают в таблицу 7.1 показания манометров, объем воды за определенные промежутки времени. По данным таблицы 7.1 получают тарировочную кривую расходомера. Расчетом получают постоянную расходомера и расход воды по расходомеру Вентури (таблица 7.2).

Таблица 7.1 - Построение тарировочной кривой расходомера Вентури

Измеряемые величины	1	2	3	4	5
1. Объем воды в мерной емкости, м ³					
2. Время опыта, с					
3. Опытный расход воды, м ³ /с					
4. Показание манометра М ₁ , дел.					
5. Показание манометра М ₂ , дел.					
6. Разность показаний М ₁ – М ₂ , дел.					
7. Разность показаний М ₁ - М ₂ , м					

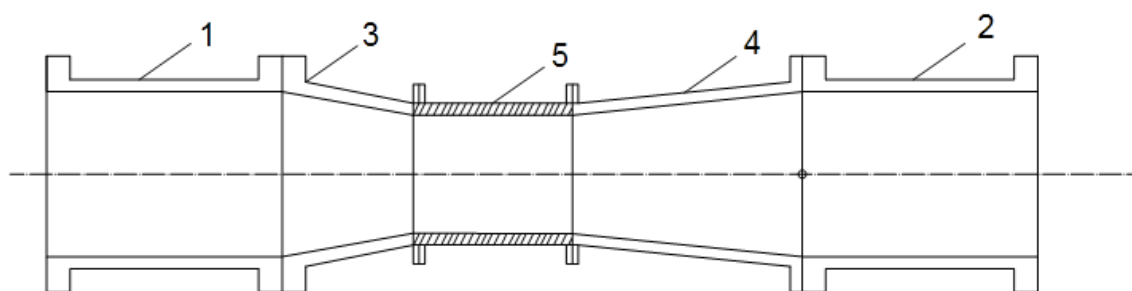
Таблица 7.2 - Определение постоянной расходомера Вентури и расхода

Расчетные величины	1	2	3	4	5
1. Расчетный параметр расходомера А _т					
2. Теоретический расход по формуле (7.5)					
3. Коэффициент расхода в каждом опыте по формуле (7.4)					
4. Средний коэффициент расхода расходомера по формуле (7.3)					
5. Постоянная расходомера μ А _т					
6. Расход по водомеру (формула 7.1)					



1 – переливная труба; 2 – центробежный насос; 3 – пьезометрическая трубка; 4 – кран; 5 – расходомер Вентури; 6 – мерный бак; 7 – трубопровод; 8 – мерный бак; 9 – пьезометры (манометры)

Рисунок 7.1 – Схема опытной установки



1, 2 – цилиндрические участки; 3 – конфузор;
4 – диффузор; 5 – цилиндрическая поверхность

Рисунок 7.2 – Схема расходомера Вентури

Контрольные вопросы:

1. Принципы работы расходомера Вентури.
2. Определение теоретического расхода.

3. Названия приборов для измерения избыточного давления.
4. Определение скорости движения жидкости.
5. Какие единицы измерения давления Вы знаете.
6. Что называется избыточным или манометрическим давлением.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 8

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМОВ ДВИЖЕНИЯ ЖИДКОСТИ

1 ЦЕЛЬ РАБОТЫ

- Опытным путем пронаблюдать границу между ламинарным и турбулентным режимами движения жидкости.
- Определить число Рейнольдса

2 ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Немецким инженером – гидротехником Г. Хагеном в 1839 г. было открыто два принципиально разных режима движения жидкости. Первый получил название – ламинарный (параллельно-струйное) – строго упорядоченное слоистое движение без перемешивания жидкости. Второй – турбулентный (беспорядочный) режим – характеризуется интенсивным перемешиванием частиц жидкости и пульсациями скоростей и давлений. При турбулентном режиме движения вдоль трубы наряду с продольным перемешиванием жидкости имеются поперечные перемещения и вращательное движение отдельных объемов жидкости, т.е. наблюдается хаотическое перемешивание жидкости. Экспериментальное подтверждение о существовании двух режимов было дано физиком и инженером О. Рейнольдсом.

Опыты проводились на стеклянной трубе, которая отходила от сосуда наполненного водой (рисунок 8.1). На конце трубы имеется вентиль, который позволяет изменять расход воды. Над сосудом располагается бачок с краской. Краска при помощи тонкой трубки подводится к входному сечению стеклянной трубы. Открывая или закрывая вентиль, изменяем расход жидкости в трубе, а, следовательно, и среднюю скорость.

В результате опытов было установлено следующее: при средних скоростях V потока в трубе, меньших некоторой скорости $V_{кр}$ ($V < V_{кр}$) краска, попавшая в стеклянную трубу, окрашивает только одну струйку потока. Если ввести дополнительно вторую трубку, подводящую краску, то в стеклянной трубе появится вторая окрашенная струйка потока, не перемешиваясь с первой струйкой.

При средней скорости в трубе V больше $V_{кр}$ ($V > V_{кр}$) вся жидкость, находящаяся в трубе, окрашивается по всему объему.

Рейнольдс для круглых труб получил эмпирическую формулу для критической скорости $V_{кр}$

$$V_{кр} = \frac{\nu Re_{кр}}{D}, \quad (8.1)$$

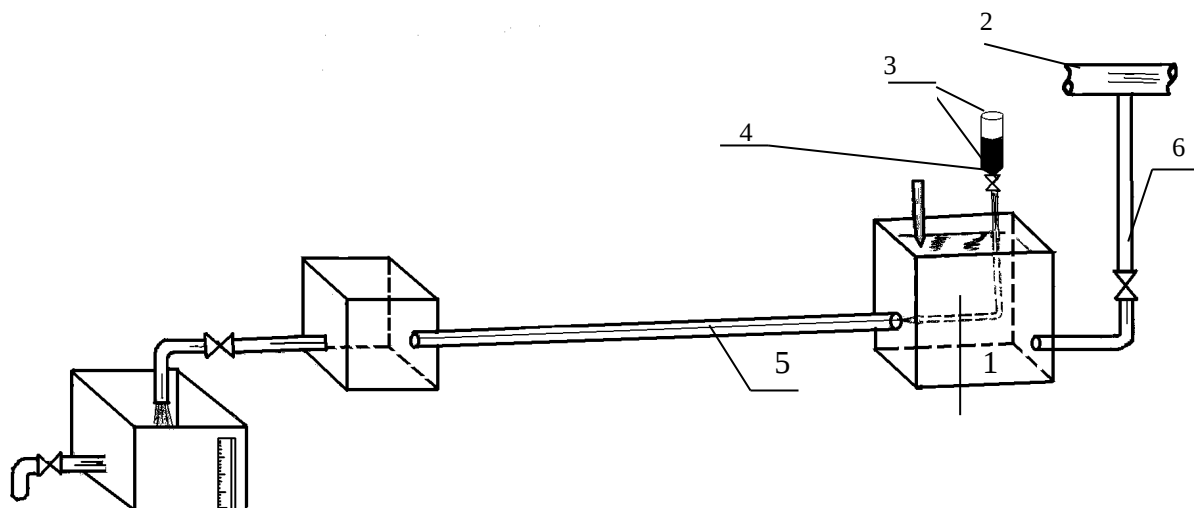
где ν – кинематическая вязкость жидкости, зависящая от её температуры, $\text{м}^2/\text{с}$;

$Re_{кр}$ – критическое число Рейнольдса;

D – диаметр трубы, м.

О состоянии потока в русле (трубе, канале и др.) в инженерной практике судят по числу Рейнольдса относительно его критического значения. Считается, что смена режимов движения жидкости в круглых трубах приблизительно происходит при $Re_{кр} = 2300$.

3 ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ



1 - сосуд с водой; 2 – трубопровод; 3 – бачок с краской;

4 – тонкая трубка; 5 – стеклянный трубопровод; 6 - вентиль

Рисунок 8.1 – Схема опытной установки

При помощи вентилей устанавливается минимальный расход воды. Затем подаем краску из бачка 3 по трубке 4 в стеклянную трубу 5. При этом должны наблюдать ламинарный режим движения жидкости (опыт № 1). Увеличиваем расход до момента, когда подкрашенная струйка жидкости начнет изменять свою форму (опыт № 2). Продолжаем увеличивать расход до момента, когда произойдет перемешивание жидкости (опыт № 3). Опыт № 3 демонстрирует турбулентный режим движения жидкости. В каждом опыте определяются числа Рейнольдса и делается соответствующий вывод.

4 ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

Числа Рейнольдса определяются по формуле

$$Re = \frac{Vd}{\nu}, \quad (8.2)$$

где V - средняя скорость потока в каждом опыте, м/с.

Все расчеты и измерения ведутся в таблице 8.1.

5 ПОРЯДОК РАСЧЕТА

Определяют:

1. Расход воды для каждого из опытов, м³/с

$$Q = \frac{W}{\tau}. \quad (8.3)$$

2. Среднюю скорость движения, м/с

$$V_{cp} = \frac{Q}{\omega}. \quad (8.4)$$

3. По таблицам или графикам определяют вязкость воды ν при данной температуре.

4. Число Рейнольдса находят по формуле

$$Re = \frac{Vd}{\nu}. \quad (8.5)$$

5. Режим движения воды в стеклянной трубе определяют по числу Рейнольдса и сопоставляют его с наблюдаемым. Делают выводы о полученных результатах.

Таблица 8.1 Исследование режимов жидкости в стеклянной трубе $D=0,025$ м.

Результаты опыта и расчетов	Опыт 1	Опыт 2	Опыт 3
1. Объем в мерном баке, м ³			
2. Время опыта, с			
3. Температура воды, °С			
4. Расход воды в трубе, м ³ /с			
5. Диаметр трубы, м			
6. Площадь живого сечения, м ²			
7. Средняя скорость, м/с			
8. Кинематическая вязкость воды, м ² /с			
9. Опытное число Рейнольдса Re			
10. Наблюдаемые режимы			

Контрольные вопросы:

1. Какие существуют режимы движения жидкости.
2. Кто открыл принципиально разные режимы движения жидкости, как было сделано открытие.
3. Дать определение режимам движения жидкости.
4. Описать работу опытной установки.
5. Методика выполнения работы.
6. Что происходит в потоке при средних скоростях V потока в трубе, меньших некоторой скорости $V_{кр}$, ($V < V_{кр}$).
7. Что происходит в потоке при средних скоростях V потока в трубе, больших некоторой скорости $V_{кр}$, ($V > V_{кр}$).
8. Дать определение критической скорости $V_{кр}$.
9. Как определяется критическая скорость $V_{кр}$.
10. Как определяется число Рейнольдса Re .
11. Дать определение критическому числу Рейнольдса $Re_{кр}$.
12. Чему равно численное значение критерия Рейнольдса.
13. Что наблюдается при критическом числе Рейнольдса $Re_{кр}$.
14. Как определяется кинематическая вязкость воды.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 9

ИССЛЕДОВАНИЕ УРАВНЕНИЯ БЕРНУЛЛИ

1 ЦЕЛЬ РАБОТЫ

- Опытным путем установить изменение удельной энергии в потоке при помощи уравнения Бернулли на трубопроводе переменного сечения при установившемся плавно изменяющемся движении.
- Определить средние скорости потока в исследуемых сечениях, потери напора, найти пьезометрический и гидравлический уклоны.
- Графически изобразить и проанализировать изменение удельной энергии потока при помощи пьезометрической и напорной линии.

