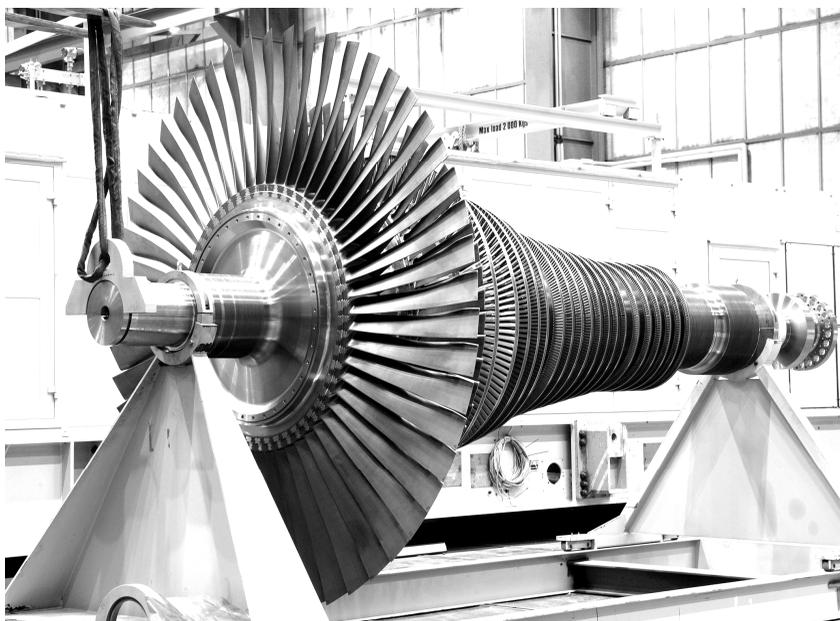


**МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО
СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ
УЗБЕКИСТАН**

**ТАШКЕНТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ ИСЛАМА КАРИМОВА**

ГИДРОГАЗОДИНАМИКА

**МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ
К ВЫПОЛНЕНИЮ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ**



ТАШКЕНТ 2019

УДК 532.5(075)

Гидрогазодинамика: Методические указания к лабораторным работам/ Мукольянц А.А., Эргашева Д.К.
- Ташкент.: ТашГТУ, 2019. - 73 с.

Методические указания предназначены для закрепления теоретических знаний, изложенных в лекционных курсах, и освоения студентами на лабораторных стендах основных законов гидрогазодинамики. Методические указания рассчитаны для студентов, изучающих курс «Гидрогазодинамика».

Печатаются по решению научно-методического совета Ташкентского государственного технического университета

Рецензенты: к.т.н., доц. Низамов О.Х. (ТашГТУ);
д.т.н., проф. Набиева И.А. (ТИТЛП).

© Ташкентский государственный технический университет,
2019

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ВЯЗКОСТИ ЖИДКОСТИ ПО МЕТОДУ СТОКСА

ЦЕЛЬ РАБОТЫ:

1. Определение коэффициента вязкости жидкости.

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Идеальная жидкость, т.е. жидкость, движущаяся без трения, является абстрактным понятием. Всем реальным жидкостям и газам в большей или меньшей степени присуща вязкость или внутреннее трение. Вязкость проявляется в том, что возникающее в жидкости или газе движение после прекращения действия причин, его вызвавших, постепенно прекращается.

Вязкость обусловлена наличием между отдельными частицами (молекулами) жидкости сил притяжения, которые при перемещении одной части жидкости относительно другой сдерживают движение слоёв. Очевидно, что все жидкости должны быть вязкими, так как между реальными молекулами всегда существуют силы не только притяжения, но и отталкивания. Равновесие между этими силами и определяет равновесное состояние жидкости. Если один из слоёв жидкости вывести из состояния равновесия и перемещать его с некоторой скоростью относительно другого, то силы притяжения частиц будут тормозить это движение.

При теоретическом описании вязкости жидкость рассматривают как непрерывную бесструктурную среду. В равновесном состоянии частицы (молекулы) будут располагаться таким образом, что равновесная сила (разность между силами притяжения и отталкивания) будет равна нулю. Если это не соблюдается, то молекулы будут перемещаться относительно друг друга до тех пор, пока вновь не наступит состояние равновесия. Если под

действием какой-либо силы жидкость привести в движение таким образом, что один из слоёв будет перемещаться с ускорением по отношению к соседнему слою, то между слоями возникнет сила трения, стремящаяся выровнять скорости движения слоёв и вернуть их в состояние равновесия.

Сила трения T прямо пропорциональна относительной скорости движения du и площади контакта слоёв S и обратно пропорциональна расстоянию между слоями dz (между центрами движущихся слоёв). Эта сила, направленная по касательной к слоям, называется **силой внутреннего трения**. Величина этой силы определяется законом Ньютона.

Для измерения вязкости (вискозиметрии) применяют ряд экспериментальных методов, основанных на различных принципах. Каждый из этих методов обладает особым диапазоном условий его применения.

Независимо от применяемого вискозиметрического метода для корректных измерений вязкости необходимо соблюдение следующих требований:

- 1) результат измерений не должен зависеть от линейных размеров рабочих элементов вискозиметра;
- 2) не должно иметь место пристеночное скольжение в жидкости;
- 3) поток жидкости в вискозиметре должен быть ламинарным.

Абсолютное измерение вязкости гарантируют капиллярный, ротационный методы и метод падающего шарика. В остальных случаях необходимо прибегать к помощи калибровочных жидкостей с известными значениями вязкости.

Если в вязкой жидкости, налитой в неподвижный сосуд, движется какое-либо тело определённой формы, то слой жидкости ММ, непосредственно соприкасающийся с поверхностью этого тела (рис.1.1), как бы прилипает к ней, т.е. увлекается ею с той же скоростью.

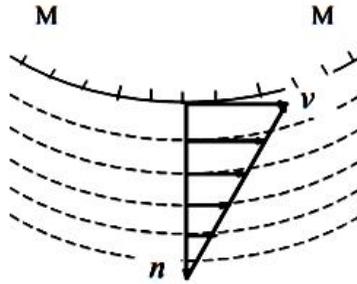


Рис.1.1. Схема к понятию вязкости

Более удалённые слои жидкости увлекаются предыдущими, но уже с меньшими скоростями, так как между смежными слоями жидкости существует вязкая, а не жесткая связь. Каждый следующий, более удалённый от ММ слой движется со скоростью, меньше предыдущей, и таким образом в жидкости возникает градиент скорости в направлении нормали n к границе ММ. Между слоями жидкости действуют силы внутреннего трения, препятствующие перемещению этого тела относительно жидкости.

Величина этих сил определяется законом Ньютона:

$$F = \mu S \frac{\Delta v}{\Delta n},$$

где S - площадь соприкосновения движущихся слоёв жидкости, m^2 ; μ - вязкость, или коэффициент внутреннего трения жидкости ($kg/m \cdot s$), равный силе, действующей на единицу поверхности слоя при градиенте скорости, равном единице, т.е. когда скорость слоя, отстоящего на единицу длины от данного, отличается от скорости последнего на единицу скорости.

Для шара, движущегося в жидкости, сила вязкого трения, действующего на него, вычислена Стоксом и при небольших скоростях оказалась равной

$$F_1 = -6\pi\eta r v.$$

Если шарик падает в жидкости, то кроме этой силы на него действуют ещё две:

сила тяжести $F_2 = \frac{4}{3}\pi r^3 \rho g$, и выталкивающая сила со

стороны жидкости $F_3 = \frac{4}{3}\pi r^3 \rho_0 g$,

где ρ - плотность материала шарика;

ρ_0 - плотность исследуемой жидкости;

g – ускорение свободного падения;

r - радиус шарика.

По второму закону Ньютона

$$\vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \vec{F}_3 = m \frac{d\vec{v}}{dt},$$

или в скалярной форме

$$\begin{aligned} m \frac{dv}{dt} &= F_1 + F_2 + F_3 = \frac{4}{3}\pi r^3 \rho g - \frac{4}{3}\pi r^3 \rho_0 g - 6\pi\eta r v = \\ &= \frac{4}{3}\pi r^3 g (\rho - \rho_0) - 6\pi\eta r v. \end{aligned}$$

Отсюда видно, что при $F_1 = -(F_2 + F_3)$, $\frac{dv}{dt} = 0$, т.е.

$v_1 = v_0 = \text{const}$, скорость движения шарика в жидкости будет

равномерной. Когда $v_1 < v_0$ и $\frac{dv}{dt} < 0$, шарик движется

замедленно до тех пор, пока не установится то же равенство:

$$v_1 = v_0.$$

Таким образом, при малых скоростях шарик движется ускоренно, а при больших – замедленно, так что по прохождении им некоторого расстояния в жидкости устанавливается равномерная скорость движения v_0 .

Принимая во внимание, что $v_0 = \frac{l}{t}$, где l - путь, проходимый шариком за время t при движении с постоянной скоростью, получим из формулы

$$\mu = \frac{g(\rho - \rho_0)}{18l} d^2 t,$$

где d - диаметр шарика.

ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

Прибор для измерения коэффициента внутреннего трения жидкости состоит из стеклянного цилиндрического сосуда (рис.1.2), в который налита исследуемая вязкая жидкость.

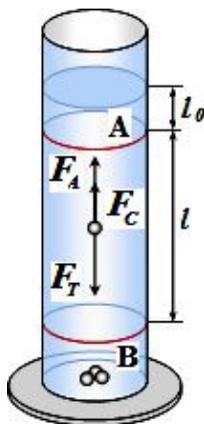


Рис.1.2. Лабораторная установка

На цилиндр надеты два кольца А и В, расстояние между которыми равно l . Верхнее кольцо расположено с таким расчетом, чтобы шарик, проходя мимо него, имел уже установившуюся скорость.

В качестве падающего тела используются шарики из различных материалов.

ИЗМЕРЕНИЯ И ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ

Приборы и принадлежности: цилиндрический сосуд с исследуемой жидкостью, штангенциркуль, секундомер, масштабная линейка, шарики.

1. Из справочных таблиц взять значения плотностей материала шарика ρ и исследуемой жидкости ρ_0 .

2. На установке отметить в 4-5 см ниже уровня жидкости точку А начала отсчета времени равномерного падения шарика. Задаться расстоянием l (около 70 см) и, отсчитав его вниз по движению шарика, отметить точку В, в которой будет заканчиваться измерение времени движения шарика.

3. Измерить диаметр шарика d микрометром, записать его значение в таблицу 1.1.

4. Опустить шарик в сосуд с жидкостью и измерить время его движения t с установившейся скоростью на расстоянии l между метками А и В. Измеренное время записать в таблицу.

Примечание: чтобы избежать прилипания к шарiku пузырьков воздуха, нарушающих проведение опыта, полезно его предварительно покатыть в пальцах, смоченных небольшим количеством исследуемой жидкости.

5. Формула может быть переписана в виде $\mu = cd^2t$,

кг/м·с, где $c = \frac{g(\rho - \rho_0)}{18l}$, кг/м³·с² – величина постоянная

для данной лабораторной работы, вычисляемая один раз для всех измерений.

6. Повторить несколько раз опыты по пунктам 4 и 5, заносая результаты измерений в таблицу.

7. Записать температуру, при которой производились измерения, в таблицу.

8. Обработать результаты измерений и сравнить полученное значение вязкости жидкости с табличным значением вязкости (табл. 1.2).

Таблица 1.1

№ опы та	Температура жидкости, $t^{\circ}\text{C}$	ρ , кг/м^3	ρ_0 , кг/м^3	d, м	c , $\text{кг/м}^3 \cdot \text{с}^2$	l, м	t, с	μ , $\text{кг/м} \cdot \text{с}$
1								
2								
3								

Таблица 1.2

Значения коэффициента вязкости μ для некоторых жидкостей

Жидкость	Коэффициент вязкости (кг/мс)		
	$t = 0^{\circ}\text{C}$	$t = 15^{\circ}\text{C}$	$t = 99^{\circ}\text{C}$
Вода	$1,8 \cdot 10^{-3}$	$1,1 \cdot 10^{-3}$	$0,29 \cdot 10^{-3}$
Ртуть	$1,7 \cdot 10^{-3}$	$1,6 \cdot 10^{-3}$	$1,2 \cdot 10^{-3}$
Эфир	$0,29 \cdot 10^{-3}$	$0,25 \cdot 10^{-3}$	—
Глицерин	4,6	1,5	—

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что характеризуют динамическая и кинематическая вязкости?
2. Как зависят от температуры вязкости большинства жидкостей?
3. Какие силы действуют на шарик, падающий в вязкой жидкости? Как эти силы связаны между собой в случае установившегося движения?
4. Напишите и поясните выражение для силы Стокса и силы Архимеда.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2

ИЗМЕРЕНИЕ ДАВЛЕНИЯ В ТОЧКЕ И ПОСТРОЕНИЕ ПЬЕЗОМЕТРИЧЕСКОЙ ПЛОСКОСТИ

ЦЕЛЬ РАБОТЫ:

1. Определение величины абсолютного и избыточного давления в точке.
2. Построение эпюры распределения гидростатического давления на стенку.
3. Построение пьезометрической плоскости или плоскости удельных потенциальных энергий.

КРАТКИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

Абсолютное гидростатическое давление в любой покоящейся жидкости определяется по основному уравнению гидростатики:

$$P = P_0 + \rho gh = P_0 + \gamma h \quad (2.1)$$

Распределение гидростатического давления по поверхности стенок можно представить эпюрой.

По формуле (2.1) видно, что давление изменяется по закону прямой линии, а эпюра давления представляет собой трапецию или треугольник.

Жидкость, находящаяся в покое или движении, обладает энергией, то есть способностью производить работу.

Покоящаяся жидкость обладает запасом потенциальной энергии.

Энергия, принадлежащая единице веса жидкости и вычисленная относительно плоскости сравнения «О-О», называется удельной потенциальной энергией или **пьезометрическим напором «H»**.

$$H = z + h_{изб} = z + \frac{P}{\gamma} \quad (2.2)$$

Пьезометрический напор «H» складывается из 2^x напоров:
z – геометрического напора (удельной энергии положения)

$h_{изб} = \frac{p}{\gamma}$ - **напора давления** (удельной энергии давления).

Эти напоры имеют размерность длины. С геометрической точки зрения пьезометрический напор « H » в точке по отношению к какой-либо горизонтальной плоскости сравнения « $O-O$ », представляет собой сумму двух линейных величин.

z – отметка данной точки относительно плоскости сравнения « $O-O$ »,

$h_{изб}$ – пьезометрической высоты, соответствующей данной точке.

Величина « H » для всех точек покоящейся жидкости одинакова. $H = \text{const}$ (по всему объему).

Плоскость, возвышающая над плоскостью сравнения на величину « H », называется **пьезометрической плоскостью**. Во всех точках покоящейся жидкости, пьезометрический напор является величиной постоянной.

ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

Установка (рис.2.1) представляет собой сосуд, заполненный водой. К точкам A и B присоединены пьезометры Π_1 и Π_2 , нуль шкалы пьезометров совмещён с уровнем жидкости дна сосуда.

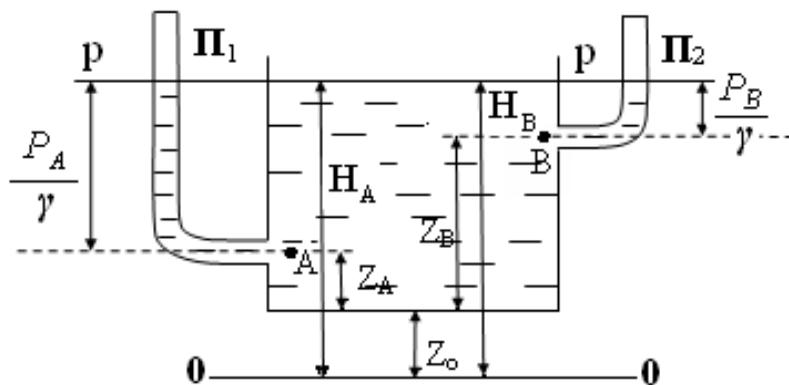


Рис. 2.1. Схема установки

$$H_A = (z_0 + z_A) + \frac{P_A}{\gamma} \quad (2.3)$$

$$H_B = (z_0 + z_B) + \frac{P_B}{\gamma} \quad (2.4)$$

$$H_A = H_B = H, \quad (2.5)$$

то есть в любой точке плоскости пьезометрический напор одинаков.

ПОРЯДОК ПРОВЕДЕНИЯ РАБОТЫ

1. Сосуд заполняется водой до определенного уровня. Пьезометрами Π_1 и Π_2 измеряем избыточное (весовое) давление в точках А и В. Результат замеров заносят в таблицу 2.1.
2. Определяем заглубления точек А и В относительно свободной поверхности.
3. Определяем положение плоскости сравнения «О-О».

ПОРЯДОК РАСЧЕТА

1. По таблице, зная температуру жидкости, находим её плотность ρ и определяем $\gamma = \rho g$.
2. Определяем величину избыточного (весового) давления в точках А и В.

$$P_{изб} = \gamma h. \quad (2.6)$$

3. Определяем величину абсолютного давления в точках А и В.
4. По данным расчетам строим эпюру, показывающую распределение гидростатического давления на одну из стенок сосуда.
5. Чтобы построить пьезометрическую плоскость необходимо:
 - а). на расстоянии Z от дна сосуда вертикально вниз расположить плоскость сравнения «О-О». Z_A и Z_B соответствуют геометрическим напорам в точках А и В относительно дна сосуда (рис.2.2 /образец/).

б) вертикально вверх от точек А и В откладываем показания пьезометров Π_1 и Π_2 .

По горизонтам жидкости в пьезометрах проводим плоскость Р-Р, которая будет горизонтальной. Эта пьезометрическая плоскость характеризует напор «Н» в любой точки плоскости покоящейся жидкости. Результаты заносятся в таблицу 2.2.

Таблица 2.1

Температура воды t, C^0	Плотность жидк. $\rho, \text{кг/м}^3$	Объемн. вес жидк. $\gamma = \rho g, \text{г/м}^3$	Заглубление (·) относительно свободной поверхности жидкости, $h, \text{см}$		Избыточное давление в точках, $\gamma h, \text{Па}$		Абсолютное давление в точках $P_{\text{абс}} = P + \gamma h, \text{Па}$	
			(·)А	(·)В	(·)А	(·)В	(·)А	(·)В
$t =$	$\rho =$	$\gamma = \rho g =$						

Таблица 2.2

Расстояние от дна сосуда до плоскости сравнения, см	Геометрический напор, см		Показания пьезометров $\frac{p}{\gamma}, \text{см}$		Потенциальный напор $H = z + \frac{p}{\gamma}, \text{см}$	
	Z_0	Z_A	(·)А	(·)В	(·)А	(·)В

$$H_A = (z_0 + z_A) + p_A / \gamma$$

$$H_B = (z_0 + z_B) + p_B / \gamma$$

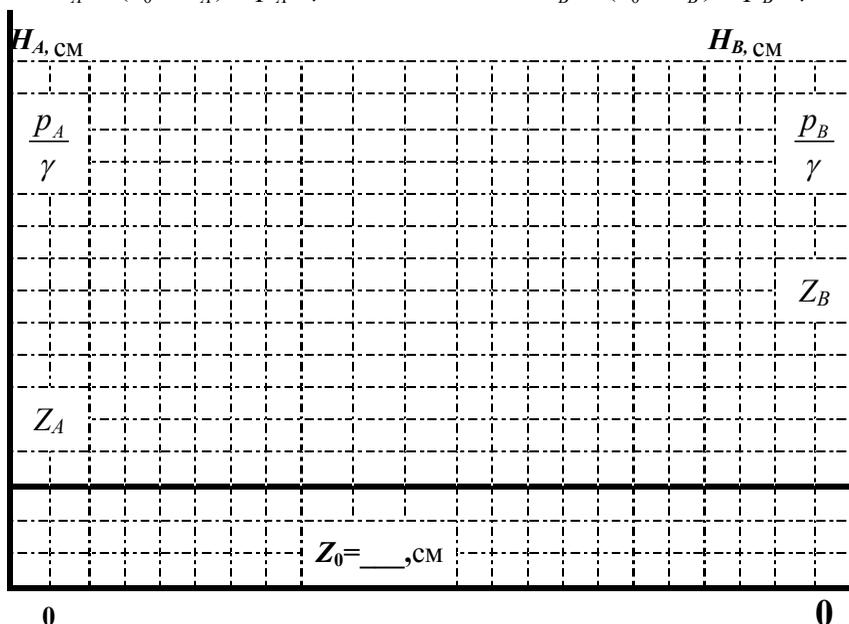


Рис. 2.2. Построение пьезометрической плоскости

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. *Какие силы действуют в жидкости при ее покое?*
2. *Основное уравнение гидростатики и характеристика каждого члена уравнения.*
3. *Характеристика эпюры распределения гидростатического давления на вертикальную стенку.*
4. *Пьезометрический напор и его характеристика.*

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3

ЗАКОН АРХИМЕДА. ГИДРОСТАТИЧЕСКОЕ ВЗВЕШИВАНИЕ

ЦЕЛЬ РАБОТЫ:

1. Измерение величины объёма вытесненной жидкости.
2. Определение силы Архимеда, действующей на погруженное в жидкость тело.
3. Проведение гидростатического взвешивания.
4. На примере определения плотности тела гидростатическим взвешиванием ознакомиться с методикой обработки результатов измерений и научиться пользоваться измерительными инструментами.

КРАТКИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

В основу определения плотности твердых тел методом гидростатического взвешивания положен закон Архимеда, который гласит: *на тело, погруженное в жидкость или газ, действует выталкивающая сила равная весу жидкости или газа вытесненной этим телом.*

На тело, погруженное в жидкость, действует выталкивающая сила, направленная вертикально вверх и равная весу жидкости в объёме V , вытесненном телом:

$$P = \rho g V.$$

Эта сила является результирующей сил давления жидкости на погруженное в неё тело. Она проходит через центр тяжести вытесненного объёма жидкости, который называется центром водоизмещения (на рис. 3.1 точка D).

Соотношение между весом тела G и выталкивающей силой P определяет три условия плавания:

$G > P$ - тело тонет;

$G < P$ - тело всплывает;

$G = P$ - тело плавает, причем тело плавает на свободной поверхности жидкости при частичном погружении его в жидкость и в подводном состоянии - при полном погружении.

Вес тела можно найти через плотность материала тела и его объем.

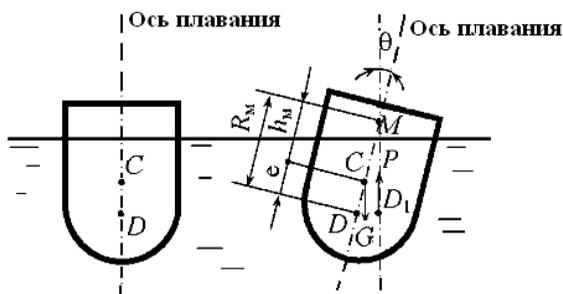


Рис. 3.1

ПОРЯДОК ПРОВЕДЕНИЯ РАБОТЫ

Метод определения плотности твердых тел состоит из двух взвешиваний: в воздухе и в воде (гидростатическое взвешивание).

Плотностью называется масса, заключенная в единице объема какого либо тела, поэтому определение плотности сводится к определению массы тела и его объема. Определение массы тела может быть произведено путем его взвешивания, т.е. путем сравнения с массой разновесок известной величины. Непосредственное измерение объема тела, если оно ограничено сложной поверхностью, затруднительно, поэтому поступают так: тело взвешивают в воде и, пользуясь законом Архимеда, определяют массу, объем. Плотность воды при соответствующей температуре берется из табличных данных (табл.3.1).

Таблица 3.1

Зависимость плотности воды от температуры

Температура $t, ^\circ\text{C}$	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Плотность $\rho, \text{кг/м}^3$	1000	1000	998	996	992	988	983	978	972	965	958

1. Наполнять водой переливной сосуд пока уровень жидкости h не будет точно находиться под сливной трубой (рис.3.2).
2. Поставить под сливной трубой **пустой** мерный стакан.
3. Взвесить три погружаемых тела из **алюминия, латуни и полиформальдегида** с помощью пружинных весов определив вес каждого тела $F_{\text{тела}}$ и записать в таблицу 3.2.
4. Относительно каждого тела:
 - **Полностью** погрузить подвешенное на пружинные весы тело в переливной сосуд.
 - Снять показания веса тела $F_{\text{тела}}$ в воде после погружения в воду и записать в таблицу.
5. Отсчитать объем перелившейся воды V и записать в таблицу.

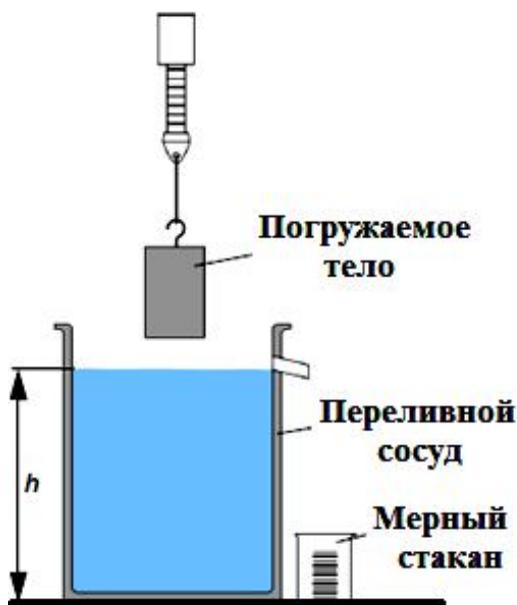


Рис. 3.2. Экспериментальная установка

Таблица 3.2

Результаты измерений записать в таблицу

П/П	Материал твёрдого тела	Вес тела, $F_{\text{тела}}$, Н.	Масса тела, гр.	Объём тела, см ³ .	Вес тела в воде, $F_{\text{тела в воде}}$, Н.	Сила Архимеда, Н	
1							
2							
3							

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЧИСЛЕННОГО ЗНАЧЕНИЯ ОПЫТА

Когда тело погружается в жидкость (рис.3.3), подъемная сила F_A оказывает воздействие на него, которое соответствует силе тяжести вытесненной жидкости:

$$F_A = \rho g V,$$

где F_A - подъёмная сила;

V - объём погруженного тела = объёму вытесненной воды;

ρ - плотность жидкости;

g - ускорение свободного падения

Подъемная сила F_A всегда направлена вверх и тем самым приводит к потере кажущегося веса погруженного тела

$$F_A = F_g - F_{gV}.$$

Данную потерю кажущегося веса погруженного тела $F_g - F_{gV}$, можно вычислить и сравнить с величиной F_A , полученной путем проведения опыта.

