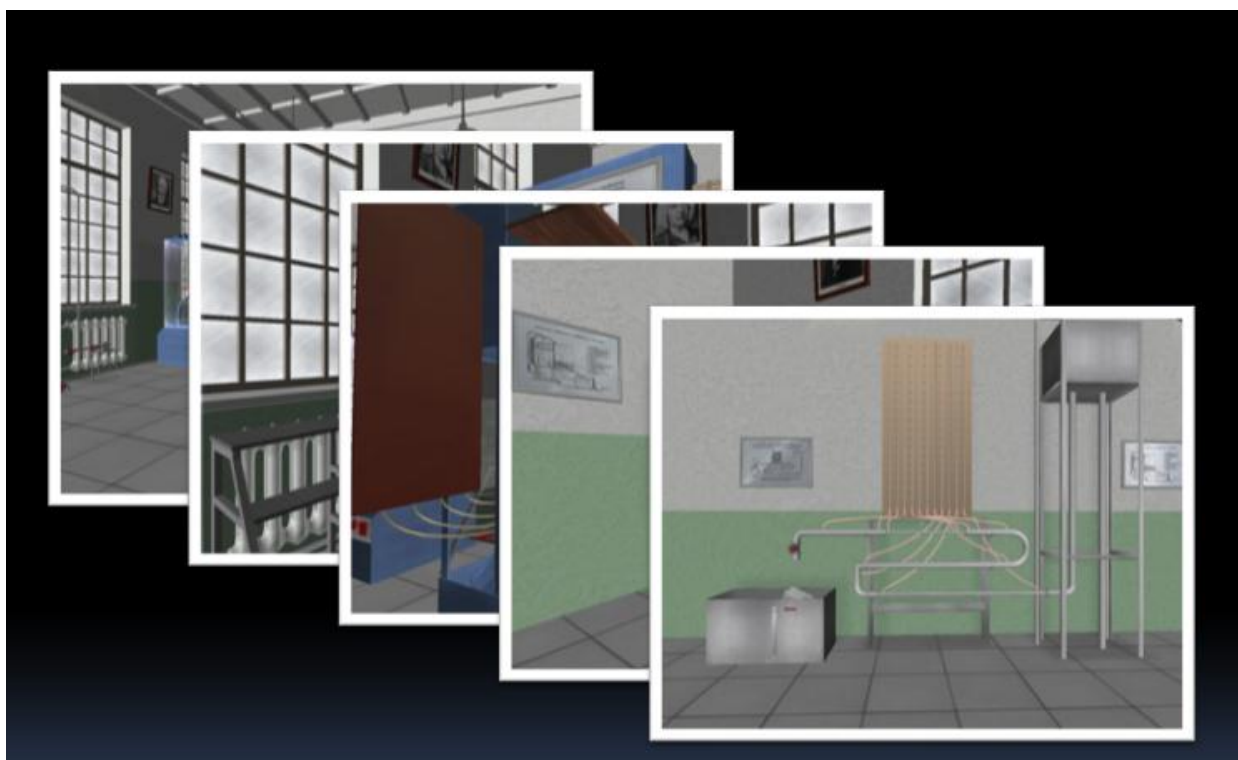


ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ  
*ТВЕРСКОЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ*

---

*Кафедра «Гидравлика, теплотехника, гидропривод»*

**Виртуальный лабораторный практикум  
по гидравлике**



Тверь 2010

## **ВВЕДЕНИЕ**

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

В предлагаемом лабораторном курсе описание каждой работы содержит:

- а) вводную часть, где в сжатой форме изложены сведения общего характера и основные теоретические положения, имеющие самое прямое отношение к рассматриваемым в работе вопросам;
- б) цель работы;
- в) схему установки;
- г) порядок выполнения работы и детально разработанные таблицы для упрощения и удобства обработки опытных данных;
- д) основные контрольные вопросы, позволяющие студентам целенаправленно готовиться к защите отчета о каждой работе;
- е) номера рекомендуемых литературных источников (их названия и другие сведения о них даны в списке литературы, приведенном в конце курса).