2 ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

При движении потока в русле (трубопроводе, канале), в струе благодаря работе сил трения полная удельная энергия жидкости по направлению течения должна уменьшаться. Значит для реальной жидкости

$$H_1 > H_2, \quad (9.1)$$

где H_1, H_2 - полные напоры (полные удельные энергии) в живых сечениях: 1-1, взятом выше по течению, и 2-2, взятом ниже по течению.

Имея в виду, что полная удельная энергия потока определяется зависимостью

$$H = z + \frac{p}{\rho g} + \frac{\alpha V^2}{2g}, \text{ и между первым и вторым сечением потока имеются потери удельной}$$

энергии (потери напора), уравнение баланса удельной энергии потока можно представить в виде

$$z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{\alpha V_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{\alpha V_2^2}{2g} + h_f, \quad (9.2)$$

где z_1, z_2 - геометрические напоры или удельная потенциальная энергия положения в соответствующих сечениях, м;

$\frac{p_1}{\rho g}, \frac{p_2}{\rho g}$ - пьезометрические напоры или удельная потенциальная энергия давления

в рассматриваемых сечениях, м;

$\frac{\alpha V_1^2}{2g}, \frac{\alpha V_2^2}{2g}$ - скоростные напоры или удельная кинетическая энергия,

определенная по местной (точечной) скорости, м;

h_f - потеря напора между сечениями 1-1 и 2-2, м.

Уравнение (9.2) называется уравнением Бернулли. Оно выражает закон сохранения энергии в поле сил земного притяжения для установившегося плавно изменяющегося движения жидкости. Все члены уравнения Бернулли имеют линейную размерность, в международной системе единиц измерения - [М].

Потеря напора из уравнения Бернулли находится по формуле

$$h_f = H_1 - H_2. \quad (9.3)$$

Отношение потерь напора на рассматриваемом участке русла к длине этого участка определяет величину гидравлического уклона i_f

$$i_f = \frac{h_f}{L}. \quad (9.4)$$

Гидравлический уклон выражает собой понижение напорной линии по течению потока (от первого сечения ко второму). Величина гидравлического уклона всегда положительна ($i_f > 0$).

Положение пьезометрической линии определяется координатами удельной потенциальной энергией потока относительно рассматриваемой плоскости. Удельная потенциальная энергия из уравнения Бернулли определяется

$$H_p = z + \frac{p}{\rho g}. \quad (9.5)$$

Отношение элементарного изменения H_p на рассматриваемом участке потока к длине участка называется пьезометрическим уклоном. Пьезометрический уклон находится из выражения

$$I = \frac{dH_p}{dL} \text{ или}$$

$$I = \left[\left(z_1 + \frac{p_1}{\rho g} \right) - \left(z_2 + \frac{p_2}{\rho g} \right) \right] / L. \quad (9.6)$$

Пьезометрический уклон может быть как положительным, так и отрицательным.

Линии полного напора для струйки и потока по длине потока снижаются, т.к. всегда имеет место возрастание потерь напора от сечения к сечению.

На участках трубопровода одинакового диаметра гидравлический и пьезометрический уклоны равны между собой и линии полного и пьезометрического напоров параллельны.

3 ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

На рисунке 9.1 представлена опытная часть установки с шестью расчетными сечениями, расположенными на разных расстояниях друг от друга. К каждому сечению подключен пьезометр при помощи гибкого шланга. С помощью пьезометров измеряется удельная потенциальная энергия потока в трубопроводе 6. Трубопровод расположен горизонтально, поэтому в уравнении Бернулли геометрический напор равен нулю, т. е. $z = 0$. Диаметры трубопровода даны в таблице 9.1, а расстояния между сечениями приведены на рисунок 9.2.

4 ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

Работа выполняется при установившемся движении, которое обеспечивается поддержанием постоянного уровня воды в напорной емкости 1 (рисунок 9.1). При данном расходе в трубопроводе в таблицу 9.1 заносятся опытные данные шести пьезометров 5. Все расчеты по балансу энергии жидкости в трубопроводе ведутся в таблице 9.1. По полученным данным на график (рисунок 9.2) наносятся напорная и пьезометрическая линия и соответствующие им уклоны.

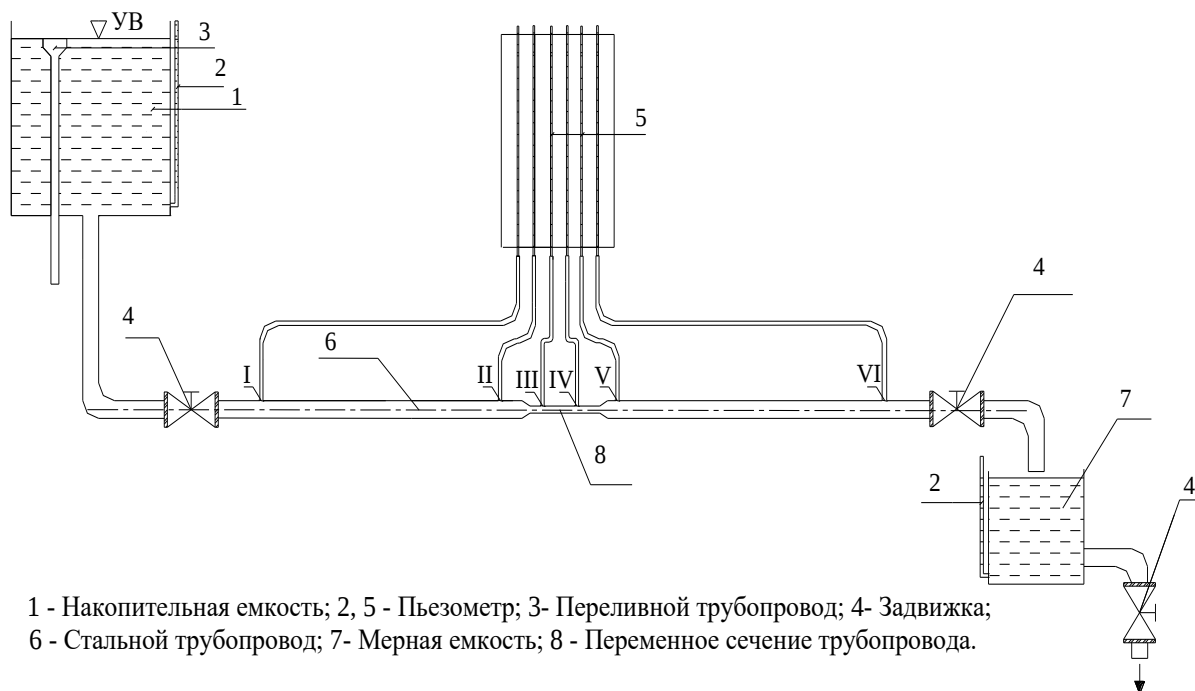


Рисунок 9.1 – Опытная установка для исследования уравнения Бернулли

5 ПОРЯДОК РАСЧЕТА

Определяют:

1. Расход жидкости, $\text{м}^3/\text{с}$

$$Q = \frac{w}{\tau}. \quad (9.7)$$

2. Средние скорости в соответствующих сечениях, $\text{м}/\text{с}$

$$V_i = \frac{Q}{\omega_i}. \quad (9.8)$$

3. Скоростные напоры $\frac{V_i^2}{2g}$, м .

4. Полные напоры для соответствующих сечений

$$H_i = \frac{P_i}{\rho g} + \frac{aV_i^2}{2g}. \quad (9.9)$$

5. Потери напора

$$h_{1-2} = H_1 - H_2, \quad (9.10)$$

6 Гидравлические и пьезометрические уклоны определяют по формулам 9.4 и 9.6.

Таблица 9.1 - Данные для построения напорной и пьезометрической линии

Опытные и рассчитанные величины	1-1	2-2	3-3	4-4	5-5	6-6
1. Уровень воды в мерном баке, м						
2. Объем в мерном баке, м ³						
3. Время опыта, с						
4. Расход в трубопроводе, м ³ /с						
5. Диаметр в расчетном сечении, м	0,05	0,05	0,025	0,025	0,05	0,05
6. Длина участка между сечениями, м	1,96	0,14	0,15	0,31	1,79	
7. Средняя скорость, м/с						
8. Потенциальная энергия $\frac{p}{\rho g}$, м						
9. Кинетическая энергия $\frac{\alpha V_i^2}{2g}$, м						
10. Полная удельная энергия Н, м						
11. Пьезометрический уклон I						
12. Потери напора (энергии) h _f , м						
13. Гидравлический уклон, i _f						

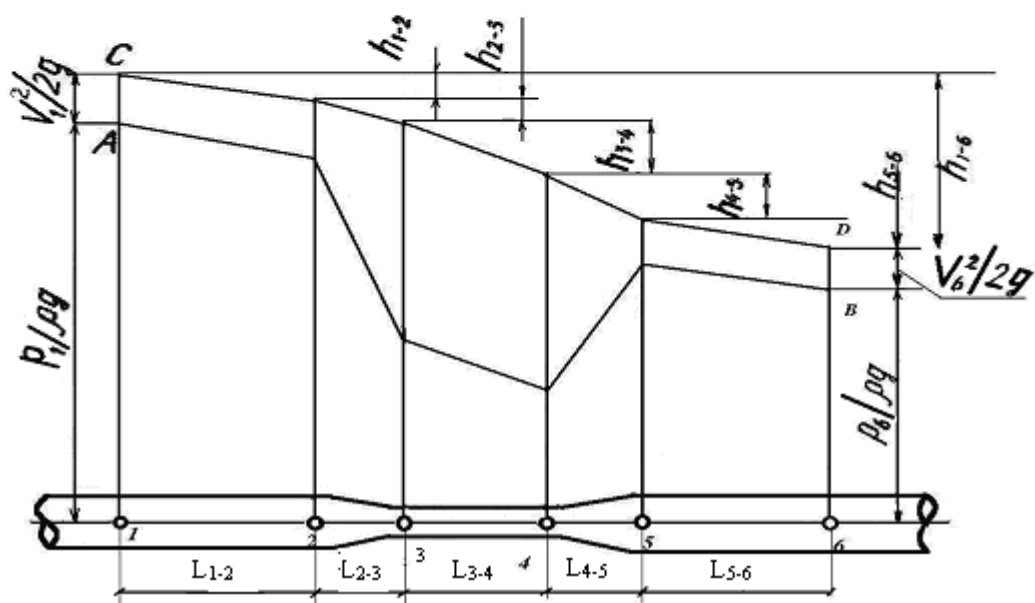
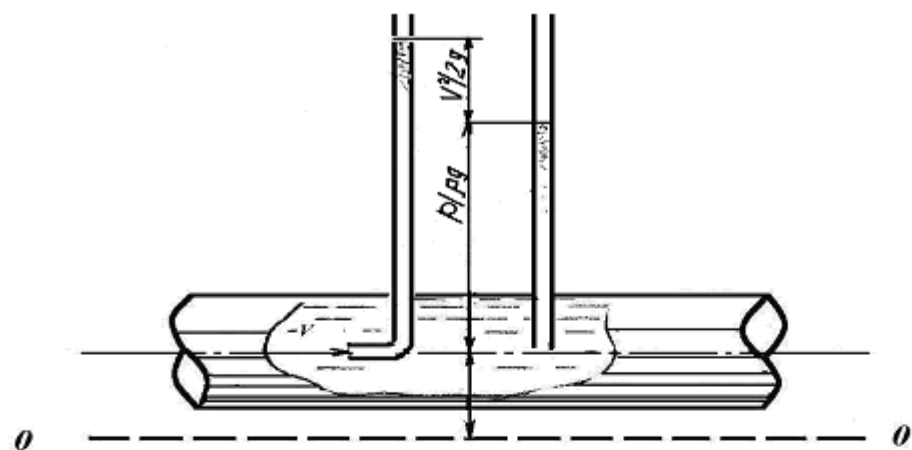