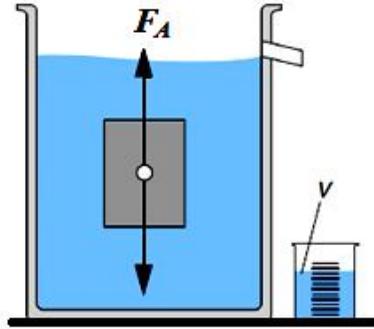


Рис. 3.3. Подъемная сила

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

- 1. Что такое плотность, единицы измерения плотности?*
- 2. Как формулируется закон Архимеда?*
- 3. В чем заключается сущность работы?*
- 4. Какое практическое значение имеют эти работы для вашей будущей деятельности?*

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМОВ ДВИЖЕНИЯ ЖИДКОСТИ НА ПРИБОРЕ РЕЙНОЛЬДСА

ЦЕЛЬ РАБОТЫ:

1. Визуальное наблюдение ламинарного и турбулентного режимов движения.
2. Определение значений числа Рейнольдса при ламинарном и турбулентном режимах движения.

КРАТКИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

Течение реальной жидкости характеризуется различными режимами ее движения, которые могут переходить один в другой при определенных условиях. Экспериментальные исследования гидравлических сопротивлений показывают, что потери напора (потери энергии) зависят от существующего в потоке режима движения.

Существование двух принципиально разных режимов движения жидкости было отмечено Г. Хагеном в 1839 и 1854 гг. В 1880 г. Д. И. Менделеев также высказал суждение о существовании двух режимов движения жидкости вследствие различия законов сопротивления движению. Позже английский физик О. Рейнольдс, а затем профессор Петербургского технологического института Н. П. Петров экспериментально подтвердили наличие двух режимов.

При изучении течения всевозможных капельных жидкостей с различными физическими свойствами Рейнольдс установил, что движение бывает **ламинарным** и **турбулентным**.

“Ламинарный” происходит от латинского слова *lamina* - слой. Ламинарным называется такой режим, когда поток жидкости движется отдельными струйками или слоями и траектории отдельных частиц между собой не пересекаются. В практике ламинарный режим имеет место при движении жидкостей с большой вязкостью (нефти, смазочных масел),

при движении воды через тонкие трубки, в трубопроводах при малых скоростях потока.

“Турбулентный” происходит от латинского слова *turbulentus* -беспорядочный. Турбулентным называется такой режим, когда струйчатость потока нарушается, все струйки перемешиваются, и траектории движущихся частиц приобретают сложную форму, пересекаясь между собой. Вследствие наличия в турбулентном потоке поперечных к направлению движения составляющих скорости, в жидкости происходит интенсивное перемешивание.

В инженерной практике при движении воды и других жидкостей малой вязкости (керосин, бензин, спирт и др.), в системах отопления, вентиляции, газоснабжения, теплоснабжения, водоснабжения чаще всего наблюдается турбулентный режим.

В 1883 г. Рейнольдс в результате экспериментальных исследований установил, что критерием режима движения жидкости является безразмерная величина, представляющая собой отношение произведения средней скорости потока v и характерного для рассматриваемого случая линейного размера l к кинематической вязкости жидкости ν .

Этот критерий называется числом Рейнольдса и обозначается Re :

$$Re = \frac{vd}{\nu},$$

где Re – безразмерный критерий, называемый числом Рейнольдса;

v - средняя скорость движения жидкости, см/с;

d – диаметр трубы, см;

ν - кинематический коэффициент вязкости, см²/с.

Значение числа Рейнольдса, при котором происходит переход от ламинарного режима к турбулентному, называется критическим числом Рейнольдса - $Re_{кр}$

При $Re \leq Re_{кр}$ режим движения является ламинарным, при $Re > Re_{кр}$ турбулентным.

В определённом диапазоне чисел Re существует неустойчивая область, где возможны оба режима в зависимости от характера изменения скоростей. Величина критического числа $Re_{кр}$ зависит от ряда обстоятельств: условий входа в трубу, шероховатости стенок трубы, отсутствия или наличия первоначальных возмущений и т.д. и может принимать в каждом отдельном случае различные значения.

Для круглых труб обычно принимают $Re_{кр} = 2320$. Скорость, при которой турбулентный режим переходит в ламинарный режим движения жидкости, называется критической скоростью.

При $Re \leq 2320$ – режим ламинарный.

При $Re > 2320$ – режим турбулентный.

ОПИСАНИЕ ОПЫТНОЙ УСТАНОВКИ

Опытная установка (рис. 4.1) состоит из напорного бака 1, в который по трубопроводу поступает вода из водонапорной сети. Для поддержания постоянного уровня воды в баке имеется водослив. Внутри бака установлены решётка, служащая для успокоения поступающей в него воды, и термометр для измерения температуры воды.

К баку 1 присоединена стеклянная трубка 4, в конце которой установлен кран 5 для регулирования скорости движения воды. Расход воды определяется с помощью мерного бака 6. Установка имеет небольшой бачок 2 для красителя с трубкой 7 и краником 3.

В опыте режим движения наблюдается в основной трубе 4 при введении в основной поток красителя. Изменение режима достигается путём регулирования расхода жидкости через трубу с помощью 5.

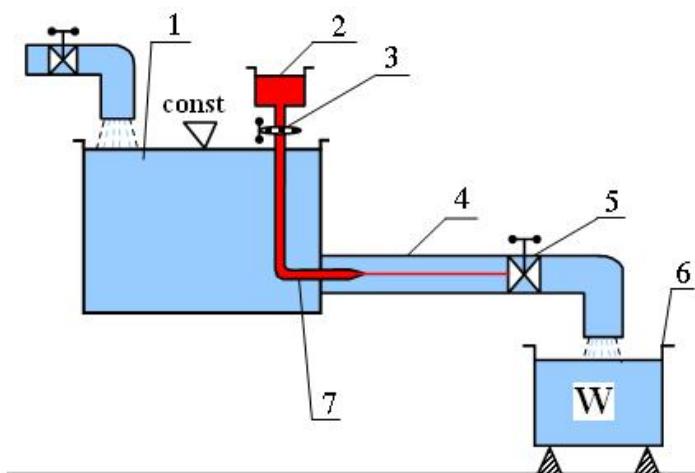


Рис. 4.1. Принципиальная схема опытной установки:

- 1- напорный бак; 2- сосуд для цветной жидкости; 3- краник;
 4- стеклянная труба ($d = 2,5\text{см}$); 5- регулировочный вентиль;
 6- мерный бак; 7- трубка с цветной жидкостью

ПОРЯДОК ПРОВЕДЕНИЯ ОПЫТОВ

1. При закрытых краниках 3 и 5 заполняют напорный бак 1 водой.
2. Незначительным открытием крана 5 устанавливают в трубе 4 расход жидкости, при котором имеет место медленное течение.
3. Приоткрыв кран 3, вводят в основной поток краситель. Наблюдают характер движения жидкости в стеклянной трубе. Струйчатое движение краски будет свидетельствовать о наличии ламинарного режима. Постепенно увеличивают открытие крана 5 и наблюдают изменение режима движения с увеличением скорости. Сначала подкрашенная струйка приобретает волнистый характер, и ламинарный режим становится неустойчивым. При дальнейшем увеличении скорости цветная струйка исчезает, вся жидкость равномерно окрашивается - ламинарный режим движения перешёл в турбулентный.

4. При установившемся движении определяется расход воды в трубе. Для каждого режима движения определяется объём поступившей в мерный бак воды W за время t , одновременно регистрируется температура воды.

ОБРАБОТКА ОПЫТНЫХ ДАННЫХ

1. Кинематический коэффициент вязкости воды ν определяют из таблицы 4.1. Для пресной воды зависимость кинематического коэффициента от температуры может быть определена также по формуле:

$$\nu = \frac{0,0178}{1 + 0,00337t + 0,000221t^2}, \quad (4.2)$$

где t – температура воды в $^{\circ}\text{C}$.

2. Расход воды: $Q = \frac{W}{t}$ ($\text{см}^3/\text{с}$),

где W - объём воды, см^3 ; t - время заполнения бака, с.

3. Средняя скорость жидкости $v = \frac{Q}{\omega}$ ($\text{см}/\text{с}$),

где ω - площадь живого сечения трубы, см^2

$$\omega = \frac{\pi d^2}{4} \quad (\text{см}^2)$$

d - диаметр стеклянной трубы, см. (2,5 см).

4. По известным d, v, ν вычисляется значение числа Рейнольдса

$$\text{Re} = \frac{vd}{\nu}.$$

Результаты измерений и вычислений заносятся в таблицу 4.2.

Таблица 4.1

Температура воды, °С	Кинематический коэффициент вязкости ν , см ² /с	Температура воды, °С	Кинематический коэффициент вязкости ν , см ² /с
0	0,0178	20	0,0100
5	0,0152	21	0,0098
10	0,0131	22	0,0096
11	0,0128	23	0,0094
12	0,0125	24	0,0092
13	0,0122	25	0,0090
14	0,0119	26	0,0088
15	0,0116	27	0,0086
16	0,0113	28	0,0084
17	0,0110	29	0,0082
18	0,0107	30	0,0080
19	0,0103	35	0,0073

Таблица 4.2

№	Данные измерений		Данные вычислений			Режим движения (вычисл.) лам./турб.	Постоянные величины $d = 2,5$ см $\nu =$
	W	t	Q	ν	Re		
	см ³	сек.	см ³	см/с			
<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>	<i>7</i>	<i>8</i>
1							
2							
3							

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Как определить режим движения жидкости?
2. Охарактеризуйте ламинарный и турбулентный режимы движения жидкости.
3. Для решения каких задач необходимо знать режим движения жидкости?
4. Как изменится скорость течения жидкости, если ламинарный режим движения жидкости перейдет в турбулентный, а температура жидкости останется постоянной?
5. Как изменится расход жидкости, если турбулентный режим движения жидкости перейдет в ламинарный, а температура жидкости останется постоянной?
6. Какая величина служит критерием для определения режима движения жидкости?
7. Как рассчитывается число Рейнольдса?
8. Как изменится число Рейнольдса, если температура жидкости увеличится?
9. От каких параметров зависит вязкость жидкости?
10. Как определяется в опыте расход и средняя скорость потока жидкости?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 5

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИЗУЧЕНИЕ УРАВНЕНИЯ БЕРНУЛЛИ ПОСТРОЕНИЕ ПЬЕЗОМЕТРИЧЕСКОЙ И НАПОРНОЙ ЛИНИЙ

ЦЕЛЬ РАБОТЫ:

1. Определение опытным путём значений потенциальной энергии (пьезометрического напора), удельной кинетической энергии (скоростного напора) и полной удельной энергии (гидродинамического напора) в различных сечениях потока.
2. Построение на основе опытных данных пьезометрической и напорной линий для трубопровода переменного сечения.

КРАТКИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

Уравнение Бернулли для установившегося потока реальной жидкости является частным случаем закона сохранения энергии.

Любой движущийся поток жидкости обладает определённой энергией. Эта энергия может быть проявлена в трёх формах: в виде энергии положения, энергии давления и кинетической энергии. Соотношение между отдельными видами энергии для движущегося потока устанавливается уравнением Бернулли.

Для потока реальной жидкости при установившемся движении уравнение Бернулли имеет следующий вид для двух произвольных сечений:

$$Z_1 + \frac{P_1}{\rho g} + \frac{\alpha_1 v_1^2}{2g} = Z_2 + \frac{P_2}{\rho g} + \frac{\alpha_2 v_2^2}{2g} + h_w \quad (5.1)$$

где Z_1 , Z_2 – вертикальные координаты центров тяжести сечений;

P , P_2 – давление в центрах тяжести;

v_1 , v_2 – средние скорости потока;

α_1 , α_2 – коэффициенты кинетической энергии, учитывающие неравномерности распределения скоростей по живому сечению потока.