Выполнение студентами лабораторных работ приводится на виртуальных моделях созданных на основе физического и математического моделирования с использованием компьютерных технологий, разработанных кафедрой «Гидравлика, теплотехника, гидропривод» ТГТУ.

Курс написан на основе многолетнего научно-методического и преподавательского опыта авторов с учетом опыта других ВУЗов России и стран ближнего зарубежья.

## **ОБЩИЕ УКАЗАНИЯ, КАСАЮЩИЕСЯ ВЫПОЛНЕНИЯ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ, РЕКОМЕНДАЦИИ ПО СОСТАВЛЕНИЮ И ОФОРМЛЕНИЮ ОТЧЁТОВ О РАБОТАХ И ИХ ЗАЩИТЕ**

1. Текстовую часть отчета о каждой лабораторной работе студент должен представлять на отдельных листах белой писчей бумаги формата А4 (210х297 мм), а графическую (схему установки и график, построенный в масштабе по опытным данным) - на миллиметровой или потребительской бумаге в клетку. При этом весь графический материал, в том числе надписи и обозначения на нем, должен быть выполнен карандашом. При

вычерчивании графиков на осях координат должны быть разбиты шкалы, даны обозначения откладываемых величин и их размерность.

2. Каждый рисунок в отчете должен иметь порядковый номер и пояснительную надпись, располагаемые под рисунком.

3. К выполнению работы допускаются студенты, оформившие в соответствии с изложенными ниже требованиями подготовительную часть отчёта, включающую:

- а) название работы и цель её выполнения;
- б) основные теоретические положения работы (в конспективном изложении);
- в) схему установки, а также рисунки, поясняющие физическую картину изучаемого гидравлического явления;
- г) таблицы для записи опытных данных и результатов вычислений.

4. После окончания работы результаты измерений и вычислений должны быть предъявлены преподавателю для подписи.

5. Для получения оценки (в баллах) за выполненную лабораторную работу студент должен предъявить преподавателю полностью оформленный отчёт, т.е. отчёт, дополненный результатами вычислений, графическим материалом, а также выводами (заключением) по работе, ответами на контрольные вопросы, и защитить его.

6. Защита отчёта о работе проводится письменно ( в виде тестирования). При этом студенту предлагается ответить на пять вопросов, в том числе два в виде числовых примеров. На защиту отводится один академический час. Организационно защита проводится одновременно для всей группы студентов в рамках расписания лабораторных занятий.

## Лабораторная работа 1

### ИЗМЕРЕНИЕ ГИДРОСТАТИЧЕСКОГО ДАВЛЕНИЯ, ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ПОДТВЕРЖДЕНИЕ ОСНОВНОГО УРАВНЕНИЯ ГИДРОСТАТИКИ И ЗАКОНА ПАСКАЛЯ

#### Вводная часть.

Гидростатическим давлением  $p$  называют нормальное сжимающее напряжение, возникающее в покоящейся жидкости под действием поверхностных и массовых сил,

$$p = \lim_{\Delta S \rightarrow 0} \frac{\Delta P}{\Delta S}, \quad (1)$$

где  $\Delta P$  - элементарная равнодействующая поверхностных и массовых сил (гидростатическая сила), Н;

$\Delta S$  - элементарная площадка действия,  $\text{м}^2$ .

Из формулы (1) видно, что гидростатическое давление  $p$  есть предел отношения элементарной гидростатической силы  $\Delta P$  к элементарной площади действия  $\Delta S$ , когда последняя стремится к нулю.

За единицу гидростатического давления принято равномерно распределённое давление, создаваемое силой 1 Н, на площади 1 м<sup>2</sup>, т.е.  $p = 1\text{Н}/1\text{м}^2 = 1\text{Па}$  (один паскаль).

Гидростатическое давление, отсчитываемое от абсолютного нуля, называют абсолютным ( $p_{абс}$ ), а отсчитываемое от атмосферного ( $p_{ат}$ ) – избыточным ( $p_{изб}$ ), следовательно,

$$p_{абс} = p_{ат} + p_{изб}. \quad (2)$$

Очевидно, что

$$p_{изб} = p_{абс} - p_{ат}. \quad (3)$$

В гидравлических расчётах величину нормального атмосферного давления считают равной  $p_{ат} = 98100$  Па.