Рисунок 9.2 – Схема опытной установки

Контрольные вопросы:

1. Дать определение уравнением Бернулли.
2. Написать уравнение Бернулли.
3. Что обозначает z_i .
4. Что обозначает $\frac{p_i}{\rho g}$.
5. Что обозначает $\frac{\alpha V_i^2}{2g}$.
6. Что обозначает h_f .

7. Описать работу опытной установки.
8. Методика выполнения работы.
9. Формула для определения расхода жидкости.
10. Формула для определения средней скорости в соответствующих сечениях.
11. Формула для определения скоростных напоров.
12. Формула для определения полных напоров соответствующих сечений.
13. Формула для определения расчетных потерь напора.
14. Формула для определения гидравлических и пьезометрических уклонов.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 10
ИССЛЕДОВАНИЕ ПОТЕРЬ НАПОРА ПРИ
ЛАМИНАРНОМ РЕЖИМЕ ДВИЖЕНИЯ ЖИДКОСТИ

1 ЦЕЛЬ РАБОТЫ

- Установить опытным путем величину коэффициента гидравлического трения.
- Сравнить потери напора, полученные опытным и расчетным способами при ламинарном режиме.

2 ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Ламинарный режим движения жидкости наблюдается в маслопроводах, соединяющих между собой гидромоторы, гидроцилиндры, дроссели, фильтры и т.д. гидropередач, в топливных системах машин и механизмов, а так же в трубопроводах малого диаметра.

Потери напора в трубах круглого сечения как для ламинарного, так и для турбулентного режимов определяют по формуле Дарси-Вейсбаха

$$h = \lambda \frac{l}{D} \frac{V^2}{2g}, \quad (10.1)$$

где h – потери напора (потери удельной энергии потока), м;

λ - коэффициент гидравлического трения (коэффициент Дарси);

l – длина трубы, м;

D – диаметр трубы, м;

v – средняя скорость потока жидкости в трубе, м/с.

В случае ламинарного режима движения жидкости коэффициент Дарси вычисляется по формуле Пуазейля

$$\lambda = \frac{Re}{64}. \quad (10.2)$$

3 ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

Исследование потерь напора должно выполняться при установившемся движении жидкости в трубопроводе. Для этого при открытом кране 4 в напорной емкости 1 должен поддерживаться постоянный уровень (рисунок 10.1). При установившемся движении воды

в горизонтальном трубопроводе 2 с помощью двух пьезометров 3 определяют опытные потери напора. Объем воды за определенный промежуток времени определяется мерной емкостью 5. Все опытные данные заносятся в таблицу 10.1.

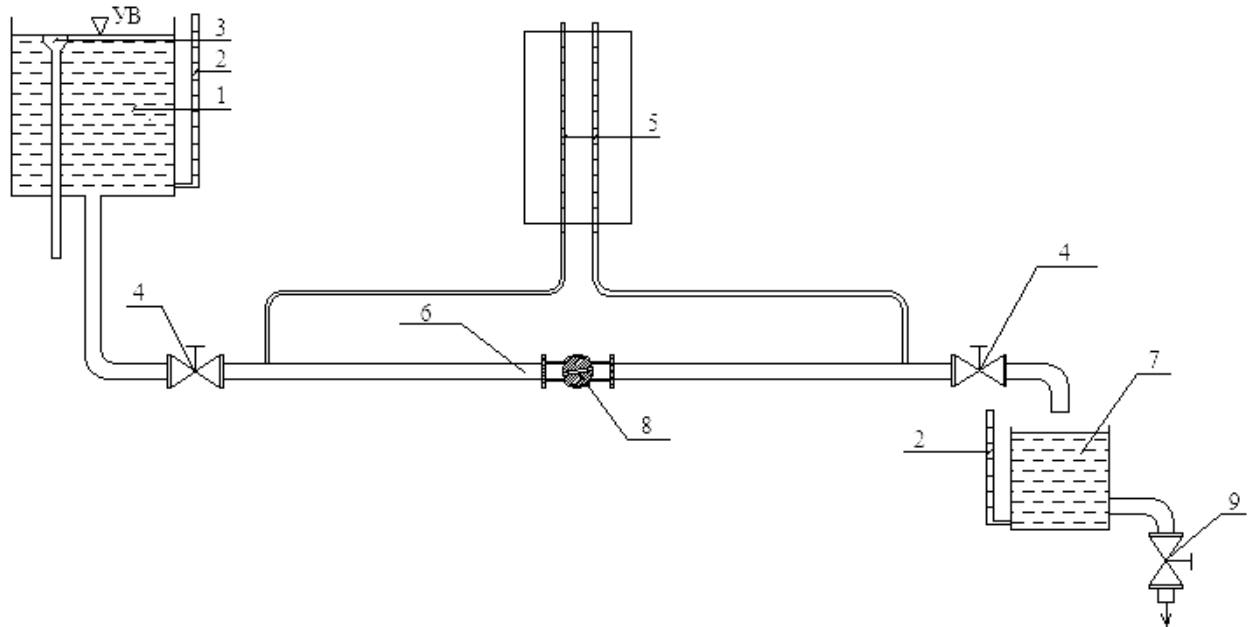


Рисунок 10.1- 1-накопительная емкость; 2,5-пьезометр; 3-переливной трубопровод; 4-вентиль; 6-стальной трубопровод; 7-мерная емкость; 8-пробковый кран; 9-задвижка.

4 ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

Для более глубокого изучения потерь напора при ламинарном режиме рекомендуется выполнить три опыта при разных значениях чисел Рейнольдса меньших числа 2300 (число Рейнольдса равное 2300 является критическим, при котором происходит смена режимов).

Обработка опытных данных выполняется в таблице 10.1. Опытные потери напора $h_{оп}$ определяются разностью показаний пьезометров 3. Опытное значение коэффициента гидравлического трения находится из формулы

$$\lambda_{он} = h_{он} \cdot \frac{2gD}{Lv^2} . \quad (10.3)$$

Расчетные потери напора и коэффициент гидравлического трения определяются по формулам (10.1) и (10.2).

5 ПОРЯДОК РАСЧЕТА

Определяют:

1. Расход воды для каждого опыта, м³/с

$$Q = \frac{W}{\tau}. \quad (10.4)$$

2. Среднюю скорость движения, м/с

$$V_{cp} = \frac{Q}{\omega}. \quad (10.5)$$

3. По таблицам или графикам вязкости воды определяют ν при данной температуре.

4. Число Рейнольдса находят по формуле

$$Re = \frac{Vd}{\nu}. \quad (10.6)$$

5. Опытную потерю напора $h_{оп}$ и потерю напора по формуле (10.1), процент расхождения значений потерь напора h и $h_{оп}$, %

Таблица 10.1 - Исследование потерь напора в медной трубке $D=0,01$ м, длиной $L = \text{м}$.

Опытные и расчетные величины	Опыт 1	Опыт 2	Опыт 3
1. Объем в мерном баке, м^3			
2. Время опыта, с			
3. Расход в медной трубке, $\text{м}^3/\text{с}$			
4. Средняя скорость в трубке, $\text{м}/\text{с}$			
5. Давление в первом пьезометре h_1 , м			
6. Давление во втором пьезометре h_2 , м			
7. Температура воды, $^{\circ}\text{C}$			
8. Кинематическая вязкость воды, $\text{м}^2/\text{с}$			
9. Число Рейнольдса			
10. Опытная потеря напора $h_{\text{оп}}$, м			
11. Потеря напора по формуле (10.1)			
12. Процент расхождения значений потерь напора h и $h_{\text{оп}}$, %			
13. Опытный коэффициент $\lambda_{\text{оп}}$			
14. Коэффициент λ по формуле Пуазейля			
15. Процент расхождения значений коэффициентов гидравлического трения λ и $\lambda_{\text{оп}}$, %			

Контрольные вопросы:

1. Что такое ламинарный режим движения жидкости.
2. Как определяется коэффициент кинематической вязкости.
3. Число Рейнольдса, при котором происходит смена режимов.
4. Описать работу опытной установки.
5. Методика выполнения работы.
6. Формула для определения расхода жидкости.
7. Формула для определения средней скорости.
8. Формула для определения числа Рейнольдса Re .
9. Формула для определения расчетных потерь напора.
10. Формула для определения значения коэффициента гидравлического трения.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 11
ИССЛЕДОВАНИЕ ПОТЕРЬ НАПОРА ПРИ
ТУРБУЛЕНТНОМ РЕЖИМЕ ДВИЖЕНИЯ ЖИДКОСТИ

1 ЦЕЛЬ РАБОТЫ

- Установить опытным путем границы областей сопротивления и величину коэффициента гидравлического трения при турбулентном режиме движения жидкости.
- Сравнить потери напора, полученные опытным и расчетным способами.

2 ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

При турбулентном движении жидкости величина коэффициента гидравлического трения зависит от многообразия условий, при которых происходит движение жидкости в трубах. Наиболее значительное влияние на величину потерь напора оказывают относительная шероховатость стенок трубы и число Рейнольдса.