В практических расчётах при турбулентном движении коэффициент кинетической энергии можно принимать равным $\alpha = 1,0 - 1,1$, для ламинарного режима $\alpha = 2,0$.

Первый член приведённого уравнения Z определяет высоту положения центра тяжести живого сечения потока над произвольной горизонтальной плоскостью сравнения 0-0 (рис.5.1) и называется **геометрической высотой** или **геометрическим напором**; он характеризует удельную потенциальную энергию положения.

Второй член $\frac{P}{\rho g}$ представляет собой высоту столба жидкости, соответствующую гидравлическому давлению в данной точке живого сечения потока и называется **пьезометрической высотой**, величина его характеризует удельную потенциальную энергию давления.

Сумма геометрической и пьезометрической высот $Z + \frac{P}{\rho g}$ называется **пьезометрическим напором**, величина которого определяет общий запас удельной кинетической энергии.

Третий член уравнения $\frac{\alpha v^2}{2g}$ называется **скоростным напором**, который определяет запас удельной кинетической энергии.

Сумма $Z + \frac{P}{\rho g} + \frac{\alpha v^2}{2g}$ представляет величину полной удельной энергии потока и называется **гидродинамическим напором H** .

Последний член в правой части уравнения h_w выражает **суммарную потерю напора** (энергии) на преодоление гидравлических сопротивлений при движении жидкости между рассматриваемыми сечениями. Изменение гидродинамического напора (полной энергии) в живых сечениях по длине потока относительно произвольно

выбранной плоскости сравнения характеризуется напорной линией. Напорная линия строится по сумме трёх членов уравнения Бернулли. Так как часть полной удельной энергии затрачивается на преодоление гидравлических сопротивлений, то напорная линия может только понижаться от сечения к сечению.

Для трубопровода постоянного сечения (рис.5.1) кинематические характеристики потока постоянны по его длине $\alpha_1 = \alpha_2$, $v_1 = v_2$, поэтому скоростной напор имеет одинаковую величину во всех сечениях $\frac{\alpha v^2}{2g} = \text{const}$.



Рис.5.1. Кинематические характеристики потока для трубопровода постоянного сечения

Тогда из уравнения Бернулли получим:

$$h_w = \left(Z_1 + \frac{P_1}{\rho g} \right) - \left(Z_2 + \frac{P_2}{\rho g} \right), \quad (5.2)$$

то есть потеря напора на трение равна уменьшению удельной потенциальной энергии (пьезометрического напора) потока и выражается перепадом пьезометрических уровней в начальном и конечном сечениях трубопровода.

Поскольку потери на трение пропорциональны длине участка, то напорная и пьезометрическая линии в этом случае представляют собой параллельные опускающиеся прямые.

В трубопроводе переменного сечения (рис.5.2) при движении жидкости происходит преобразование одного вида энергии жидкости в другой, которое сопровождается изменением скорости вдоль потока. Пьезометрическая линия в этом случае может понижаться (при увеличении скорости). Если живое сечение уменьшается по направлению движения, то кинетическая энергия растёт за счёт уменьшения потенциальной. И наоборот, если живое сечение потока увеличивается, то кинетическая энергия уменьшается, а потенциальная растёт.



Рис.5.2. Кинематические характеристики потока для трубопровода переменного сечения

ОПИСАНИЕ ОПЫТНОЙ УСТАНОВКИ

Опытная установка для изучения уравнения Бернулли (рис.5.3) состоит из напорного бака 2, заполняемого из водопроводной сети через кран 1, трубопровода с горизонтальной осью 3 переменного сечения с диаметрами D_1 , D_2 и D_3 и мерного бака 6. Постоянный горизонт воды в баке поддерживается с помощью водослива. Благодаря постоянству уровня в баке 2 движение жидкости в трубе будет установившимся. В шести характерных сечениях трубопровода установлены пьезометры 4, нуль шкалы которых совпадает с осью трубы. По показаниям пьезометров определяются пьезометрические напоры в сечениях I-VI. Регулирование расхода через трубу производится краном 5. Расход определяется объёмным способом по уровню воды в мерном баке.

ПОРЯДОК ПРОВЕДЕНИЯ ОПЫТОВ

1. Напорный бак 2 заполняется водой.
2. Проверяется отсутствие воздуха в пьезометрах.
3. При некотором открытии крана 5 добиваются установившегося движения жидкости в трубе, свидетельством чего является неизменность уровня воды в пьезометрах.
4. Для данного режима движения замеряют объём жидкости W , поступивший в мерный бак 6 за время опыта t .
5. Одновременно с замером объёма жидкости снимают показания пьезометров 4.
6. Результаты замеров заносятся в таблицу 5.1

Вертикальное расстояние Z от оси трубопровода до плоскости сравнения в расчётах принимают _____ м.

Постоянные величины:

$$D_1 = \text{___ см}, D_2 = \text{___ см}, D_3 = \text{___ см}, Z = \text{___ м}, \alpha = 1.$$

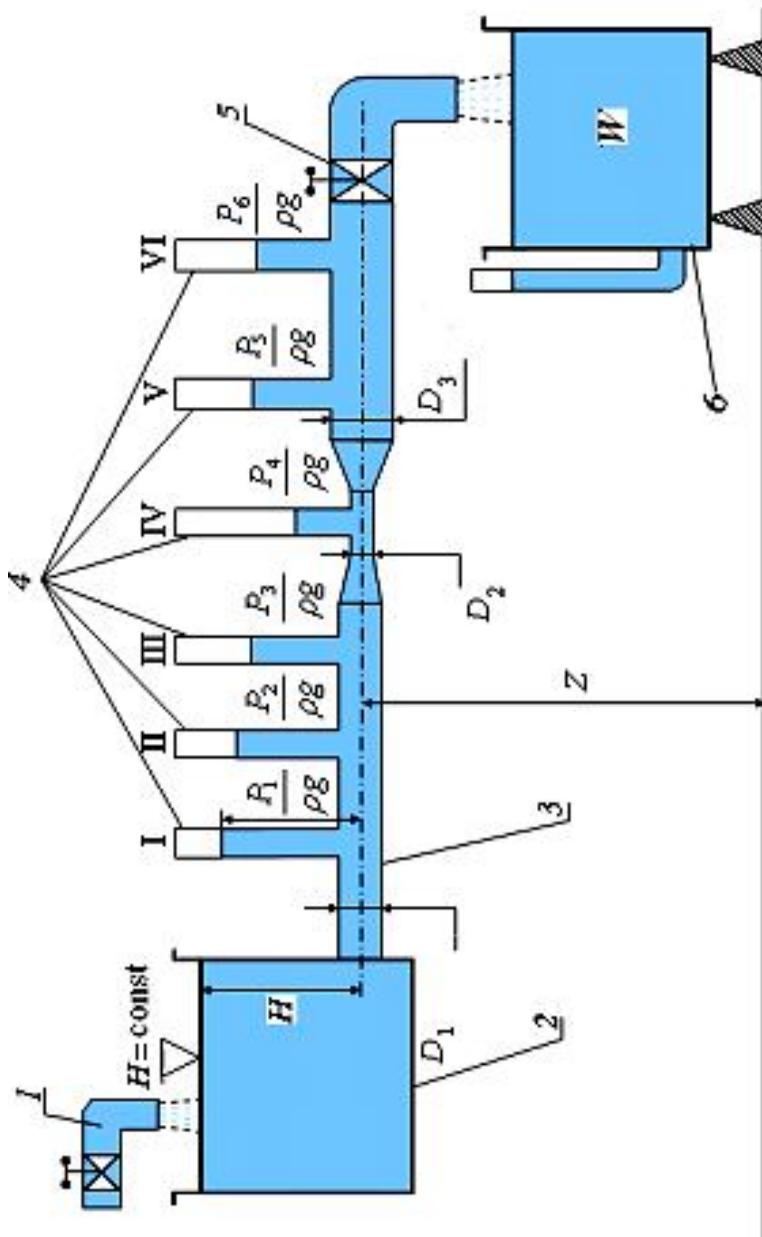


Рис.5.3.Схема установки для изучения уравнения Бернулли

Таблица 5.1

№	Показания пьезометров						W	t
	$\frac{P_1}{\rho g}$	$\frac{P_2}{\rho g}$	$\frac{P_3}{\rho g}$	$\frac{P_4}{\rho g}$	$\frac{P_5}{\rho g}$	$\frac{P_6}{\rho g}$		
	см	см	см	см	см	см		
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1								
2								
3								

Таблица 5.2

№	Показатели	Номера живых сечений					
		I	II	III	IV	V	VI
1.	Диаметр трубы d , см						
2.	Живое сечение ω , см ²						
3.	Средняя скорость v , см/с						
4.	Удельная кинетическая энергия $\alpha v^2/2g$, см						
5.	Удельная потенциальная энергия $z+p/\gamma$, см						
6.	Полная удельная энергия $z+p/\gamma+ \alpha v^2/2g$, см						
7.	Потери напора, h_w , см						

ОБРАБОТКА ОПЫТНЫХ ДАННЫХ

1. Расход жидкости определяется как $Q = \frac{W}{t}$ (см³/с). (5.3)

2. Расчет средних скоростей жидкости в каждом сечении трубопровода.

Так как диаметр трубопровода в I, II и III сечениях одинаков, то:

$$v_{1,2,3} = \frac{Q}{\omega_{1,2,3}} \text{ (см/с)}, \quad v_4 = \frac{Q}{\omega_4} \text{ (см/с)}, \quad v_{5,6} = \frac{Q}{\omega_{5,6}} \text{ (см/с)}, \quad (5.4)$$

где ω (см²) - площадь живого сечения трубопровода в соответствующем сечении:

$$\omega_{1,2,3} = \frac{\pi (d_{1,2,3})^2}{4}, \quad \omega_4 = \frac{\pi d_4^2}{4}, \quad \omega_{5,6} = \frac{\pi (d_{5,6})^2}{4}.$$

3. Удельная потенциальная энергия в каждом сечении рассчитывается как

$$E_n = Z + \frac{P}{\rho g} \text{ (см)},$$

где $Z = \underline{\hspace{2cm}}$ м, а $\frac{P}{\rho g}$ - показания пьезометров из таблицы 5.1 в соответствующих сечениях (см).

4. Удельная кинетическая энергия в каждом сечении рассчитывается как

$$E_k = \frac{\alpha v^2}{2g} \text{ (см)},$$

где $\alpha = 1$, а v рассчитывается по одной из формул (5.4).

5. Полная удельная энергия в каждом сечении рассчитывается как

$$Z + \frac{P}{\rho g} + \frac{\alpha v^2}{2g} \quad (\text{см}),$$

6. Потери энергии $h_w = E_1 - E_2$ рассчитываются, исходя из формулы (5.2), где E_1 – полная удельная энергия в I-ом сечении, E_2 – полная удельная энергия во II-ом сечении.
7. Результаты измерений заносят в таблицу 5.2.
8. **На миллиметровой бумаге вычерчивается схема трубопровода и на неё в масштабе наносится пьезометрическая и напорная линии (рис.5.4).**

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. *Какой физический закон выражает уравнение Бернулли?*
2. *В чём выражается физический смысл уравнения Бернулли?*
3. *Какова размерность членов уравнения Бернулли?
Как интерпретируются члены уравнения Бернулли с геометрической и энергетической точки зрения?*
4. *Что такое пьезометрический, скоростной и гидродинамический напор? Как они изменяются по длине (вдоль направления движения)?*
5. *Как строятся пьезометрическая и напорная линии?*
6. *Как определяются в опыте расход и средняя скорость движения жидкости?*
7. *Что такое удельная энергия?*
8. *Как определяются в опыте члены уравнения Бернулли?*