Из формулы (3) видно, что в зависимости от соотношения между  $p_{абс}$  и  $p_{ат}$  избыточное давление  $p_{изб}$  может быть и положительной, и отрицательной величиной. Положительное избыточное давление называют манометрическим, а отрицательное – вакуумметрическим. Приборы, применяемые для измерения  $+p_{изб}$  и  $-p_{изб}$ , называют соответственно манометрами и вакуумметрами.

По принципу действия манометры и вакуумметры делятся на две группы: жидкостные и механические.

Жидкостный манометр (пъезометр) представляет собой стеклянную трубку, верхний конец которой открыт в атмосферу, а нижний – присоединён к точке, где измеряется манометрическое давление.

Манометрическое давление, выраженное через показания пъезометра:

$$p_{изб} = \rho g h_{p_{изб}}, \quad (4)$$

где  $\rho g = \gamma$  – объёмный вес жидкости;

$h_{p_{изб}}$  – пъезометрическая высота, т.е. высота, отсчитываемая от точки подключения пъезометра до уровня жидкости в нём.

Действие механических приборов основано на деформации под действием давления упругого элемента (пружины или мембраны). Заметим, что пружинный манометр показывает давление в точке жидкости на уровне оси вращения его стрелки. Если высотное положение оси вращения стрелки и точки подключения манометра не совпадает, в показание манометра ( $p_m$ ) вводят поправку ( $\pm \rho g y$ ).

Для этого случая:

$$p_{изб} = p_m \pm \rho g y, \quad (5)$$

где  $y$  - превышение оси вращения стрелки манометра над точкой его подключения,  $m$ .

В данной лабораторной работе предусмотрено измерение манометрического давления пружинными манометрами.

Когда на покоящуюся жидкость действует только сила тяжести, распределение гидростатического давления  $p$  по глубине  $h$  описывается основным уравнением гидростатики:

$$p = p_0 + \rho g h, \quad (6)$$

где  $p$  - гидростатическое давление в жидкости на глубине  $h$ , Па;

$p_0$  - внешнее давление, т.е. гидростатическое давление на свободной поверхности жидкости, Па;

$h$  - глубина погружения в жидкость рассматриваемой точки,  $m$ ;

$\rho g h$  - весовое давление, т.е. гидростатическое давление, создаваемое весом столба  $h$  жидкости, Па.

Из уравнения (6) видно, что при  $p_0 = const$  и  $\rho g = const$  давление  $p$  с изменением величины  $h$  изменяется по линейному закону, что предстоит подтвердить опытами. Вычислив по уравнению (6) давление  $p$  в двух точках, заглублённых на разную величину  $h$ , можно построить диаграмму распределения гидростатического давления по глубине, называемую эпюрой гидростатического давления.

Из уравнения (6) следует также, что внешнее давление  $p_0$  в покоящейся жидкости передаётся во все точки её объёма без изменения. Это следствие называют законом Паскаля.

“Внешнее давление, приложенное к поверхности жидкости, находящейся в равновесии в замкнутом сосуде, передается во все точки жидкости без изменения”.

Справедливость этого закона предстоит проверить опытным путём в данной работе.

**Описание установки.** Установка представляет собой толстостенный стальной цилиндр (колонна), частично заполненный водой, уровень которой измеряется водомерной трубкой со шкалой (линейкой).

Для изменения гидростатического давления над свободной поверхностью жидкости (в т. 1) и в точках 2 и 3, заглублённых под уровень соответственно на  $h_2$  и  $h_3$ , подключены пружинные манометры  $M_1$ ,  $M_2$ ,  $M_3$ .

В пространство над свободной поверхностью можно подавать сжатый воздух от компрессора по трубопроводу открытием вентили.