При вычислении потерь напора при турбулентном режиме определяют области сопротивления. Всего при данном режиме три области сопротивления. Первая область сопротивления – это «область гладких русел». Здесь выступы шероховатости стенок трубопровода покрыты ламинарной пленкой (вязким подслоем), шероховатость стенок русла не оказывает влияния на потери напора. Потери напора прямо пропорциональны скорости в степени 1,75. Граница первой области сопротивления ограничивается числом Рейнольдса равным 10^5 или по данным других источников произведением $Re \frac{\Delta}{D} < 10$ (где Δ – эквивалентная шероховатость, мм; D – диаметр трубопровода, мм). Отношение $\frac{\Delta}{D}$ безразмерная величина и называется относительной шероховатостью. Коэффициент гидравлического сопротивления в области гладких русел зависит только от числа Рейнольдса и определяется по формуле Блазиуса

$$\lambda = \frac{0,3164}{Re^{0,25}}. \quad (11.1)$$

Вторая область – это «область доквадратичного сопротивления шероховатых русел» и находится в диапазоне $10 < Re \frac{\Delta}{D} < 500$. Здесь коэффициент гидравлического трения зависит как от числа Рейнольдса, так и от относительной шероховатости стенок трубопровода.

Коэффициент Дарси во второй области сопротивления можно определить по обобщенной формуле, предложенной А.Д. Альтшулем

$$\lambda = 0,11\left(\frac{\Delta}{D} + \frac{68}{Re}\right)^{0,25}. \quad (11.2)$$

Третья область сопротивления – это «область квадратичного сопротивления шероховатых русел». На величину потерь напора оказывает влияние относительная шероховатость. Границы этой зоны находятся в диапазоне $Re \frac{\Delta}{D} > 500$. Для инженерных расчетов наиболее удобна формула Шифринсона

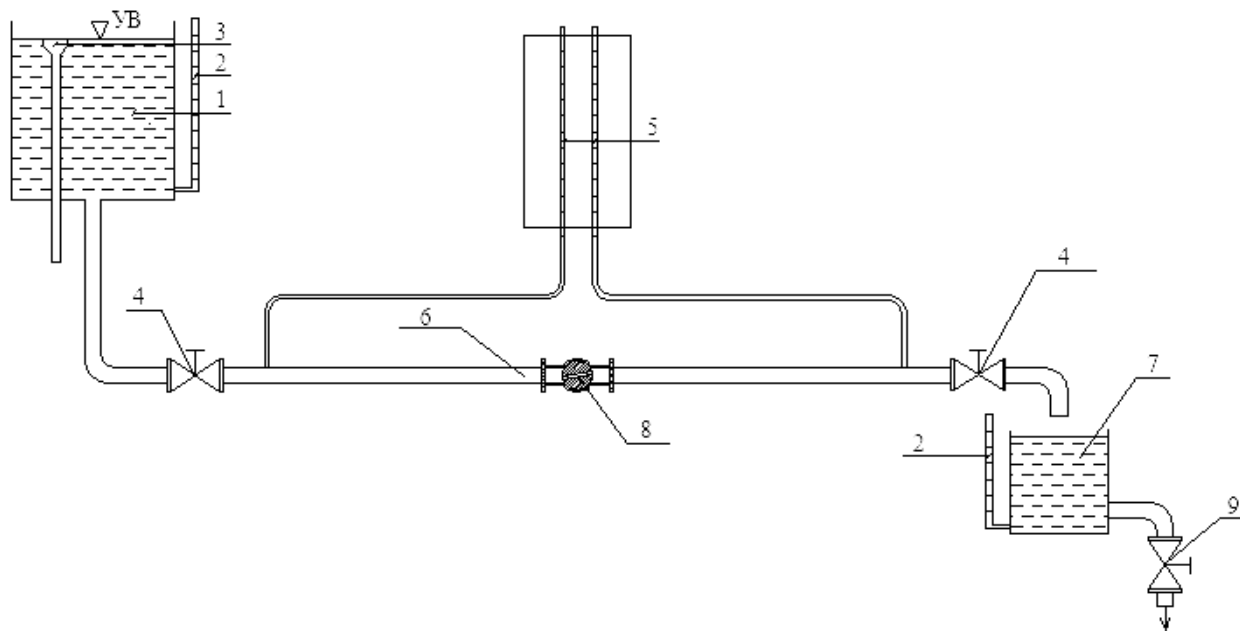
$$\lambda = 0,11\left(\frac{\Delta}{D}\right)^{0,25}. \quad (11.3)$$

3 ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

Схема опытной установки приведена на рисунке 11.1. Рабочий участок, где определяются потери напора и исследуется коэффициент гидравлического трения, представляет собой стальной трубопровод 2. При помощи вентиля 4 на трубопроводе диаметром 20 мм (или задвижки 4 на трубопроводе 50 мм) изменяется расход воды на рабочем участке. Опытные потери напора определяются при помощи пьезометров 3. Расход воды измеряется объемным способом при помощи мерной емкости 5 и мерной трубки 6. Размеры в плане емкости 5 определяются на месте при помощи сантиметровой линейки.

4 ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

Методика выполнения опытов такая же, как описана в работе № 10. Выполняется три опыта. Опыты должны соответствовать условиям сопротивления движения потока всем трем зонам. В первом опыте исследуется зона «гладких русел», во втором – «доквадратичного сопротивления», в третьем – «квадратичного сопротивления». Опытные данные заносятся в таблицу 11.1 и производятся расчеты. Вычисляются коэффициенты гидравлического трения и потери напора, которые сравниваются с опытными значениями. Процент расхождения опытных и расчетных данных не должен превышать 5 %. В конце работы делаются выводы.



1-накопительная емкость; 2,5-пьезометр; 3-переливной трубопровод; 4-вентиль; 6-стальной трубопровод; 7-мерная емкость; 8-пробковый кран; 9-затворка.

Рисунок 11.1 – Схема установки

Таблица 11.1 – Исследование потерь напора в стальной трубе $L=4.8$ м

Опытные и расчетные величины	Опыт 1	Опыт 2	Опыт 3
1. Объем воды в мерной емкости, м^3			
2. Время опыта, с			
3. Температура воды, $^{\circ}\text{C}$			
4. Вязкость воды, $\text{м}^2/\text{с}$			
5. Расход воды в трубопроводе, $\text{м}^3/\text{с}$			
6. Средняя скорость, $\text{м}/\text{с}$			
7. Диаметр и шероховатость трубопровода, мм Относительная шероховатость $\frac{\Delta}{D}$			
8. Давление в первом пьезометре M_1 , м			
9. Давление во втором пьезометре M_2 , м			
10. Число Рейнольдса Re			
11. Критерий $Re \frac{\Delta}{D}$			
12. Область сопротивления			
13. Расчетный коэффициент трения λ			
14. Потери напора по формуле (10.1), м			
15. Опытные потери напора, м			
16. Процент расхождения между опытными и рассчитанными потерями напора, %			

5 ПОРЯДОК РАСЧЕТА

Определяют:

1. Расход воды для каждого опыта, м³/с

$$Q = \frac{W}{\tau}. \quad (11.4)$$

2. Среднюю скорость движения, м/с

$$V_{cp} = \frac{Q}{\omega}. \quad (11.5)$$

3. По таблицам или графикам вязкости воды находят ν при данной температуре.

4. Число Рейнольдса

$$Re = \frac{Vd}{\nu}. \quad (11.6)$$

5. Область сопротивления.

6. Потери напора по формуле

$$h = \lambda \frac{l}{D} \frac{V^2}{2g}. \quad (11.7)$$

Контрольные вопросы:

1. Что такое турбулентный режим движения жидкости.
2. Какие существуют области сопротивления.
3. Первая область сопротивления – название, чем характеризуется, где проходит граница.
4. Вторая область сопротивления – название, чем характеризуется, где проходит граница.
5. Третья область сопротивления – название, чем характеризуется, где проходит граница.
6. Описать работу опытной установки.
7. Методика выполнения работы.
8. Как определяется коэффициент кинематической вязкости.
9. Как определяется число Рейнольдса Re .
10. Дать определение критическому числу Рейнольдса $Re_{кр}$.
11. Чему равно численное значение критерия Рейнольдса.
12. Как определяется коэффициент гидравлического трения, что это такое.

13. Как определяются опытные потери напора по длине h_{on} .
14. Формула для определения расчетных потерь напора.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 12
ИСТЕЧЕНИЕ ЖИДКОСТИ ЧЕРЕЗ ОТВЕРСТИЕ
В ТОНКОЙ СТЕНКЕ ПРИ ПОСТОЯННОМ НАПОРЕ

1 ЦЕЛЬ РАБОТЫ

- Определить по опытным данным для малого отверстия в тонкой стенке значения:
 - а) коэффициента сжатия ε ;
 - б) коэффициента скорости φ ;
 - в) коэффициента расхода μ .
- Сравнить опытные коэффициенты со справочными.

2 ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Задача об истечении жидкости из отверстий является одной из важнейших и имеет большое значение в различных областях техники. Истечение из-под затворов на плотинах и шлюзах, опорожнение резервуаров и водохранилищ, истечение из отверстий в стенках различных резервуаров и многое другое основано на решении этой задачи.

Условия, при которых происходит истечение, весьма разнообразны. Различают:

- а) истечение при постоянном напоре – случай установившегося движения;
- б) истечение при переменном напоре – случай неустановившегося движения.

В обоих случаях истечение может происходить или в атмосферу или под уровень, т.е. через «затопленные отверстия».

Формы и размеры отверстий могут быть разнообразны. Различают следующие виды отверстий: по относительной величине отверстия – малое и большое, по относительной толщине стенки – отверстия в тонкой и толстой стенке.

Малым отверстием называется такое, у которого наибольший вертикальный размер d не превышает $0,1H$.

Большим отверстием называется такое, у которого вертикальный размер более $0,1H$, т.е. $H/d < 10$.

Отверстием в тонкой стенке называют отверстие, края которого имеют острую кромку, а толщина стенки не превышает $3d$.

При толщине стенки больше, чем три диаметра отверстия имеет место истечения жидкости через **отверстие в толстой стенке**.

При истечении из резервуара жидкость стремится к отверстию по различным направлениям и, выходя из отверстия в виде струи, совершает далее свободный полет в воздухе.

Отношение площади сжатого сечения струи к площади отверстия называется коэффициентом сжатия. Коэффициент сжатия равен

$$\varepsilon = \frac{\omega_{сж}}{\omega_0} \quad (12.1)$$

Многочисленными экспериментами установлено, что для круглого отверстия $\varepsilon = 0,64$.

При истечении жидкости через отверстия обычно требуется определить скорость течения и расход жидкости.

Для определения действительной скорости течения V_∂ в сжатом сечении применяется уравнение Бернулли для потока, при решении которого получается формула для определения скорости

$$V_\partial = \varphi \cdot \sqrt{2gH}, \quad (12.2)$$

где V_∂ - действительная скорость жидкости в сжатом состоянии, м/с;

φ – коэффициент скорости;

g – ускорение свободного падения, м/с²;

H – напор над центром отверстия, м.