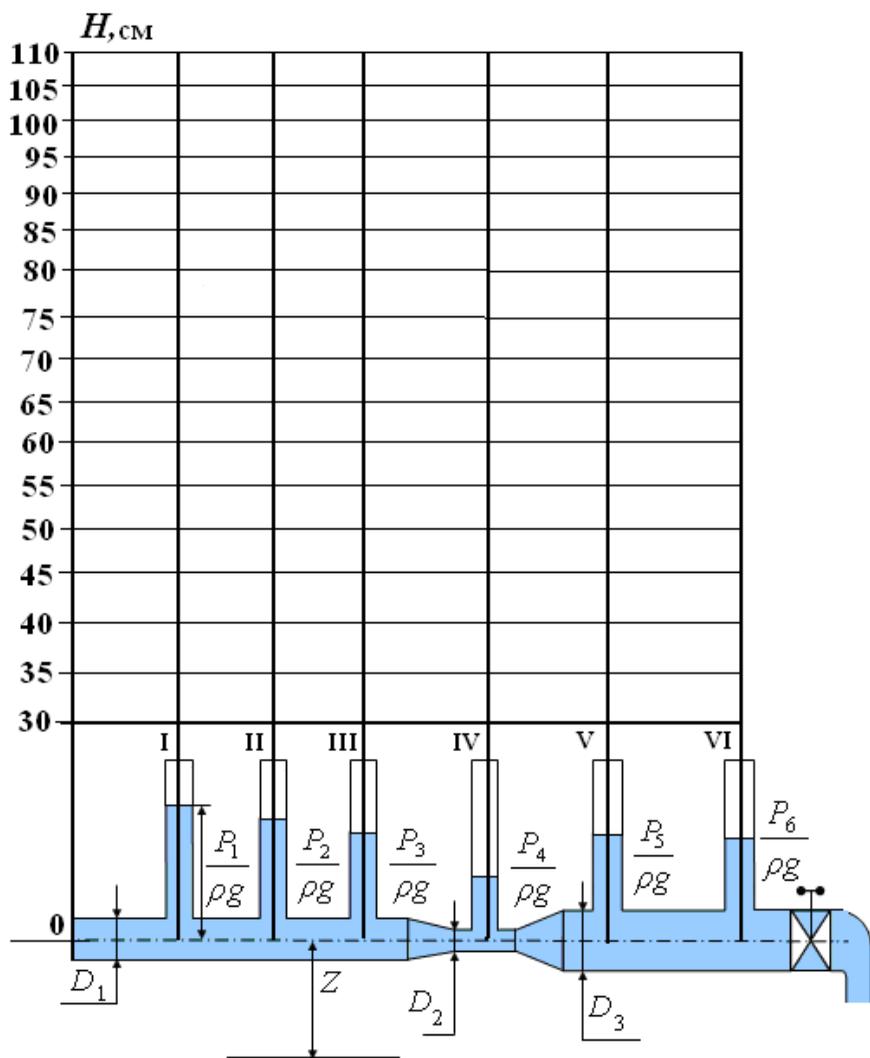


Рис.5.4. Схема построения на основе опытных данных пьезометрической и напорной линий для трубопровода переменного сечения.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 6

РАСЧЕТ РАСХОДА ЖИДКОСТИ НА ПРИБОРЕ ВЕНТУРИ

ЦЕЛЬ РАБОТЫ:

1. Освоение методики измерения расхода воды трубой Вентури.
2. Тарировка расходомера и построение тарировочного графика.

КРАТКИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

Для измерения расхода жидкости (газа), равномерно движущегося в напорном трубопроводе, используют специальные устройства-сопла, диафрагмы, трубы Вентури.

Применение этих устройств основано на существовании определённой зависимости между перепадом давления (создаваемым в потоке в результате сужения проходного сечения трубы) и расходом жидкости. Для каждого конкретного сужающего устройства эта зависимость может быть найдена из основных уравнений гидравлики: уравнения Бернулли и уравнения неразрывности потока.

Расходомер Вентури представляет собой трубу переменного сечения, состоящую из двух участков плавно сужающегося и постепенно расширяющегося.

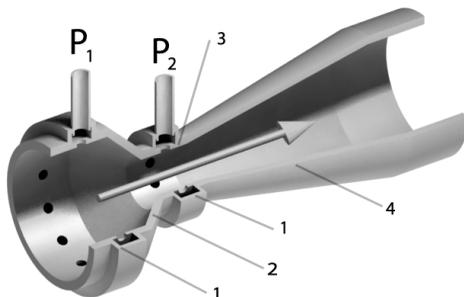


Рис.6.1. Трубка Вентури

- 1 - кольцевые усредняющие камеры;
- 2 - конфузор;
- 3 - горловина;
- 4 - диффузор

Действие прибора основано на зависимости перепада давления между широким и узким сечениями от проходящего через них расхода жидкости, которая может быть установлена на основании уравнения Бернулли, записанного для сечений 1-1 и 2-2 (рис.6.1):

$$Z_1 + \frac{P_1}{\rho g} + \frac{\alpha_1 v_1^2}{2g} = Z_2 + \frac{P_2}{\rho g} + \frac{\alpha_2 v_2^2}{2g} + h_w \quad (6.1)$$

где Z_1, Z_2 – вертикальные координаты центров тяжести сечений;

P_1, P_2 – давление в центрах тяжести;

v_1, v_2 – средние скорости потока;

α_1, α_2 – коэффициенты кинетической энергии, учитывающие неравномерности распределения скоростей по живому сечению потока.

Первое сечение располагается перед входом в сужающее устройство, где наблюдается еще медленно изменяющееся движение; второе сечение проходит в месте наибольшего сжатия потока.

Скорость потока в суженном месте возрастает, а давление падает. Возникает разность (перепад) давлений, которая измеряется парой пьезометров, устанавливаемых в начале конуса и на цилиндрическом участке.

Определение коэффициента расхода теоретическим путем затруднено в связи со сложностью определения величин α_1, α_2, h_w , поэтому используют экспериментальный метод, применяя расчетную формулу для расхода воды через расходомер:

Теоретический расход жидкости в трубопроводе может быть определён по формуле:

$$Q = v_4 \omega_4 = \sqrt{\frac{2g\Delta h}{1 - \left(\frac{\omega_4}{\omega_3}\right)^2}} \cdot \omega_4, \quad (6.2)$$

где
$$\Delta h = \frac{P_3}{\rho g} - \frac{P_4}{\rho g}, \quad \text{или} \quad Q = C\sqrt{\Delta h}, \quad (6.3)$$

где C -величина, постоянная для данного расходомера и равная

$$C = \frac{\sqrt{2g}}{\sqrt{1 - \left(\frac{\omega_4}{\omega_3}\right)^2}} \cdot \omega_4 \quad (6.4)$$

Зная величину C и наблюдая за показаниями пьезометров, можно определить расход в трубопроводе для любого момента времени по формуле:

$$Q = C\sqrt{\Delta h} \quad (6.5)$$

Для стандартных расходомеров коэффициенты сопротивлений и постоянные расходомеров приводятся в специальных справочниках.

Константу C также можно подсчитать теоретически, но точнее она определяется из эксперимента, т. е. в результате тарировки расходомера.

При тарировании результаты опытов удобно представить в виде графика зависимости $\Delta h = f(Q)$.

В этом случае можно определять расход непосредственно по графику, не прибегая к расчётам.

ОПИСАНИЕ ОПЫТНОЙ УСТАНОВКИ

Установка (рис.6.1) включает: напорный бак 1, трубопровод 2, в конце которого установлен кран 5, мерный бак 6. В средней части трубопровода смонтирована труба Вентури. Для замера перепада давления к расходомеру присоединены пьезометры 3 и 4. Постоянный напор в баке поддерживается с помощью водослива.

ПОРЯДОК ПРОВЕДЕНИЯ ОПЫТОВ

1. Напорный бак 1 заполняется водой.
2. Проверяется отсутствие воздуха в пьезометрах.
3. С помощью вентиля 5 в трубопроводе устанавливаются разные расходы воды и для каждого опыта замеряются показания пьезометров.

$$h_3 = \frac{P_3}{\rho g}, \quad h_4 = \frac{P_4}{\rho g} .$$

Всего проводят не менее 4 замеров.

4. Одновременно определяется количество поступившей в мерный бак воды W за время опыта t
Данные измерений заносятся в таблицу 6.1.

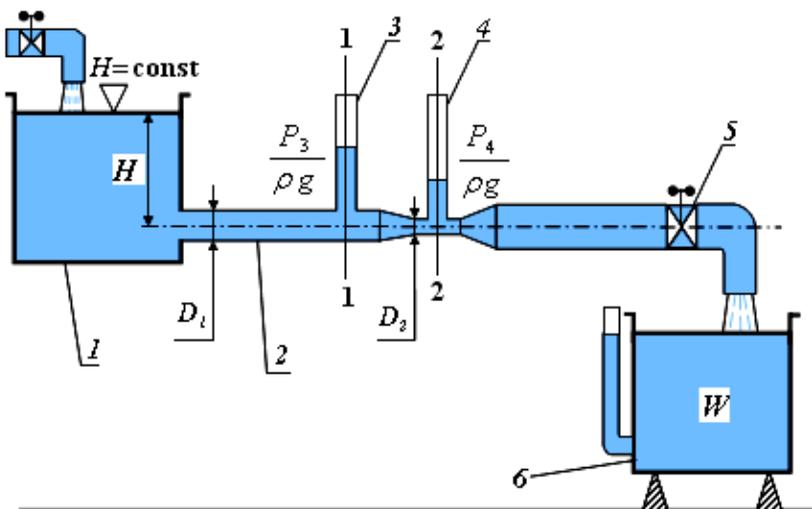


Рис. 6.1. Принципиальная схема опытной установки

ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ОПЫТОВ

1. Вычисляется действительный расход жидкости

$$Q = \frac{W}{t}, \quad (\text{см}^3/\text{с})$$

2. Определяется разность показаний пьезометров 3 и 4

$$\Delta h = h_3 - h_4.$$

3. Вычисляется постоянная расходомера $C = \frac{Q}{\sqrt{\Delta h}}$.

Результаты вычислений заносятся в таблицу 6.1.

Таблица 6.1

№	Данные измерений				Расчёты			
	W	t	h ₃	h ₄	Q	Δh	C	C _{ср}
	см ³	с	см	см	см ³ /с	см	см ^{2,5} /с	см ^{2,5} /с
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Номер опыта	Объём воды	Время	Показание пьезометра в сечении 1	Показание пьезометра в сечении 2	Расход воды	Разность показаний пьезометров	Постоянная расходомера	Среднее значение постоянной расходомера
1								
2								
3								

4. По результатам опытов строится тарировочная кривая $Q = f(\Delta h)$, которая может быть использована для определения расходов жидкости, протекающей по расходомеру (рис.6.2).

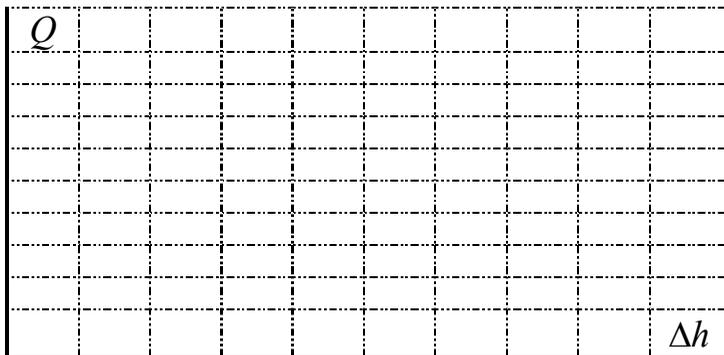


Рис.6.2. График для построения тарировочной кривой

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какой принцип использован для применения местного сопротивления в качестве водомера?
2. На основании каких уравнений гидравлики производится вывод формулы расхода водомера Вентури?
3. Как определяется теоретическая постоянная водомера?
4. Как определяется постоянная водомера опытным путём?
5. Для каких целей строится тарировочная характеристика водомера?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 7

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ГИДРАВЛИЧЕСКОГО ТРЕНИЯ ПО ДЛИНЕ ТРУБОПРОВОДА

ЦЕЛЬ РАБОТЫ:

1. Определение опытным путём коэффициента гидравлического трения λ для различных режимов движения жидкости.
2. Определение области сопротивления, выбор расчётных формул для вычисления величины коэффициентов гидравлического трения в зависимости от режима движения жидкости.
3. Сравнение результатов экспериментального определения коэффициентов гидравлического трения с вычисленными по расчётным формулам.

КРАТКИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

Равномерно движущийся в трубе поток жидкости теряет часть энергии вследствие трения о поверхность трубы, а также внутреннего трения в самой жидкости. Эти потери носят название потерь напора на трение по длине потока.

В соответствии с уравнением Бернулли потери напора по длине определяются, как разность полных удельных энергий в двух сечениях рассматриваемого участка трубопровода и для горизонтальной трубы постоянного диаметра могут быть выражены в виде:

$$h_l = \frac{P_1}{\rho g} - \frac{P_2}{\rho g} \quad (7.1)$$

где $\frac{P_1}{\rho g}$ и $\frac{P_2}{\rho g}$ - пьезометрические напоры в соответствующих сечениях потока.

Уравнение (7.1) является основным при опытном определении потерь напора на трение.

Для теоретического расчёта потерь напора на трение при движении жидкости по трубам пользуются формулой Дарси-Вейсбаха:

$$h_l = \lambda \cdot \frac{l}{d} \cdot \frac{v^2}{2g} \quad (7.2)$$

где λ – коэффициент гидравлического трения;

v – средняя скорость движения жидкости;

L – длина трубопровода;

d – диаметр трубопровода;

g – ускорение свободного падения, $g = 9,81 \text{ м/с}^2$.

Формула (7.2) справедлива для различных режимов движения жидкости. Однако значения коэффициентов λ для ламинарного и турбулентного режимов будут различны и в общем случае λ будет также зависеть от относительной шероховатости стенок трубы, то есть

$$\lambda = f\left(\text{Re}, \frac{\Delta}{d}\right), \quad (7.3)$$

где Δ – абсолютный размер выступов шероховатости.