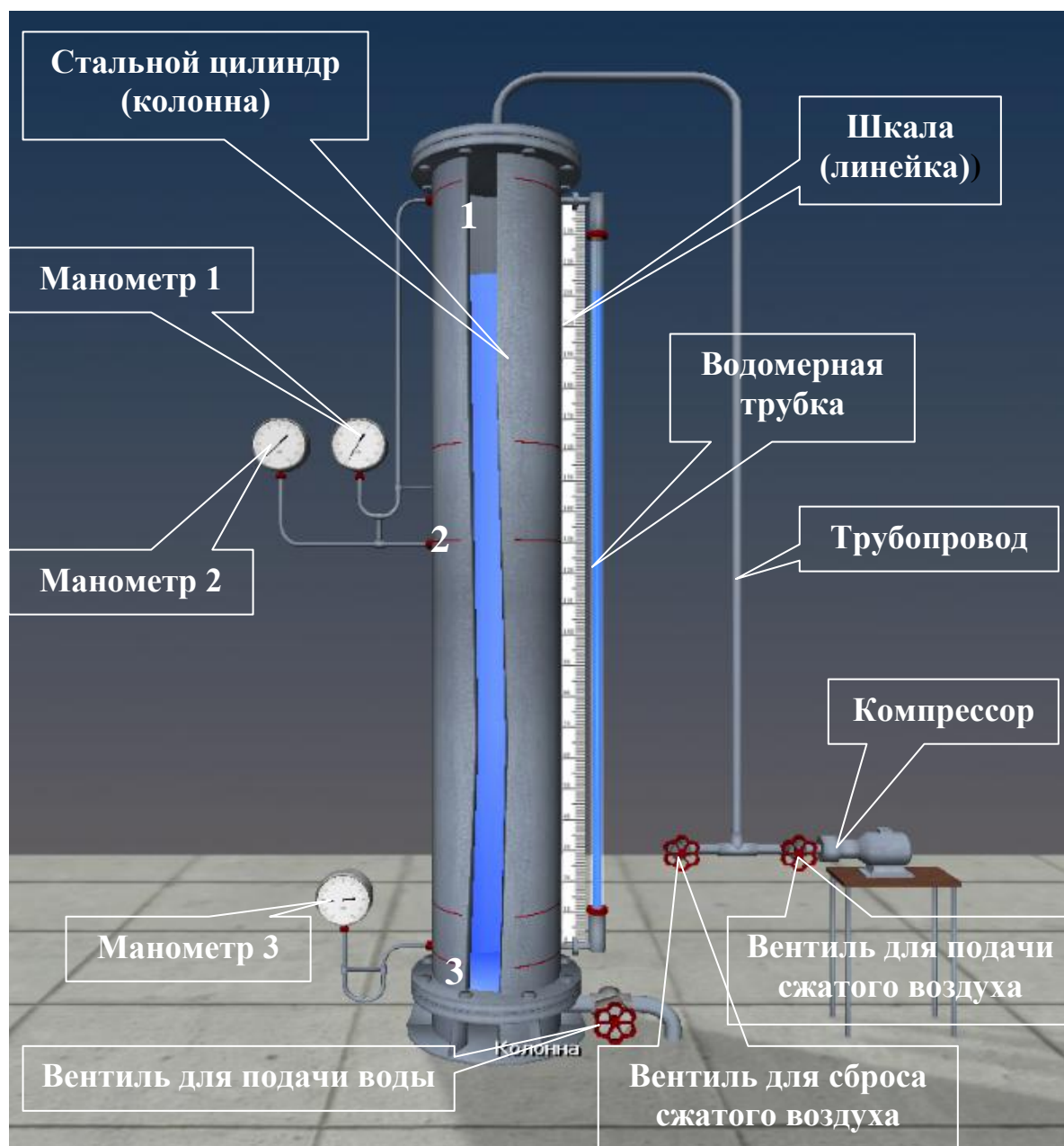


Рис.1. Схема установки для экспериментального подтверждения основного уравнения гидростатики и закона Паскаля.

**Цель работы.** 1. Измерить с помощью пружинных манометров гидростатическое давление в трёх точках (1, 2, 3), заглублённых на различную величину под уровень жидкости, находящейся в абсолютном покое под действием силы тяжести.