Теоретическая скорость истечения может быть определена по формуле Торричелли

$$V_m = \sqrt{2gH}. \quad (12.3)$$

Под коэффициентом скорости понимается отношение действительной скорости истечения к теоретической, т.е.

$$\varphi = \frac{V_\partial}{V_m} = \frac{1}{\sqrt{1 + \xi_{вх}}}, \quad (12.4)$$

где $\xi_{\text{вх}}$ – коэффициент местного сопротивления на вход в отверстие ($\xi_{\text{вх}} = 0,06$).

Опытами установлено, что коэффициент скорости $\varphi = 0,97$.

Зная величину действительной скорости в сжатом сечении и площадь сжатого сечения вытекающей из отверстия струи можно определить величину расхода жидкости

$$Q_0 = \omega_{\text{сж}} \cdot V_{\text{сж}}, \quad (12.5)$$

или учитывая, что $\omega_{\text{сж}} = \varepsilon \cdot \omega_0$, а $V_{\text{сж}} = \varphi \cdot \sqrt{2gH}$:

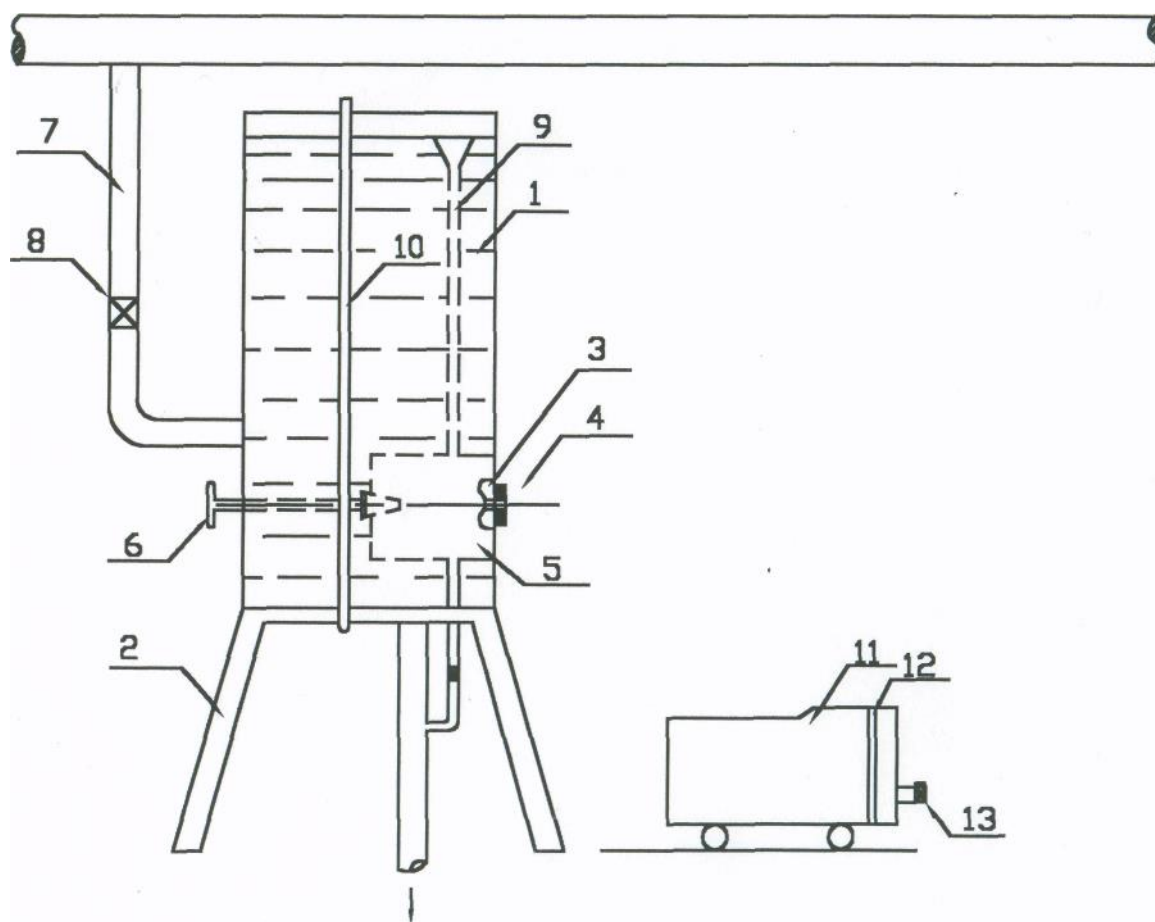
$$Q_0 = \varepsilon \cdot \omega_0 \cdot \varphi \cdot \sqrt{2gH}, \quad (12.6)$$

где Q_0 – расход жидкости, вытекающей из отверстия, м³/с;

μ_0 – коэффициент расхода отверстия;

ω_0 – площадь живого сечения отверстия, м².

Обычно величину μ_0 принимают равной 0,62.



1 – прямоугольный резервуар; 2 – подставка; 3 – посадочное место; 4 – отверстие в тонкой стенке; 5 – запорное устройство; 6 – рукоятка; 7 – трубопровод; 8 – задвижка; 9 переливная труба; 10, 12 – пьезометры; 11 – мерная тележка; 13 – кран

Рисунок 12.1 – Схема опытной установки

3 ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

Лабораторная установка представляет собой призматический резервуар 1, расположенный на подставке 2. В боковой стенке резервуара имеется посадочное место 3, куда вворачивается отверстие в тонкой стенке. Вход в отверстие закрывается запорным устройством 5 с помощью рукоятки 6.

Вода в резервуар подается по трубопроводу 7, путем открытия задвижки 8.

В резервуаре поддерживается постоянный уровень воды с помощью переливной трубы 9, который контролируется пьезометром 10.

Струя воды, вытекающая из бака через отверстие, попадает в перемещающуюся по рельсам мерную тележку 11, на которой также установлен пьезометр 12, для измерения уровней воды в ней. Для опорожнения тележки на ней установлен кран 13.

4 ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

Перед началом опыта с помощью запорного устройства перекрывается вход в отверстие на резервуаре и открывается кран на мерной тележке.

С помощью штангенциркуля замеряется диаметр отверстия в тонкой стенке и данные записываются в таблицу. Отверстие вворачивается в посадочное место на резервуаре.

Открывается задвижка на подводящем трубопроводе и резервуар заполняется до верха переливного устройства. Открывается запорное устройство, и вода из резервуара через отверстие начинает вытекать в мерную тележку – происходит опорожнение резервуара. Уровень воды должен быть постоянным – его показание должно быть записано.

С помощью штангенциркуля замеряют диаметр сжатого сечения вытекающей струи и данные записывают в таблицу.

Затем закрывается кран на мерной тележке и определяется расход жидкости, поступившей в неё, объемным методом.

Внимание. В течение опыта необходимо контролировать уровень воды в резервуаре по пьезометру – он должен быть постоянным.

5 ПОРЯДОК РАСЧЕТА

1. Вычисляется площадь сжатого сечения струи

$$\omega_{сж} = \frac{\pi \cdot d_{сж}^2}{4}. \quad (12.7)$$

2. Вычисляется опытный коэффициент сжатия струи

$$\varepsilon_{оп} = \frac{\omega_{сж}}{\omega_0}, \quad (12.8)$$

где ω_0 – площадь живого сечения струи, м².

$$\omega_0 = \frac{\pi \cdot d_0^2}{4}. \quad (12.9)$$

3. Определяется опытный расход жидкости через отверстия в тонкой стенке, м³/с

$$Q_{on} = W / \tau , \quad (12.10)$$

где W – объем воды, поступивший в мерную тележку за промежуток времени τ , м³.

$$W = a \cdot b \cdot h . \quad (12.11)$$

4. Определяется опытная скорость жидкости в отверстии, м/с

$$V_{on} = \frac{Q_{on}}{\omega_{сж}} . \quad (12.12)$$

5. Вычисляется теоретическая скорость жидкости через отверстие в тонкой стенке по формуле Торричелли, м/с

$$V_T = \sqrt{2gH} . \quad (12.13)$$

6. Определяется опытный коэффициент скорости отверстия

$$\varphi_{on} = V_{on} / V_{теор} . \quad (12.14)$$

7. Определяется опытный коэффициент расхода жидкости через отверстия в тонкой стенке из формулы расхода через отверстие

$$Q_{on} = \mu \cdot \omega_0 \cdot \sqrt{2gH} . \quad (12.15)$$

$$\mu_{on} = \frac{Q_{on}}{\omega_0 \sqrt{2gH}} . \quad (12.16)$$

Полученные опытным путем коэффициенты сравниваются с табличными.

Таблица 12.1 – Сводная таблица

№ п/п	Показатели	Обозначение	Ед. измерения	Данные опыта
1	Диаметр отверстия в тонкой стенке	d	м	
2	Площадь живого сечения отверстия	ω_0	м^2	
3	Диаметр сжатого сечения струи	$d_{\text{сж}}$	м	
4	Площадь сжатого сечения струи	$\omega_{\text{сж}}$	м^2	
5	Напор в резервуаре над центром отверстия	H	м	
6	Длина мерной тележки	a	м	
7	Ширина мерной тележки	b	м	
8	Расход воды	Q	$\text{м}^3/\text{с}$	
9	Показание пьезометра на мерной тележке в начале замера времени	h_1	м	
10	Показание пьезометра на мерной тележке в конце замера времени	h_2	м	
11	Глубина наполнения мерной тележки за период времени t	h	м	
12	Объем воды, поступивший в мерную тележку за период времени t	W	м^3	
13	Время заполнения указанного объема в мерной тележке	τ	с	

Таблица 12.2 – Сравнение опытных данных с табличными

Опытные значения	$\varepsilon_{\text{оп}} =$	$\varphi_{\text{оп}} =$	$\mu_{\text{оп}} =$
Табличные значения	$\varepsilon_{\text{табл}} = 0,64$	$\varphi_{\text{табл}} = 0,97$	$\mu_{\text{табл}} = 0,62$

Контрольные вопросы:

1. Дать определение большим и малым отверстиям?
2. В чем различие между отверстиями в толстой и тонкой стенке? Дать определение.
3. Что называется коэффициентом сжатия и от чего зависит его величина?
4. Как выводятся формулы скорости для малого незатопленного отверстия?
5. Что называют коэффициентами скорости и расхода при истечении через отверстие?
6. Как пишутся формулы расхода при свободном истечении через отверстие и при истечении под уровень?
7. Какими принимают расчетные коэффициенты скорости и расхода при истечении жидкости через отверстия?
8. Какие существуют расчетные формулы для определения расхода через большие отверстия и как определяются коэффициенты расхода?
9. Определение расхода при истечении через отверстие в тонкой стенке?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 13
ИСТЕЧЕНИЕ ЖИДКОСТИ ЧЕРЕЗ НАСАДКИ
ПРИ ПОСТОЯННОМ НАПОРЕ

1 ЦЕЛЬ РАБОТЫ

- Познакомиться с понятием насадка.
- Изучить насадки различных типов.
- Определить опытным путем числовые значения коэффициентов расхода насадков различных типов.