Коэффициент λ определяется на основе опытных данных или по известным эмпирическим зависимостям. Опытом установлено, что при ламинарном течении шероховатость не оказывает влияния на сопротивление движению. Коэффициент λ в этом случае зависит только от числа Рейнольдса и может быть вычислен по формуле:

$$\lambda = \frac{64}{\text{Re}} \quad (7.4)$$

Потери напора при ламинарном потоке пропорциональны скорости в первой степени:

$$h = k \cdot v.$$

Для турбулентного движения жидкости, ввиду сложности его структуры, расчетные формулы для λ могут быть получены лишь полуэмпирическим путем. Из многочисленных опытов было установлено, что свойства турбулентного потока (распределение скоростей по сечению, коэффициент гидравлического сопротивления и др.) зависят от числа Re и относительной шероховатости.

Измерения показывают, что распределение скоростей по сечению имеет два значительно различающихся участка.

Согласно наиболее распространенной гипотезе Прандтля, турбулентный поток состоит из ядра течения A , вязкого (ламинарного) подслоя C и переходного участка между ними B (рис. 7.1).

В турбулентном ядре A , благодаря интенсивному поперечному перемешиванию частиц, изменение скорости по радиусу трубы незначительно, и вся жидкость движется со скоростью, близкой к средней. В ламинарном подслое C происходит резкое падение скоростей до нулевого значения на стенке.

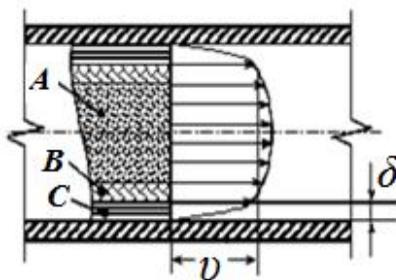


Рис. 5.1. Структура потока: A – ядро течения;
 B – переходный участок;
 C – ламинарный подслой толщиной δ ;
 v – средняя скорость течения.

В турбулентном потоке у стенок образуется тонкий слой жидкости с ламинарным режимом. Основная масса жидкости (ядро потока), в котором движение турбулентное, связано с

этим слоем переходной зоной. Совокупность ламинарного слоя и переходной зоны называют пограничным слоем. Толщина пограничного слоя измеряется долями мм, обозначается δ и зависит от числа Рейнольдса..

Пока средняя величина выступов, образующих шероховатости поверхности трубы (абсолютная эквивалентная шероховатость Δ , меньше толщины пограничного слоя $\Delta < \delta$), турбулентный поток не входит в непосредственный контакт с выступами, шероховатость не влияет на величину потерь напора. Такие поверхности называются гидравлически гладкими.

С увеличением числа Re толщина пограничного слоя уменьшается и становится меньше выступов шероховатости ($\Delta > \delta$). Выступы входят в турбулентное ядро потока и увеличивают потери напора. Такие поверхности называют гидравлически шероховатыми.

Для характеристики влияния шероховатости на величину потерь вводится понятие эквивалентной относительной шероховатости

$$\bar{\Delta} = \frac{\Delta}{d},$$

где d – диаметр трубы.

Зависимость коэффициента гидравлического трения от шероховатости и числа Re для труб с естественной шероховатостью (технические трубы) представлена на рис 7.2 (график Никурадзе).

Первая зона – зона ламинарного режима, она представлена прямой 1-2-3 (формула 5.4).

Вторая зона – является зоной неустойчивого режима. Здесь числа Рейнольдса лежат в пределах от 1000-2300 до 4000.

Третья зона – зона турбулентного режима. Эта зона располагается правее вертикали C , отвечающей $Re = 4000$. Данная зона в свою очередь разбивается на три области сопротивления:

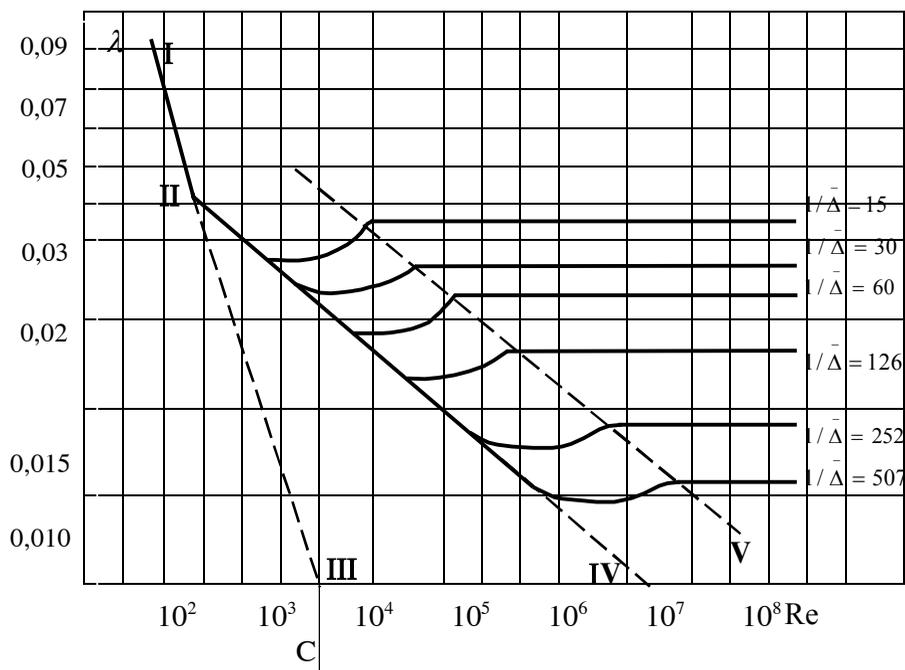


Рис 7.2.График Никурадзе

1. Область гидравлически гладких труб – прямая с постепенным переходом в кривую для $Re = 10^5$. На графике располагается между линиями III и IV. В этой области λ - зависит только от числа Рейнольдса и определяется по формуле Блазиуса:

$$\lambda = \frac{0,3164}{Re^{0,25}} \quad (7.5)$$

2. Область докватратичного сопротивления на графике располагается между линиями IV и V. Для определения λ используется формула Альтшуля:

$$\lambda = 0,11 \left(\frac{\bar{\Delta}}{\Delta} + \frac{68}{Re} \right)^{0,25} \quad (7.6)$$

3. Область квадратичного сопротивления (автомодельная).
 На графики эта область располагается правее линии V.

В этой области потери напора на трение пропорциональны $\bar{\Delta}$ и коэффициент гидравлического трения вычисляется по формуле Шифринсона:

$$\lambda = 0,11 (\bar{\Delta})^{0,25} \quad (7.7)$$

Всё изложенное выше удобно обобщить в таблице 7.1.

Таблица 7.1.

Режим	Турбулентный		
	Гидравличе- ки гладкие трубы	Область доквадратичного сопротивления	Область квадратичного сопротивления
Общая зависи- мость коэффиц. гидравли- ческого трения	$\lambda = f(Re)$	$\lambda = f(Re, \bar{\Delta})$	$\lambda = f(\bar{\Delta})$
Критерий определе- ния области сопротив- ления	$Re < Re_{кр} = \frac{20}{\bar{\Delta}}$	$Re'_{кр} < Re < Re''_{кр}$	$Re > Re_{кр} = \frac{500}{\bar{\Delta}}$
Пример расчётной формулы	$\lambda = \frac{0,3164}{Re^{0,25}}$	$\lambda = 0,11 \left(\bar{\Delta} + \frac{68}{Re} \right)^{0,25}$	$\lambda = 0,11 (\bar{\Delta})^{0,25}$

ОПИСАНИЕ ОПЫТНОЙ УСТАНОВКИ

Опытная установка (рис. 7.3) состоит из бака 1, от которого отходит трубопровод 2 диаметром $d = 1,5$ см. Трубопровод имеет прямолинейный участок длиной $L = 50$ см. В начале и конце участка установлены пьезометры 3.

В баке установлен водослив, поддерживающий постоянный напор. В конце трубы установлен мерный бак 5. Регулирование расхода воды производится краном 4.

ПОРЯДОК ПРОВЕДЕНИЯ ОПЫТОВ

1. Напорный бак заполняется водой постоянного уровня.
2. Открытием вентиля 4 в трубопроводе устанавливается режим течения, соответствующий минимальному в опыте расходу жидкости.
Рекомендуется провести опыт не менее трёх раз при разных открытиях крана 4.
3. Для каждого режима определяются:
 - а). Объём жидкости, поступивший в мерный бак W за время опыта t .
 - б). Показания пьезометров h_1 и h_2 .

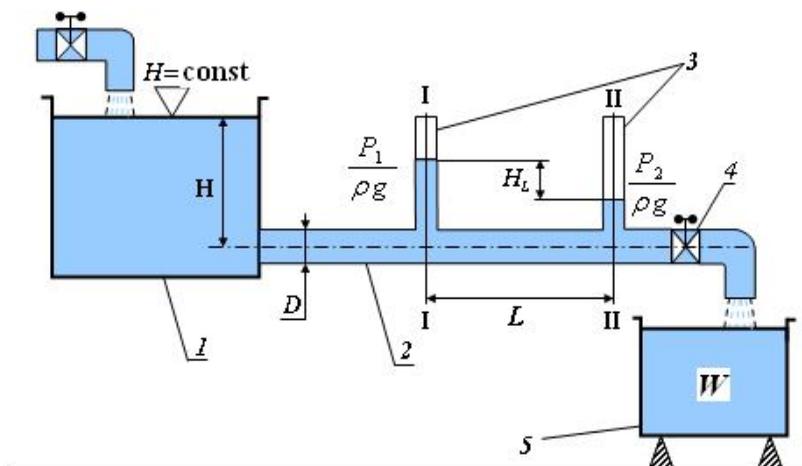


Рис. 7.3. Принципиальная схема опытной установки

ОБРАБОТКА ОПЫТНЫХ ДАННЫХ

1. Потери напора на выделенном участке определяется из уравнения Бернулли, составленного для сечений I-I и II-II.

$$Z_1 + \frac{P_1}{\rho g} + \frac{\alpha_1 v_1^2}{2g} = Z_2 + \frac{P_2}{\rho g} + \frac{\alpha_2 v_2^2}{2g} + h_e$$

т.к. $Z_1 = Z_2$, $v_1 = v_2$, $h_e = \frac{P_1}{\rho g} - \frac{P_2}{\rho g}$.

2. Расход и скорость (средняя) движения жидкости в трубопроводе

$$Q = \frac{V}{t} \quad (\text{см}^3/\text{с}), \quad v = \frac{Q}{\omega} \quad (\text{см}/\text{с}).$$

3. Для определения коэффициента сопротивления λ применяется **формула Дарси-Вейсбаха**:

$$\lambda = h_e \frac{d}{l} \cdot \frac{2g}{v^2}.$$

4. Для определения области сопротивления подсчитываются числа Рейнольдса

$$\text{Re} = \frac{v d}{\nu}.$$

5. В зависимости от области сопротивления выбирается формула для определения теоретического значения коэффициента гидравлического трения по длине трубопровода.

6. Результаты замеров и расчётов заносятся в таблицу 7.2.

Таблица 7.2.

№	Определение потерь напора по длине			Определение средней скорости				Определение коэффициента гидравлического трения		
	$\frac{P_1}{\rho g}$	$\frac{P_2}{\rho g}$	h_e	W	t	Q	v	λ опыт.	Re	λ теор.
	см	см	см	см ³	с	см ³ /с	см/с	-	-	-
<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>	<i>7</i>	<i>8</i>	<i>9</i>	<i>10</i>	<i>11</i>
1										
2										
3										

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. *Охарактеризуйте каждую область сопротивления движения жидкости.*
2. *Как определяется потеря напора по длине трубопровода в опыте и теоретически?*
3. *Как определяются опытные и теоретические значения коэффициента гидравлического трения?*
4. *Как определяется в опыте расход и средняя скорость потока?*

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 8

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТОВ МЕСТНЫХ СОПРОТИВЛЕНИЙ

ЦЕЛЬ РАБОТЫ:

1. Определить опытным путём значения коэффициентов местных сопротивлений.
2. Сравнить полученные значения коэффициентов с результатами вычислений по теоретическим формулам или приведёнными в справочниках.

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Одним из важнейших вопросов прикладной гидравлики является определение потерь энергии при движении жидкостей. Частным случаем потери энергии при движении жидкости по трубопроводу является потеря энергии в местных сопротивлениях.

Местные гидравлические сопротивления - это такие элементы трубопроводов, в которых вследствие изменения размеров или конфигурации русла происходят изменение скорости потока, отрыв транзитной струи от стенок русла и возникают вихреобразования. Чаще всего - это различная запорная арматура (краны, задвижки и т.д.), расширение и сужение сечений потока, повороты, колена и др.

Потери энергии в конечном счёте обусловлены вязкостью жидкости, а следовательно, теряемая механическая энергия рассеивается и переходит в тепловую.

Для вычисления потерь напора, вызванных местными сопротивлениями, используют формулу

$$h_M = \xi \frac{v^2}{2g}, \quad (8.1)$$

где h_M - потери напора на местное сопротивление, см;
 v - средняя скорость движения потока, см/с;
 ξ - коэффициент местного сопротивления.