2. Подтвердить на основании опытных данных основное уравнение гидростатики и закон Паскаля.

3. Построить по данным опытов № 1, 2 в масштабе эпюры манометрического давления по глубине  $h$ .

### **Порядок выполнения работы и обработка опытных данных**

Необходимо выполнить два опыта, обеспечив в первом  $p_{0_{изб}} = 0$ , а во втором -  $p_{0_{изб}} > 0$ .

**Опыт №1.** Открыть **вентиль подачи воды**, наполнить установку до отметки, указанной преподавателем, и измерить с помощью **водомерной трубки** и **шкалы** глубины погружения  $h_2$  и  $h_3$  точек 2 и 3, а также превышения  $y_2$  и  $y_3$  осей вращения стрелок манометров  $M_2$  и  $M_3$  над точками их подключения. Затем измерить показания всех трёх манометров ( $M_1, M_2, M_3$ ). Полученные данные записать в таблицу (графы 4 и 6).

**Опыт №2.** Закрывать **вентиль для сброса сжатого воздуха**, а **вентиль для подачи сжатого воздуха** открыть и включить **компрессор**. Довести  $p_{0_{изб}}$  до величины, указанной преподавателем, после чего **компрессор** отключить. Далее, измерить одновременно показания манометров  $M_1, M_2, M_3$ . Результаты измерений записать в графу 5 таблицы.

Выполнить все вычисления, предусмотренные таблицей. Дать заключение по результатам работы.

### **Основные контрольные вопросы к работе 1**

1. Что такое гидростатическое давление и каковы его свойства?
2. Поясните, что такое абсолютное и избыточное гидростатическое давление и какова связь между ними?
3. Объясните, что понимают под терминами: «внешнее давление» и «весовое давление»?
4. Напишите и поясните основное уравнение гидростатики.
5. Сформулируйте закон Паскаля.
6. Назовите приборы для измерения избыточного гидростатического давления и поясните принципы их действия.
7. Поясните, что такое пьезометрическая высота?
8. В чём состояло принципиальное отличие в условиях проведения первого и второго опытов?
9. Для чего нужно знать превышение оси вращения стрелки пружинного манометра над точкой его подключения?
10. Эпюра гидростатического давления, как ее строят и с какой целью?

№ пози- ций	Наименования и обозначения измеря- емых и вычисляемых величин		Единицы измерения.	Результаты из- мерений и вы- числений		Примечания
				Опыт № 1	Опыт № 2	
1	2		3	4	5	6
1	Показания ма- нметров $M_1, M_2, M_3$	$p_{M_1} \approx p_0$	Па			$h_1 = \dots\dots\dots m$ $h_2 = \dots\dots\dots m$ $h_3 = \dots\dots\dots m$ $y_2 = \dots\dots\dots m$ $y_3 = \dots\dots\dots m$  $\rho = 1000 \frac{кг}{м^3}$ $g = 9,81 \frac{м}{с^2}$
		$p_{M_2}$	Па			
		$p_{M_3}$	Па			
2	Избыточное гид- ростатическое давление в точ- ках 1, 2, 3	$p_1 \approx p_{M_1} \approx p_0$	Па			
		$p_2 = p_{M_2} + \rho g y_2$	Па			
		$p_3 = p_{M_3} + \rho g y_3$	Па			
3	Приращение из- быточного гид- ростатического давления	$\Delta p_1 \approx \Delta p_0 = p_{0_2} - p_{0_1}$	Па			
		$\Delta p_2 = p_{2_2} - p_{2_1}$	Па			
		$\Delta p_3 = p_{3_2} - p_{3_1}$	Па			
4	Средняя величи- на приращения избыточного гидростатическо- го давления	$\Delta p_{cp} = \frac{\Delta p_0 + \Delta p_2 + \Delta p_3}{3}$	Па			
5	Относительные расхождения приращений дав- ления в точках 1, 2, 3 со средней величиной.	$E_{\Delta p_0} = (\Delta p_{cp} - \Delta p_0) / \Delta p_{cp}$	-			
		$E_{\Delta p_2} = (\Delta p_{cp} - \Delta p_2) / \Delta p_{cp}$	-			
		$E_{\Delta p_3} = (\Delta p_{cp} - \Delta p_3) / \Delta p_{cp}$	-			

Таблица

### \*Учебная литература к работе 1

1. ( с. 32...45); 2.( с. 24...26); 3.( с. 15...24); 4.( с. 23...34); 5.(с. 27...38)

\*Из перечисленных учебников следует выбрать один, рекомендованный преподавателем, ведущим занятия.