2 ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Насадком называется короткий патрубок, присоединенный к отверстию в стенке резервуара и имеющий длину равную $(3\div 4)d$ отверстия.

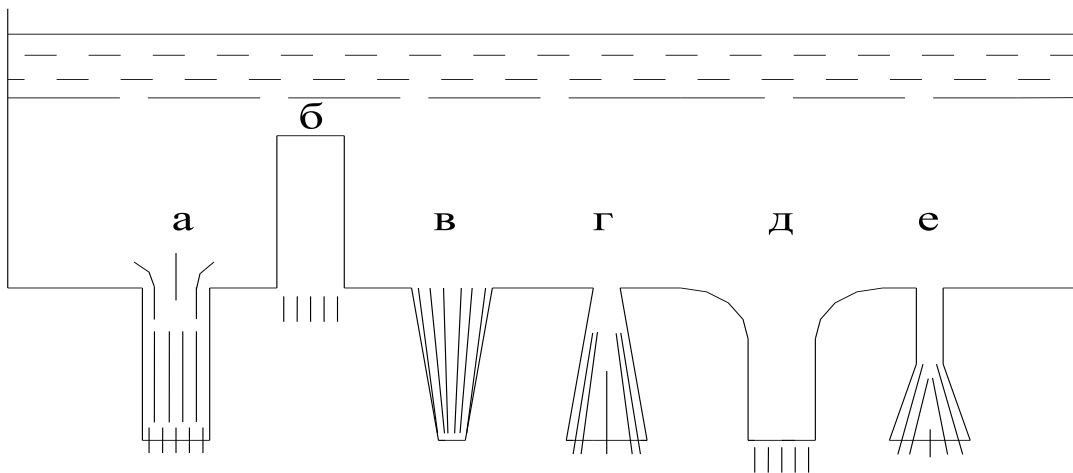


Рисунок 13.1 – Виды насадков

По своей форме насадки могут быть:

- а) цилиндрическими наружными (внешними) (Вентури);
- б) цилиндрическими внутренними (Борда);
- в) коническими сходящимися;
- г) коническими расходящимися;
- д) коноидальными;
- е) комбинированными.

Насадки находят широкое применение для различных технических целей. Это трубы, служащие для выпуска жидкости из резервуаров и водоемов, всевозможные краны,

пожарные брандспойты, форсунки для подачи топлива, сопла активных гидравлических турбин и многое другое.

Рассмотрим на примере истечения жидкости через внешний цилиндрический насадок вопросы истечения жидкости через насадки вообще.

Вход жидкости в насадок такой же, как и в отверстие, т.е. за счет сил инерции происходит сужение потока. Затем струя постепенно расширяется и заполняет все поперечное сечение насадка. Сжатие струи здесь происходит только внутри насадка (внутреннее сжатие), выходное же сечение насадка работает полностью, и поэтому коэффициент сжатия струи, отнесенный к выходному сечению, будет $\varepsilon = 1,0$.

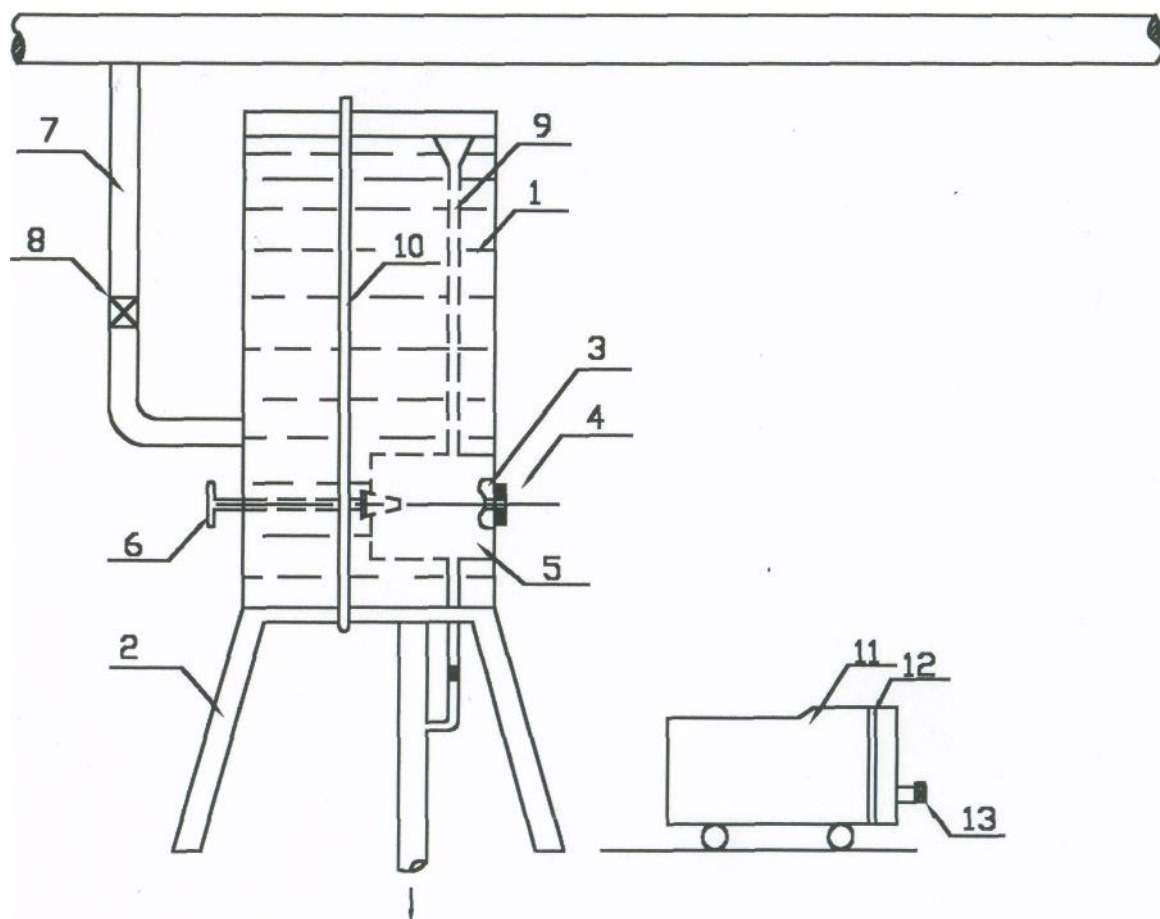
Из зависимости $\mu = \varepsilon \cdot \varphi$ следует, что для внешнего цилиндрического насадка коэффициент расхода, отнесенный к выходному сечению, равен коэффициенту скорости, т.е. $\mu = \varphi$. Отсюда заключаем, что коэффициент расхода через насадок, определяемый по зависимости $\mu = \varphi$, всегда будет больше коэффициента расхода для отверстия в тонкой стенке, определяемого по формуле $\mu = \varepsilon \cdot \varphi$, т.к. для отверстий в тонкой стенке всегда $\varepsilon < 1,0$. Опытные данные подтверждают это положение. Так, согласно экспериментальным исследованиям, коэффициент расхода для внешнего цилиндрического насадка равен $\mu = 0,82$, в то время как коэффициент расхода для малого отверстия в тонкой стенке равен 0,62, т.е. насадок увеличивает коэффициент расхода, а, следовательно, и сам расход $\sim$ в 1,32 раза по сравнению с расходом через отверстие в тонкой стенке.

С физической стороны увеличение расхода в рассматриваемом насадке объясняется наличием вакуума в сжатом сечении, который действует на истечение жидкости как насос.

Общие расчетные формулы для определения скорости и расхода через насадки при постоянном напоре остаются те же, что для отверстий в тонкой стенке.

3 ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

Лабораторная установка представляет собой призматический резервуар 1, расположенный на подставке 2. В боковой стенке резервуара имеется посадочное место 3, куда вворачиваются насадки различных типов. Вход в насадки закрывается запорным устройством 5 с помощью рукоятки 6. Вода в резервуар подается по трубопроводу 7, путем открытия задвижки 8. В резервуаре поддерживается постоянный уровень воды с помощью переливной трубы 9, который контролируется пьезометром 10. Струя воды, вытекающая из резервуара через насадок, попадает в перемещающуюся по рельсам мерную тележку 11, на которой также установлен пьезометр 12, для замера уровней воды в ней. Для опорожнения тележки на ней установлен кран 13.



1 – прямоугольный резервуар; 2 – подставка; 3 – посадочное место; 4 – отверстие в тонкой стенке; 5 – запорное устройство; 6 – рукоятка; 7 – трубопровод; 8 – задвижка; 9 переливная труба; 10, 12 – пьезометры; 11 – мерная тележка; 13 - кран

Рисунок 13.3 – Схема опытной установки

Внимание!!! В течение всего опыта необходимо контролировать уровень воды в резервуаре по пьезометру – он должен быть постоянным.

Замеры повторить со всеми насадками различных форм. Все данные опытов записываются в таблицу 13.1.

4 ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

Перед началом опытов с помощью запорного устройства перекрывается вход в посадочное место на резервуаре и открывается кран на мерной тележке.

Выбирается насадок. С помощью штангенциркуля измеряется его внутренний диаметр и длина. Данные записываются в таблицу 13.1. Затем насадок вворачивается в посадочное место на резервуаре.

Открывается задвижка на подводящей трубе и резервуар заполняется водой до верха переливного устройства. Открывается запорное устройство, и вода из резервуара через насадок начинает вытекать в мерную тележку. Уровень воды в резервуаре должен быть постоянным – его показание должно быть записано в таблицу 13.1.

Затем закрывается кран на мерной тележке и определяется расход жидкости поступающей в неё объемным методом.

5 ПОРЯДОК РАСЧЕТА

1. Объемным методом определяется опытный расход жидкости через насадки по формуле, м³/с

$$Q_{on} = \frac{W}{\tau}, \quad (13.1)$$

где W – объем воды, поступившей в мерную тележку за промежуток времени τ , м³.

$$W = a \cdot b \cdot h. \quad (13.2)$$

Необходимо определить опытные расходы через все указанные типы насадков, т.е.:

$Q_{on}^{ц.н.}$ - расход через цилиндрический внутренний;

$Q_{on}^{ц.в.}$ - расход через цилиндрический наружный;

$Q_{on}^{к.с.}$ - расход через конический сходящийся;

$Q_{on}^{к.р.}$ - расход через конический расходящийся.

2. Определяется опытный коэффициент расхода насадка из формулы

$$Q_{on} = \mu \cdot \omega_n \cdot \sqrt{2gH}, \quad (13.3)$$

$$\mu_{on} = Q_{on} / \omega_n \sqrt{2gH}. \quad (13.4)$$

Необходимо определить опытные коэффициенты расхода всех указанных типов насадков, т.е.