Коэффициент местного сопротивления существенно зависит от вида местного сопротивления, его геометрической формы, скорости течения жидкости, её плотности, вязкости, а также от диаметра трубы, по которой движется поток. Этот коэффициент обычно определяют опытным путём.

1. Для резкого расширения потока (рис. 8.1.а.) величина потерь напора может быть получена теоретически по формуле Борда:

$$h_{p.p.} = \frac{(v_d - v_D)^2}{2g}, \quad (8.2)$$

где $h_{p.p.}$ - потери напора при резком расширении, см;

v_d - средняя скорость движения жидкости до расширения,

v_D - средняя скорость движения жидкости после расширения, см/с;

После преобразования эта формула имеет вид:

$$h_{p.p.} = \xi_{p.p.} \frac{v^2}{2g},$$

где $\xi_{p.p.} = \left(\frac{\omega_d}{\omega_D} - 1 \right)^2$;

ω_d - площадь живого сечения до расширения, см²;

ω_D - площадь живого сечения после расширения, см^2 .

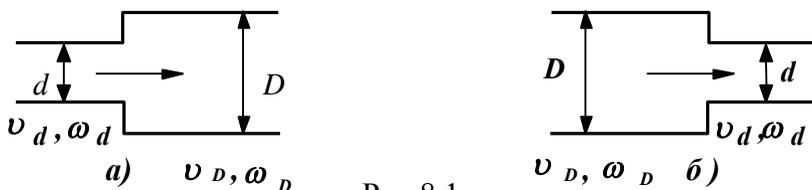


Рис.8.1.

2. Для резкого сужения потока (рис. 8.1.б.)

$$h_{p.c.} = \xi_{p.c.} \frac{v^2}{2g}.$$

Значения коэффициента местного сопротивления при резком сужении теоретически определяется по формуле

$$\xi_{p.c.} = 0,5 \left(1 - \frac{\omega_D}{\omega_d} \right).$$

3. Для пробкового крана коэффициент местного сопротивления зависит от его конструкции и степени открытия. Значения коэффициентов $\xi_{кр}$ в зависимости от угла поворота пробкового крана приведены в таблице 8.1.

Таблица 8.1

Угол поворота, град.	5	10	20	30	40	50	60	65
коэф. сопр.	0,05	0,0029	1,56	5,47	17,3	52,6	206	485

ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

Опытная установка (рис. 8.2) состоит из бака 1, от которого отходит труба 2. Уровень воды в баке поддерживается постоянным с помощью водослива. На

трубопроводе находятся местные сопротивления в виде резкого сужения, резкого расширения. До и после каждого местного сопротивления установлены пьезометры I, II, III, IV. В конце трубы устанавливается мерный бак 4.

ПОРЯДОК ПРОВЕДЕНИЯ ОПЫТОВ

При открытии крана 3 устанавливают расход жидкости в трубопроводе. По достижении установившегося движения жидкости до и после местного сопротивления измеряют пьезометрический напор, а также определяют объём воды в мерном баке 4 и время его наполнения. Результаты записывают в таблицу 8.3. Опыты проводят не менее трёх раз при различном расходе жидкости, который регулируют краном 3.

ОБРАБОТКА ОПЫТНЫХ ДАННЫХ

Расход воды и среднюю скорость её движения определяют следующим способом:

$$Q = \frac{W}{t};$$

$$v_d = \frac{Q}{\omega_d}; \quad v_D = \frac{Q}{\omega_D},$$

$$\text{где } \omega_d = \frac{\pi d^2}{4}, \quad \omega_D = \frac{\pi D^2}{4},$$

здесь d - диаметр трубопровода до расширения, см;

D - диаметр трубопровода после расширения, см.

Затем определяют потери напора в местных сопротивлениях. Для этого применяют уравнение Бернулли:

$$Z_1 + \frac{P_1}{\rho g} + \frac{\alpha_1 v_1^2}{2g} = Z_2 + \frac{P_2}{\rho g} + \frac{\alpha_2 v_2^2}{2g} + h_{w1-2}.$$

$Z_1=Z_2$ так как трубопровод горизонтальный, следовательно,

$$\frac{P_1}{\rho g} + \frac{\alpha_1 v_1^2}{2g} = \frac{P_2}{\rho g} + \frac{\alpha_2 v_2^2}{2g} + h_{w1-2}.$$

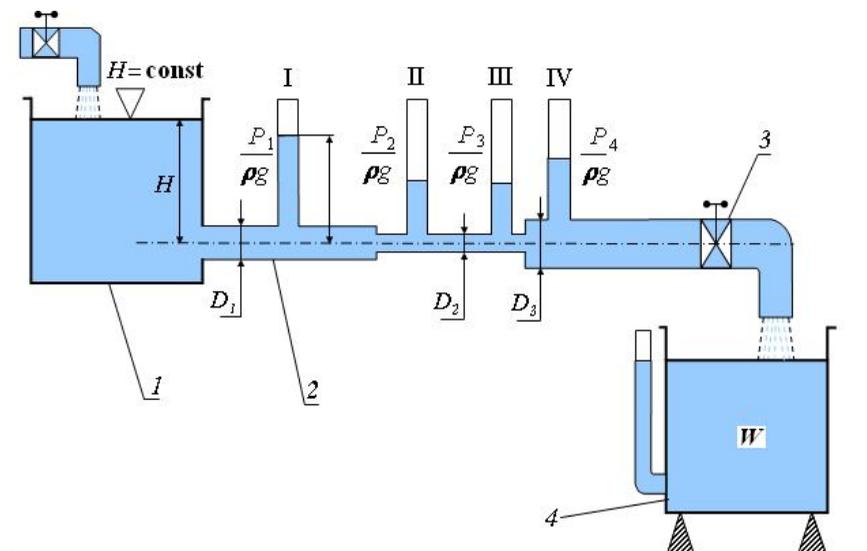


Рис. 8.2. Схема опытной установки

Потери напора между сечениями: $h_{w1-2}=h_e+h_m$
 где h_e – потери напора по длине;

h_m – то же на местное сопротивление.

Так как потери по длине очень малы, то

$$h_{w1-2} = h_m = \left(\frac{P_1}{\rho g} + \frac{\alpha_1 v_1^2}{2g} \right) - \left(\frac{P_2}{\rho g} + \frac{\alpha_2 v_2^2}{2g} \right)$$

$$\alpha_1 = \alpha_2 = 1,0, \quad h_m = E_1 - E_2,$$

здесь $E = \frac{P}{\rho g} + \frac{v^2}{2g}$ – полная удельная энергия потока.

Потери напора при расширении и сужении трубопровода определяются разностью полных удельных энергий до местного сопротивления и после

$$h_{p.p} = E_1 - E_2 = \left(\frac{P_1}{\rho g} + \frac{v_d^2}{2g} \right) - \left(\frac{P_2}{\rho g} + \frac{v_D^2}{2g} \right),$$

$$h_{p.c} = E_3 - E_4 = \left(\frac{P_3}{\rho g} + \frac{v_D^2}{2g} \right) - \left(\frac{P_4}{\rho g} + \frac{v_d^2}{2g} \right).$$

Производят расчёт опытных значений коэффициентов местных сопротивлений по формуле:

$$\xi = \frac{h_M 2g}{v^2}.$$

Рассчитывают теоретические значения коэффициентов местных сопротивлений и сравнивают с опытными. Результаты заносят в таблицу 8.4.

Таблица 8.3

№	Показания пьезометров						W	t	Постоянные величины d ₁ = 1,5 см; d ₂ = 1,0 см; D = 2,5 см;
	резкое сужение		резкое расширение		кран				
	$\frac{P_1}{\rho g}$	$\frac{P_2}{\rho g}$	$\frac{P_3}{\rho g}$	$\frac{P_4}{\rho g}$	$\frac{P_5}{\rho g}$	$\frac{P_6}{\rho g}$			
	см	см	см	см	см	см	см ³	с	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1									
2									
3									

Таблица 8.4

№	Q	v_d	v_D	h , резкое сужен.	h , резкое расш.	$\zeta_{p.c}$	$\zeta_{p.p}$	ζ , резкое сужен.	ζ , резкое расш.	ζ крана
	см ³ /с	см/с	см/с	см	см	-	-	-	-	-
1	2	3	4	5	6	8	9	11	12	13
1										
2										
3										

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. От каких факторов зависит величина коэффициента местного сопротивления?
2. Как определяются в опыте потери напора на каждом сопротивлении?
3. Как определяются опытные значения коэффициентов местных сопротивлений?
4. По каким формулам определяются теоретические значения исследуемых коэффициентов местных сопротивлений?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 9

РАСЧЕТ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ВОЗДУШНОГО ВЕНТИЛЯТОРА

ЦЕЛЬ РАБОТЫ:

1. Приобретение навыков экспериментального определения характеристик вентилятора.

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Вентилятор – центробежная машина, предназначенная для перемещения газов. Центробежные вентиляторы условно делятся на вентиляторы низкого давления ($p < 103$, Па), среднего давления ($p = 103 \div 3 \cdot 103$, Па) и высокого давления ($p = 3 \cdot 103 \div 104$, Па).

В спиралеобразном корпусе 2 вентилятора (рис.9.1) вращается рабочее колесо (барaban) 1 с большим числом лопаток.

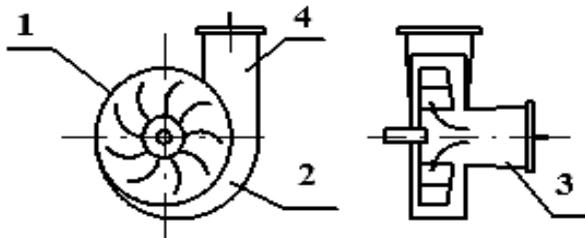


Рис.9.1. Схема центробежного вентилятора:

- 1 – рабочее колесо; 2 – корпус вентилятора «Улитка»;
- 3 – всасывающий конфузор; 4 – нагнетательный диффузор

Отношение ширины лопатки к ее длине зависит от развиваемого давления и является наименьшим для вентиляторов высокого давления. Газ поступает по оси вентилятора через патрубок 3 и удаляется из корпуса через нагнетательный патрубок 4. Форму и размеры корпуса

вентилятора, рабочего колеса, лопаток и патрубков выбирают такими, чтобы гидравлические потери были наименьшими. Рабочие колеса вентиляторов низкого давления имеют лопатки, загнутые назад. У некоторых типов вентиляторов высокого давления лопатки загнуты вперед для создания большего напора.

Характеристики вентиляторов служат для исследования их работы в различных условиях и для подбора вентиляторов при проектировании вентиляционных установок.

Рабочий режим устанавливается по точке пересечения характеристики вентилятора с характеристикой сети. Совмещение характеристики сети и вентилятора дает рабочую точку; она отвечает наибольшей производительности вентилятора при его работе на данную сеть.

Рабочими характеристиками вентилятора называются функциональные зависимости $H = f_1(Q)$, $N = f_2(Q)$, $\eta = f_3(Q)$, полученные при постоянном числе оборотов рабочего колеса.

Объемная подача вентилятора Q , м³/с, определяется объемом воздуха, подаваемого вентилятором в нагнетательный патрубок в единицу времени.

Напор H , м, характеризует удельную энергию, которая сообщается вентилятором единице веса перемещаемого воздуха.

Полезная мощность N , Вт, затрачиваемая вентилятором на сообщение воздуху энергии давления, равна

$$N = \rho_v \cdot gQH = Q\Delta p, \quad (9.1)$$

где ρ_v – плотность подаваемого вентилятором воздуха, кг/м³; g – ускорение свободного падения, $g = 9,81$ м/с²;

Q – объемная подача вентилятора, м³/с; H_1 – полный напор в м столба перекачиваемого воздуха; Δp – полное давление, создаваемое вентилятором, Па, равно разности полных давлений на нагнетающей и всасывающей сторонах воздушного тракта.

Мощность N_1 , Вт, привода вентилятора

всасывающий трубопровод; 12 – решетка, спрямляющая поток воздуха; 13 – трубка статического напора во всасывающем трубопроводе; 14 – трубка полного напора во всасывающем трубопроводе.

При испытании вентилятора измеряют объемную подачу, развиваемый напор и потребляемую мощность.

Объемную подачу и напор измеряют с помощью скоростной пневмометрической трубки Пито-Прандтля (рис.9.3), мощность – электросчетчиком .

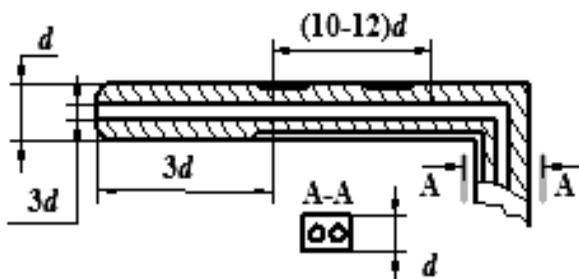


Рис.9.3. Схема скоростной (пневмометрической) трубки

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ РАБОТЫ

Включить вентилятор, нажав пусковую кнопку 7. На выходе из нагнетательного трубопровода или на входе во всасывающий трубопровод установить последовательно диафрагмы (рис.9.3), которые, дросселируя поток воздуха, изменяют режим работы установки. Можно дросселировать вход.