## Лабораторная работа 2

### ИЗУЧЕНИЕ ОТНОСИТЕЛЬНОГО ПОКОЯ ЖИДКОСТИ ПРИ ВРАЩАТЕЛЬНОМ ДВИЖЕНИИ

**Вводная часть.** В работе рассматривается случай, когда жидкость, находящаяся в открытом цилиндрическом сосуде, вращается вместе с ним с постоянной угловой скоростью  $\omega$  вокруг его вертикальной оси. Дело в том, что стенки вращающегося цилиндра благодаря силам трения сначала приводят во вращение ближайшие к ним слои жидкости, а затем, вследствие вязкости жидкости, и всю её массу. Таким образом, через некоторое время все частицы жидкости начинают вращаться с той же угловой скоростью  $\omega$ , что и стенки, т.е. вся масса жидкости относительно вращающегося цилиндра будет неподвижна (находиться в относительном покое).

В этом случае на каждую частицу жидкости действуют две массовые силы – сила тяжести, создающая ускорение  $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ , и центробежная сила, создающая ускорение  $\omega^2 r$ . Здесь  $r$  – радиус вращения частицы жидкости;  $\omega = \frac{\pi n}{30}$  – угловая скорость вращения сосуда,  $1/\text{с}$ , где  $n$  – число оборотов вращения сосуда,  $\text{об/мин}$ .

Благодаря действию центробежных сил **свободная поверхность вращающейся жидкости в цилиндрическом сосуде принимает форму параболоида вращения**. Кривая, образуемая от пересечения этого параболоида с вертикальной плоскостью, представляет собой **квадратичную параболу**.

Для рассматриваемого в работе случая относительного покоя закон распределения гидростатического давления  $p$  в жидкости (основное уравнение гидростатики) имеет вид:

$$p = p_0 + \rho g(z_0 - z) + \frac{\rho g(\omega r^2)}{2g}, \quad (1)$$

где  $p_0$  – внешнее давление (в нашем случае  $p_0 = p_{\text{атм}}$ );  $z_0$  и  $z$  – превышения соответственно вершины параболоида вращения (точка  $O'$ ) и произвольной точки  $A$  вращающейся жидкости над плоскостью отсчёта  $xOy$ .

Разделив уравнение (1) на  $\rho g$  и перенеся  $p_0$  в его левую часть, получим выражение для определения заглубления  $h$  рассматриваемой точки вращающейся жидкости под свободную поверхность:

$$\frac{p - p_0}{\rho g} = z_0 - z + \frac{(\omega r^2)}{2g} = h.$$

Здесь  $\frac{(\omega r^2)}{2g} = a$  - превышение точки свободной поверхности, расположенной на расстоянии  $r$  от оси вращения, над вершиной  $O'$  параболоида вращения.

С учётом выражений для  $h$  и  $a$  закон распределения гидростатического давления во вращающейся жидкости (1) принимает такой же вид, как и для случая абсолютного покоя, а именно:

$$p = p_0 + \rho g(z_0 + a - z) = p_0 + \rho g h. \quad (2)$$

Уравнение свободной поверхности вращающейся жидкости, полученное из уравнения (1), при  $p = p_0 = p_{am}$ , имеет вид:

$$z = z_0 + \frac{(\omega r)^2}{2g}. \quad (3)$$

При  $r = R$  (здесь  $R$  - внутренний радиус цилиндра) из уравнения (3) получаем выражение для определения высоты  $H$  параболоида вращения:

$$H = \frac{(\omega R)^2}{2g}. \quad (4)$$

Зависимость (3) лежит в основе работы жидкостных тахометров – приборов для измерения числа оборотов вала различных машин. А само явление относительного равновесия жидкости во вращающемся цилиндре используется, например, при центробежном литье труб.