$\mu_{on}^{ц.в.}$ - коэффициент расхода цилиндрического внутреннего;

$\mu_{on}^{ц.н.}$ - коэффициент расхода цилиндрического наружного;

$\mu_{on}^{к.с.}$ - коэффициент расхода конического сходящегося;

$\mu_{on}^{к.р.}$ - коэффициент расхода конического расходящегося.

Полученные опытным путем коэффициенты расхода различных типов насадков сравнивают с табличными (табл. 13.1)

Таблица 13.1 – Сравнение коэффициентов расхода для различных типов насадков.

Значения	Коэффициент расхода μ			
	цилиндрический наружный насадок	цилиндрический внутренний насадок	конический сходящийся насадок	конический расходящийся насадок
Опытные значения				
Табличные значения	0,82	0,71	0,95	0,45
Погрешность				

Контрольные вопросы

1. Что называется насадкам.
2. Какие насадки бывают
3. Описать работу опытной установки.
4. Методика выполнения работы.
5. По каким формулам определяются опытный коэффициент расхода насадка.
6. Понятие жидкости.
7. Где больше коэффициент расхода в отверстии или насадке.
8. В каких единицах измерения определяется расход жидкости.

Таблица 13.2 – Данные для выполнения расчетов

№ п/п	Показатели	Обозначение	Ед. измерения	Данные опыта			
				цилиндрич еский внешний насадок	цилиндрически й внутренний насадок	конически сходящийся насадок	конически расходящийся насадок
1.	Длина насадки	I_n	м				
2.	Внутренний диаметр выходного сечения насадка	d_n	м				
3.	Площадь живого сечения на выходе из насадка	ω_n	м^2				
4.	Напор в резервуаре над центром насадка	H	м				
5.	Длина мерной тележка	a	м				
6.	Ширина мерной тележка	b	м				
7.	Показание пьезометра на мерной тележке в начале замера времени τ	h_1	м				
8.	Показание пьезометра на мерной тележке в конце замера времени τ	h_2	м				
9.	Глубина направления мерной тележки за период времени τ	h	м				
10.	Объем воды, поступивший в мерную тележку за период времени τ	W	м^3				
11.	Время заполнения указанного объема в мерной тележке	τ	с				

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 14

ОПОРОЖНЕНИЕ РЕЗЕРВУАРА

1 ЦЕЛЬ РАБОТЫ

- Вычислить время, в течение которого напор над центром отверстия в резервуаре изменится от H_1 до H_2 и сравнить со временем, полученным по опыту.
- Вычислить время полного опорожнения резервуара через отверстие в тонкой стенке и через один из насадков. Результаты вычислений сравнить с опытными.

2 ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

В предыдущих лабораторных работах мы рассматривали вопросы истечения жидкости из отверстий и насадков при постоянном напоре. Разберем теперь случай, когда истечение жидкости из резервуара происходит при изменяющемся напоре. На практике такое истечение можно наблюдать при вытекании жидкости из баков, бочек, бассейнов, при опорожнении и наполнении водохранилищ, камер судоходных шлюзов и т.п.

Если при истечении жидкости из сосуда уровень ее непрерывно меняется, а, следовательно, непрерывно меняется и расход, скорость истечения и прочие элементы движения, мы имеем дело с неустановившимся видом движения, отличающимся большей сложностью по сравнению с установившимся видом движения.

Вопрос об истечении жидкости при переменном уровне сводится к наиболее часто встречающейся в практике задаче - определению времени, необходимого для опорожнения или наполнения данного сосуда, водохранилища, шлюза и т.п.

Рассмотрим опорожнение призматического резервуара, имеющего постоянную площадь поперечного сечения Q . Предположим, что в боковой стенке этого резервуара устроено отверстие площадью ω .

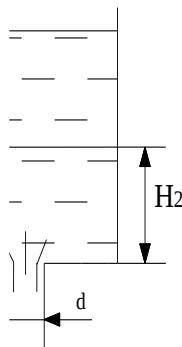


Рисунок 14.1 –Опорожнение резервуара

Предположим, что первоначальный напор над центром отверстия равен H_1 , а конечный – H_2 . За время опорожнения резервуар не пополняется. Расчет опорожнения резервуара заключается в определении времени этого процесса.

Так время изменения уровня жидкости в резервуаре от напора H_1 до напора H_2 будет равно

$$\tau = \frac{2 \cdot \Omega \cdot (\sqrt{H_1} - \sqrt{H_2})}{\mu \cdot \omega \cdot \sqrt{2g}}, \quad (14.1)$$

где τ – время опорожнения, с;

Ω – площадь поперечного резервуара, м^2 ;

H_1 – начальный напор над центром отверстия, м;

H_2 – конечный напор над центром отверстия, м;

μ – коэффициент расхода отверстия;

g – ускорение свободного падения, м/с^2 .

Для случая полного опорожнения резервуара, т.е. когда $H_2 = 0$, формула (14.1) примет вид

$$\tau = \frac{2 \cdot \Omega \cdot (\sqrt{H_1})}{\mu \cdot \omega \cdot \sqrt{2g}}, \text{ или} \quad (14.2)$$

$$\tau = \frac{2 \cdot \Omega \cdot (\sqrt{H_1})}{\mu \cdot \omega \cdot \sqrt{2g}} = \frac{2W}{Q}, \quad (14.3)$$

где W – объем резервуара, м^3 ;

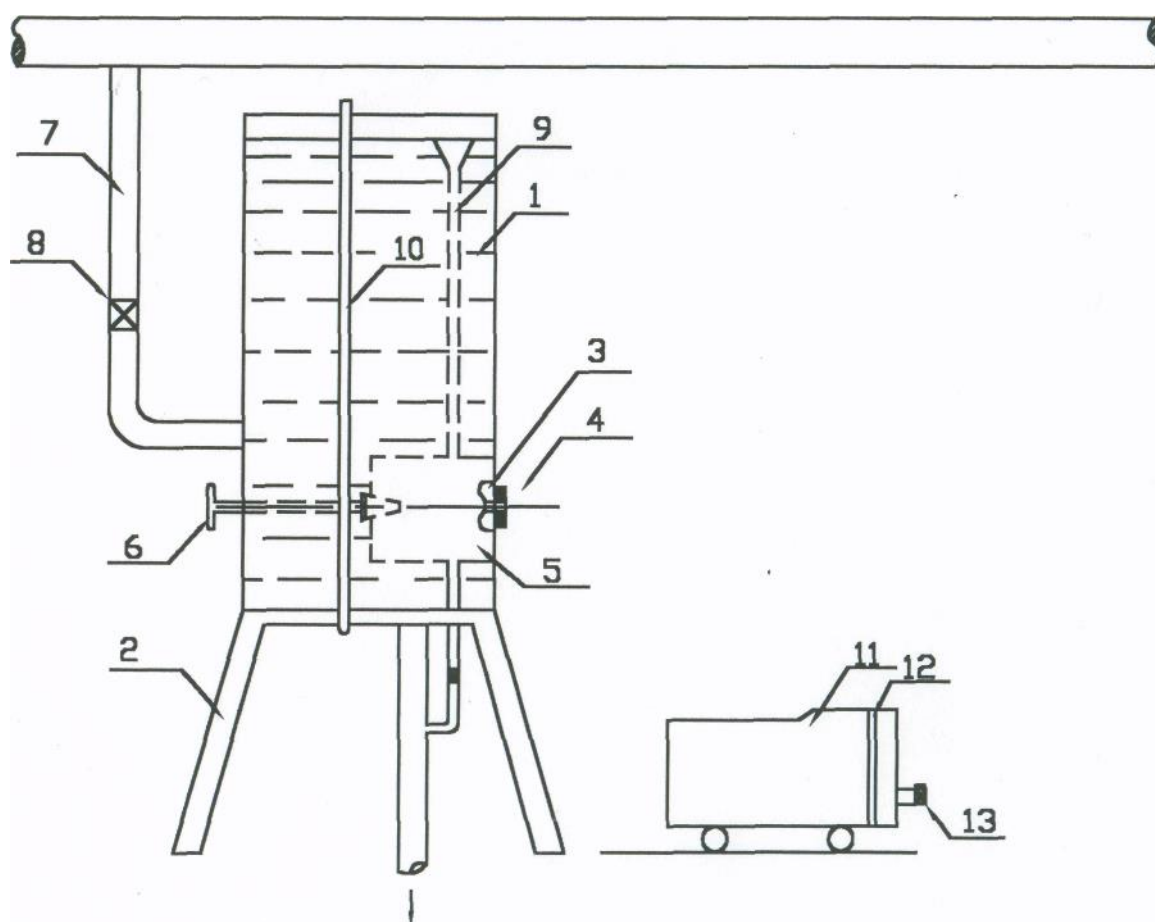
Q – расход жидкости при начальном напоре H_1 , $\text{м}^3/\text{с}$.

Таким образом, время полного опорожнения резервуара при переменном напоре в два раза больше того времени, которое требуется для вытекания из резервуара жидкости при начальном напоре в количестве, равном первоначальному объему.

Время опорожнения резервуаров через различные виды насадков определяется по тем же формулам, что и для отверстий с той разницей, что для насадков в расчетах используются свои коэффициенты расхода.

3 ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

Лабораторная установка представляет собой призматический резервуар 1, расположенный на подставке 2. В боковой стенке резервуара имеется посадочное место 3, куда вворачиваются отверстие в тонкой стенке и насадки различных типов. Вход в отверстие и насадки закрывается запорным устройством 5 с помощью рукоятки 6. Вода в резервуар подается по трубопроводу 7, путем открытия задвижки 8. Уровни воды в резервуаре контролируются пьезометром и измеряются пьезометром 10. Опорожнение резервуара происходит через отверстие или насадки, вворачиваемые в посадочное место в резервуаре.



1 – прямоугольный резервуар; 2 – подставка; 3 – посадочное место; 4 – отверстие в тонкой стенке; 5 – запорное устройство; 6 – рукоятка; 7 – трубопровод; 8 – задвижка; 9 переливная труба; 10, 12 – пьезометры; 11 – мерная тележка; 13 – кран

Рисунок 14.2 – Схема опытной установки.

4 ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

С помощью штангенциркуля измеряется диаметр отверстия в тонкой стенке и данные записываются в таблицу. Отверстие вворачивается в посадочное место на резервуаре.

Перед началом опыта с помощью запорного устройства перекрывается вход в отверстие на резервуаре и открывается кран на мерной тележке.

Открывается задвижка на подводящем трубопроводе и резервуар заполняется до верха переливного устройства, после чего задвижка на подводящем трубопроводе закрывается.

Открывается запорное устройство, и вода из резервуара через отверстие начинает вытекать в мерную тележку – происходит опорожнение резервуара.