Для каждого режима работы установки необходимо записать показания U-образных дифманометров, фиксирующих полный H и скоростной h напоры вентилятора.

С помощью секундомера определить частоту вращения диска электросчетчика ν , с-1.

Все измерения надо выполнять «на ходу», не выключая вентилятор при замене диафрагм. Все замеры необходимо провести не менее чем для трёх режимов работы вентилятора (две диафрагмы и без диафрагмы).

Результаты измерений занести в табл.9.1.

Таблица 9.1

Номер диафрагмы (опыта)	H , м	h , м	n , оборотов диска эл. счетчика	τ , с	$v = \frac{n}{\tau}$, с-1
1					
2					
3					

ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТА

1. Объемную подачу вентилятора Q , м³/с, рассчитывают по формуле

$$Q = v \cdot S,$$

где v - средняя скорость движения воздуха в трубопроводе, м/с,

$$v = 0,9 \sqrt{2g \frac{\rho}{\rho_0} \cdot h}.$$

Здесь $\rho = 1000$ кг/м³ – плотность воды, заполняющей дифманометры; $\rho_0 = 1,29$ кг/м³ – плотность воздуха при нормальных условиях; h – скоростной напор, м; g – ускорение свободного падения, м/с²; S – площадь сечения воздуходува, м² (диаметр воздуходува равен 0,15 м).

2. Мощность, затрачиваемую вентилятором, т.е. мощность электродвигателя, вычисляют по формуле

$$N_l = \eta_{эл} \cdot \frac{3600}{450} \cdot v ,$$

где v - частота вращения диска счетчика, c^{-1} ; $\eta_{эл}$ – КПД электродвигателя, $\eta_{эл} = 0,95$ (450 – число оборотов счетчика соответствует 1 кВт·ч).

3. Полезную мощность, т.е. мощность, сообщенную потоку воздуха, определяют из уравнения

$$N = \frac{\rho g Q \cdot H}{1000} ,$$

где Q – объемная подача вентилятора, m^3/c ;

H – полный напор, м; ρ - плотность воды, $кг/м^3$.

Необходимо помнить, что

$$\Delta p = \rho_g \cdot gH = \rho gH$$

4. Коэффициент полезного действия η , %, вентилятора находят по формуле

$$\eta = \frac{N \cdot 100}{N_l} .$$

Результаты расчетов заносят в табл.9.2.

Таблица 9.2

Номер опыта	H , м	N , кВт	Q , m^3/c	η , %
1				
2				
3				

По экспериментальным данным построить характеристики центробежного вентилятора. По оси абсцисс откладывают объемную подачу, по оси ординат – напор, полезную мощность и КПД.

Графики строятся на миллиметровой бумаге с обязательным нанесением расчетных точек.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

- 1. Основное уравнение центробежных машин (уравнение Эйлера).*
- 2. Устройство центробежного вентилятора. Роль «Улитки», конфузора, диффузора.*
- 3. Рабочие характеристики вентиляторов. Рабочая точка.*
- 4. Мощность двигателя и КПД вентиляторной установки.*
- 5. Зависимость режима работы вентилятора от числа оборотов.*

ПРИЛОЖЕНИЕ

Соотношения между единицами силы:

1 килограмм-сила (кгс) = 9,81 Н.

Соотношения между единицами давления:

1 мм рт. ст. = 133 Па (Н/м²).

1 атм = 1,01325·10⁵ Па.

1 кгс/м² = 9,81 Па.

Соотношения между единицами динамической вязкости: 1 Па·с [кг/(м·с)] = 10 Пз (Пуаз) = 10³ сПз = (сантипуаз) = 1,02·10⁻¹ кгс·с/м².

Соотношения между единицами кинематической вязкости: 1 м²/с = 10⁴ Ст (Стокс) = 10⁶ сСт (сантистокс).

Соотношения между единицами температуры:

0°С = 273,16 К; $T = (t^{\circ}\text{C} + 273,16) \text{ К}$.

Таблица III

Основные и дополнительные единицы Международной системы (СИ)

Наименование	Единица измерения
Длина - метр	м
Масса - килограмм	кг
Время - секунда	с
Площадь - квадратный метр	м ²
Объем - кубический метр	м ³
Скорость - метр в секунду	м/с
Ускорение - метр на секунду в квадрате	м/с ²
Плотность - килограмм на кубический метр	кг/м ³
Сила, сила тяжести - Ньютон	Н
Момент инерции - метр в четвертой степени	м ⁴
Количество движения - килограмм метр в сек.	кг м/с
Давление - Паскаль	Па
Динамическая вязкость – Паскаль секунда	Па·с
Кинематическая вязкость - метр квадрат в сек.	м ² /с

Таблица П2

Средние значения плотности ρ твердых тел (при 20 °С)

Металлы и сплавы		Различные материалы	
вещество	ρ , кг/м ³	вещество	ρ , кг/м ³
Алюминий	2700	Воск	950
Бронза	8800	Кость	1900
Вольфрам	19340	Лед	917
Железо	7880	Стекло обыкн.	2500
Золото	19310	Фарфор	2300
Латунь	8550	Янтарь	1100
Медь	8930	Бетон	2500
Никель	8900	Дерево	800
Олово	7290	Бумага	800
Платина	21460	Земля	1800
Свинец	11350	Кирпич	2000
Серебро	10500	Мрамор	2700
Уран	19100	Нафталин	1100
Цинк	7150	Песок	1500
Сталь	7800	Асфальт	2500
Чугун	7600	Графит	2300

Таблица П3

Зависимость плотности воды от температуры

Температура t , °С	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Плотность ρ , кг/м ³	1000	1000	998	996	992	988	983	978	972	965	958

Таблица П4

Средние значения плотности ρ жидкостей (при 20 °С)

Вещество	ρ , кг/м ³	Вещество	ρ , кг/м ³
Ацетон	791	Уксус	1020
Бензин	700	Ацетон	800
Вода	1000	Ксилол	890
Вода морская	1030	Бензол	890
Глицерин	1260	Растворитель 646	865
Серная кислота	1840	Толуол	880
Спирт	790	Трихлорэтилен	1480
Азотная кислота	1500	Эфир	710
Молоко	1030	Масло подсолнечное	930
Нефть	870	Скипидар	860
Ртуть	13550	Дихлорэтан	1250
Масло машинное	900	Олифа	940
Керосин	800	Четырёххлористый углерод	1590
Соляная кислота	1200	Хлороформ	1500
Мёд	1350		

Средние значения плотности ρ некоторых газов и паров
(при 0°C и 760 мм. рт. ст.)

Вещество	ρ , кг/м ³
Азот	1,251
Аммиак	0,771
Аргон	1,783
Ацетилен	1,173
Бензол (насыщенный при 0 °с)	0,012
Водород	0,0899
Водяной пар (насыщенный при 0 °с)	0,484
Воздух	1,293
Гелий	0,1785
Двуокись углерода	1,977
Кислород	1,429
Криптон	3,74
Неон	0,900
Метан	0,700
Озон	2,139
Окись углерода	1,25
Сероводород	1,500
Хлор	3,22
Этиловый спирт (насыщенный при 0 °С)	0,033
Этиловый эфир (насыщенный при 0 °С)	0,83

Таблица П6

Значения кинематического коэффициента вязкости ν , см²/сек.
для воды в зависимости от температуры

$t^0 \text{C}$	ν	$t^0 \text{C}$	ν	$t^0 \text{C}$	ν
1	0,017321	12	0,012396	26	0,008774
2	0,016740	13	0,012067	28	0,008394
3	0,016193	14	0,011756	30	0,008032
4	0,015676	15	0,011463	35	0,007251
5	0,015188	16	0,011177	40	0,006587
6	0,014726	17	0,010888	45	0,006029
7	0,014289	18	0,010617	50	0,005558
8	0,013873	19	0,010356	55	0,005147
9	0,013479	20	0,010105	60	0,004779
10	0,013101	22	0,009892		
11	0,012740	24	0,009186		

Таблица П7

Значения коэффициентов сжатия струи, скорости и расхода

Тип насадка	ε	φ	μ
Круглое отверстие	0,64	0,97	0,62
Внешний цилиндрический насадок	1,00	0,82	0,82
Внутренний цилиндрический насадок	1,00	0,71	0,71
Конически расходящийся насадок $\Theta = 7^0$	1,00	0,50	0,50
Конически сходящийся насадок $\Theta = 13^0 24'$	0,98	0,96	0,94
Коноидальный насадок	1,00	0,98	0,98

Таблица П8

График определения коэффициента гидравлического трения

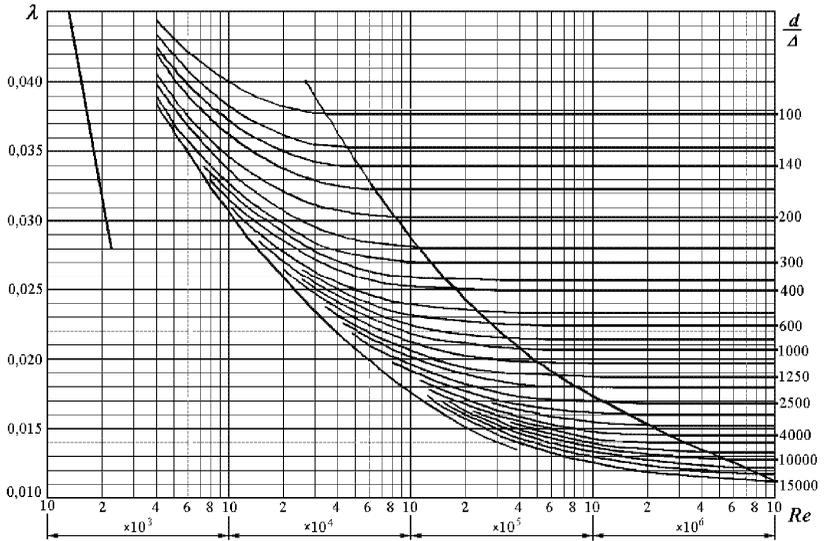


Таблица П9

Коэффициент температурного расширения воды при различных температурах и давлениях

$T, ^\circ\text{C}$	$\beta_t \cdot 10^6, ^\circ\text{C}^{-1}$ при давлении, $\text{Па} \cdot 10^{-4}$				
	1	100	200	500	900
1-10	14	43	72	149	229
10-20	150	165	183	236	289
40-50	422	422	426	429	437
60-70	556	548	539	523	514
90-100	719	704	-	661	621

ЛИТЕРАТУРА

1. Jirka G., Lang C. Einführung in die Gerinnehydraulik Universitätsverlag. Karlsruhe, 2009. –136 s.
2. Мукольянц А.А. Гидравлика: Учеб. для вузов. –Т.: Fan va texnologiya, 2016. –368 с.
3. Мукольянц А.А. Гидравлика, гидравлические машины и гидропневмоприводы.: Учебно-методическое пособие. – Ташкент: ТашГТУ, 2010. –160 с.
4. Турсунова Э.А., Мукольянц А.А. Механика жидкости и газа. – Ташкент: ТАСИ, 2012. –150 с.
5. Бозоров Д.Р., Каримов Р.М., Казбеков Ж.С., Хидиров С.Қ. Гидравлика. -Тошкент: ТИИМСХ, 2003. –190 б.
6. Разбегина Е.Г., Сумбатова А.Р. Прикладные задачи гидравлики. – М.: РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, 2007. –41 с.
7. <http://www.techgidravlika.ru>
8. <http://www.zadachi.gidravlika.info>
9. <http://www.twirpx.com/files/hydro/hidropr/>
10. <http://www.hydroaudit.ru/clean>

СОДЕРЖАНИЕ

Лабораторная работа № 1.	Определение коэффициента вязкости жидкости по методу Стокса.....	3
Лабораторная работа № 2.	Измерение давления в точке и построение пьезометрической плоскости.....	10
Лабораторная работа № 3.	Закон Архимеда. Гидростатическое взвешивание.....	15
Лабораторная работа № 4.	Исследование режимов движения жидкости на приборе Рейнольдса.....	20
Лабораторная работа № 5.	Экспериментальное изучение уравнения Бернулли. Построение пьезометрической и напорной линий.....	27
Лабораторная работа № 6.	Расчёт расхода жидкости на приборе Вентури.....	37
Лабораторная работа № 7.	Определение коэффициента гидравлического трения по длине трубопровода.....	43
Лабораторная работа № 8.	Определение коэффициентов местных сопротивлений.....	52
Лабораторная работа № 9.	Расчет производительности воздушного вентилятора.....	59
Приложение.....		66
Литература		72

Редактор Ахметжанова Г.М.