Уровень воды в резервуаре постепенно снижается, что можно наблюдать по пьезометру, установленному на резервуаре. Через некоторое время секундомер выключается и снова снимается показание пьезометра на резервуаре. Таким образом, экспериментально определяется время снижения уровня воды в резервуаре от H_1 до H_2 .

Аналогичным образом определяется время полного опорожнения резервуара через отверстие в тонкой стенке с той лишь разницей, что секундомер выключается тогда, когда уровень воды в пьезометре будет находиться по центру отверстия в тонкой стенке, т.е. $H_2 = 0$.

Затем в посадочное место вворачивается насадок любой формы, и по той же методике определяем время полного опорожнения через него.

Результаты всех наблюдений заносятся в таблицу 14.1.

5 ПОРЯДОК РАСЧЕТА

1. Вычисляется теоретическое время частичного опорожнения резервуара от H_1 до H_2 через отверстие в тонкой стенке

$$\tau_{теор.}^{ч.о.} = \frac{2 \cdot \Omega \cdot (\sqrt{H_1} - \sqrt{H_2})}{\mu_0 \cdot \sqrt{2g\gamma H_1}}, \quad (14.4)$$

где μ – коэффициент расхода отверстия.

2. Вычисляется теоретическое время полного опорожнения резервуара через отверстие в тонкой стенке

$$\tau_{теор.}^{ч.о.} = \frac{2 \cdot \Omega \cdot (H_1)}{\mu_0 \cdot \sqrt{2gYH_1}}, \quad (14.5)$$

где μ - коэффициент расхода насадка.

Теоретические вычисления сравниваются с результатами полученными опытным путем.

Таблица 14.1 – Результаты опытов.

№ п/п	Показатели	Обозначение	Ед. измерения	Частичное опорожнение резервуара через отверстие от Н ₁ до Н ₂	Полное опорожнение резервуара	
					через отверстие	через насадок
1.	Длина резервуара	a	м			
2.	Ширина резервуара	b	м			
3.	Площадь резервуара	Ω	м ²			
4.	Диаметр отверстия в тонкой стенке	d ₀	м			
5.	Внутренний диаметр насадка	d _н	м			
6.	Длина насадка	l _н	м			
7.	Напор в резервуаре в начале опыта	H ₁	м			
8.	Напор в резервуаре в конце опыта	H ₂	м			
9.	Время опыта	τ	с			
10.	Расход воды	Q	м ³ /с			
11.	Объем воды	W	м ³			

Контрольные вопросы

1. Что называется малым отверстием?
2. По каким параметрам малое отверстие отличается от большого отверстия?
3. Что называется совершенным сжатием струи при истечении через отверстия?
4. Чем отличается полное сжатие струи от неполного сжатия при истечении через отверстие?
5. Чем отличается свободное истечение от истечения в атмосферу?
6. По какой формуле определяется расход жидкости при свободном истечении?
7. Как определяется коэффициент расхода отверстий при решении инженерных задач?
8. Описать работу опытной установки.
9. Методика выполнения работы

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 15.
ИССЛЕДОВАНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА СОПРОТИВЛЕНИЯ
КРАНА НА ВОДОПРОВОДНОЙ СЕТИ

1 ЦЕЛЬ РАБОТЫ

- Опытным путем установить величину коэффициента сопротивления крана от различной степени его открытия.
- Определить местную потерю напора, обусловленную краном на водопроводе.
- Изучить влияние степени закрытия крана на величину потерь напора в водопроводе.

2 ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Потери напора на преодоление гидравлических сопротивлений h обычно делят на две группы:

- потери напора по длине потока (линейные) – h_L (потери, затрачиваемые на преодоление сопротивления трения);
- местные потери напора - h_M (потери, вызываемые резким изменением конфигурации границ потока).

Полные потери напора – h на данном участке равны сумме всех потерь

$$h = h_L + h_M, \quad (15.1)$$

где h - потери напора на преодоление гидравлических сопротивлений, м;

h_L – потери напора по длине, м;

h_M – местные потери напора, м.

В закрытой водопроводной сети устанавливаются: кран, поворот, диффузор и другие устройства, которые создают дополнительные потери напора. Обусловленные местной причиной, которые вызывают изменение геометрии потока (сужение, расширение, поворот и т.д.). Такое сопротивление называется местным сопротивлением, а потерю напора в данном месте называют местной потерей напора.

Местные потери напора определяется по формуле

$$h_m = \xi \frac{V^2}{2g}, \quad (15.2)$$

где ξ - коэффициент местного сопротивления;

V - средняя скорость движения, м/с.

В большинстве случаев величину коэффициента сопротивления устанавливают опытным путем на специальных гидравлических стендах. При определении величины коэффициентов местных сопротивлений используют формулу (15.2) в виде

$$\xi = \frac{h_m \cdot 2g}{V^2}. \quad (15.3)$$

Коэффициент сопротивления крана также устанавливается экспериментально. В таблице 15.1. представлены справочные данные по А.М. Курганову и Н.Ф. Федорову, которые используются при гидравлическом расчете водопроводной сети.

Таблица 15.1- Значения ξ для пробкового крана

Параметры	Угол ϕ , град.									
	5	10	15	20	25	30	40	50	60	При закрытом
ξ	0,05	0,31	0,88	1,84	3,45	6,15	20,7	95,3	-	-

3 ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

Опытная установка для определения, коэффициента сопротивления крана (рисунок 15.1), состоит из напорной емкости 1, в которой поддерживается постоянный уровень при помощи переливной трубы 3 и пьезометра 2. Рабочий участок трубопровода 6 выполнен из стального трубопровода, на котором имеется испытуемый пробковый кран 8. Расход жидкости измеряется с помощью мерной емкости 7 объемным способом. Расход жидкости в трубопроводе регулируется вентилем 4, установленном в конце трубопровода 6.

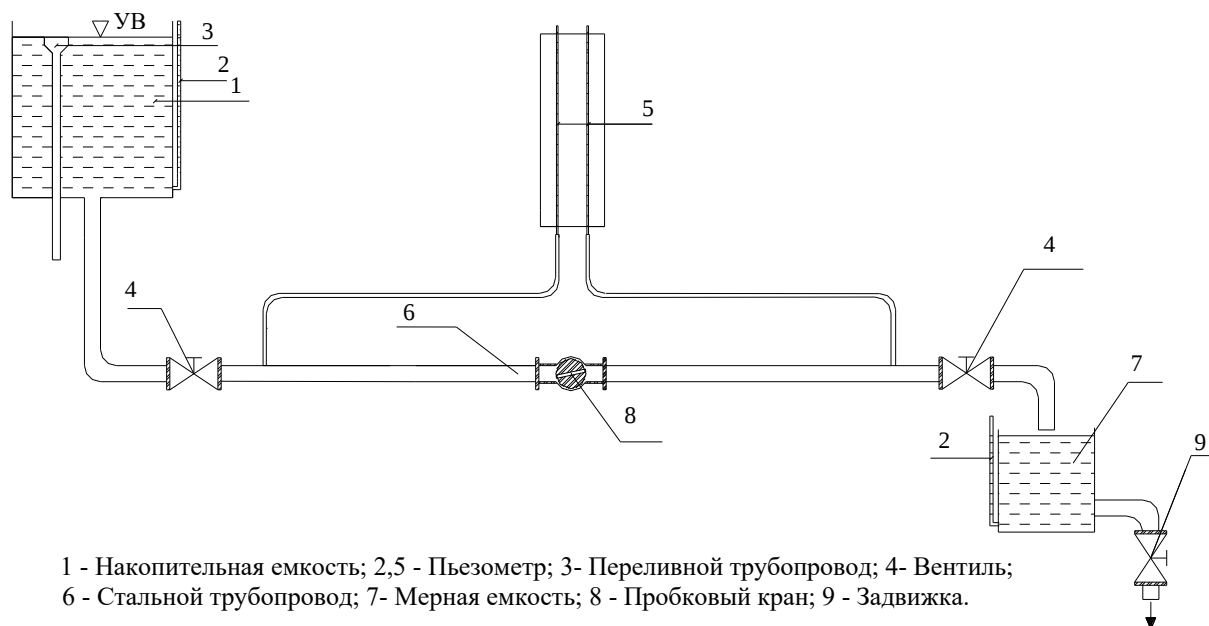


Рисунок 15.1 – Схема установки

4 ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

В напорной емкости 1 устанавливается постоянный уровень жидкости. Открывается вентиль 4 в конце трубопровода 6 при закрытой задвижке 9. При установившемся движении жидкости производятся соответственные измерения для заданной степени открытия крана 8. Показания давления за краном и перед краном снимаются с помощью пьезометров 5. Все измерения заносятся в таблицу 15.2.

5 ПОРЯДОК РАСЧЕТА

Все расчеты ведутся в табличной форме (таблице 15.2).

1. Потери напора определяются из выражения

$$h = h_1 - h_2 . \quad (15.4)$$

2. На рабочем участке трубопровода $D=20\text{мм}$, длиной $L=$ ____ м, определяются потери напора по длине для квадратичной области сопротивления по формуле

$$h_L = \lambda_{\text{кв}} \frac{L \cdot V^2}{D \cdot 2g} , \quad (15.5)$$

где $\lambda_{\text{кв}}$ – коэффициент гидравлического трения.

$$\lambda_{\text{кв}} = 0,11 \cdot \left(\frac{\Delta}{D} \right)^{0,25}, \quad (15.6)$$

где Δ – эквивалентная шероховатость трубопровода.

3. Местные потери напора вычисляются

$$h_m = h - h_L. \quad (15.7)$$

4. Коэффициент сопротивления крана при данной степени открытия (угол φ) определяется из формулы 15.3.

5. Производится сравнение опытных данных со справочными значениями сопротивления крана. Делается вывод.

Примечание. Угол открытия крана задается заранее и заносится в таблицу 15.2.

Таблица 15.2.- Порядок вычислений

Показатели	Степень открытия крана (угол φ , град).									
	5	10	15	20	25	30	40	50	60	При закрытом
Показание пьезометров, h_1 , м.										
h_2 , м.										
Объем жидкости W , м ³ .										
Время опыта τ , с.										
Расход воды Q , м ³ /с.										
Площадь живого сечения трубопровода ω , м ² .										
Средняя скорость V , м/с.										
Скоростной напор $\frac{V^2}{2 \cdot g}$, м										
Потери напора h , м.										
Коэффициент гидравлического трения по длине $\lambda_{\text{кв}}$										
Потеря напора по длине h_L , м										
Местная потеря напора h_m , м										
Коэффициент сопротивления крана ξ										
Справочные данные по коэффициенту сопротивления крана ξ										

Контрольные вопросы

1. По какой формуле производится расчет местных потерь напора.
2. Как рассчитываются потери напора по длине трубопровода.
3. От чего зависит сопротивление крана.
4. Какие различаются сопротивления в потоке вязкость жидкости.
5. Какие сопротивления встречаются в токе вязкость жидкости.
6. Как определяются коэффициенты местного сопротивления.