Знание закона распределения давления в жидкости, находящейся в относительном покое, а также вида её свободной поверхности необходимо,

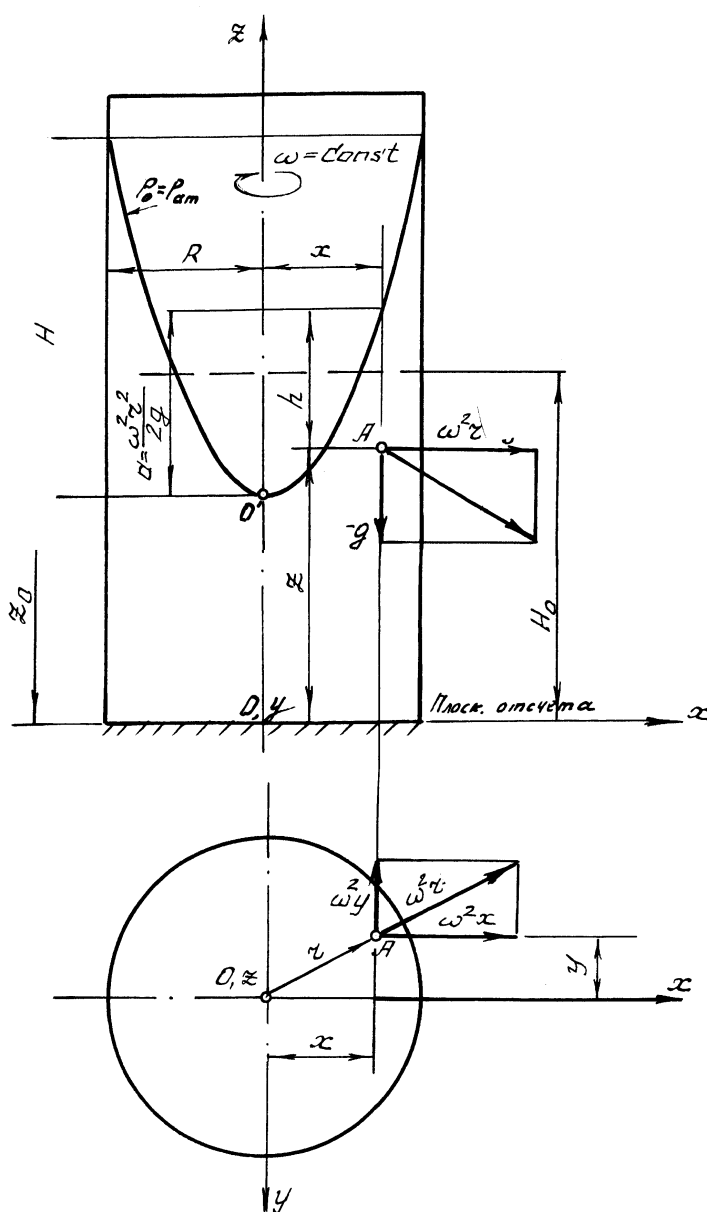


Рис..1 К относительному покою жидкости во вращающемся цилиндрическом сосуде

например, для прочностных расчётов цистерн, в которых транспортируется жидкость.

**Описание установки.** Установка представляет собой открытый вертикальный цилиндрический сосуд с внутренним радиусом  $R$  изготовленный из органического стекла.

В сосуд налита дистиллированная вода с добавлением красителя для контрастности. Вращение сосуда передается от вала электродвигателя. Число оборотов вращения сосуда измеряется тахометром.

Для определения координат  $x$  и  $z$ , точек свободной поверхности вращающейся жидкости установка снабжена горизонтальной линейкой и вертикальной мерной иглой (шпиценмасштабом), являющейся уровнем, позволяющей точно фиксировать высотное положение точек свободной поверхности.

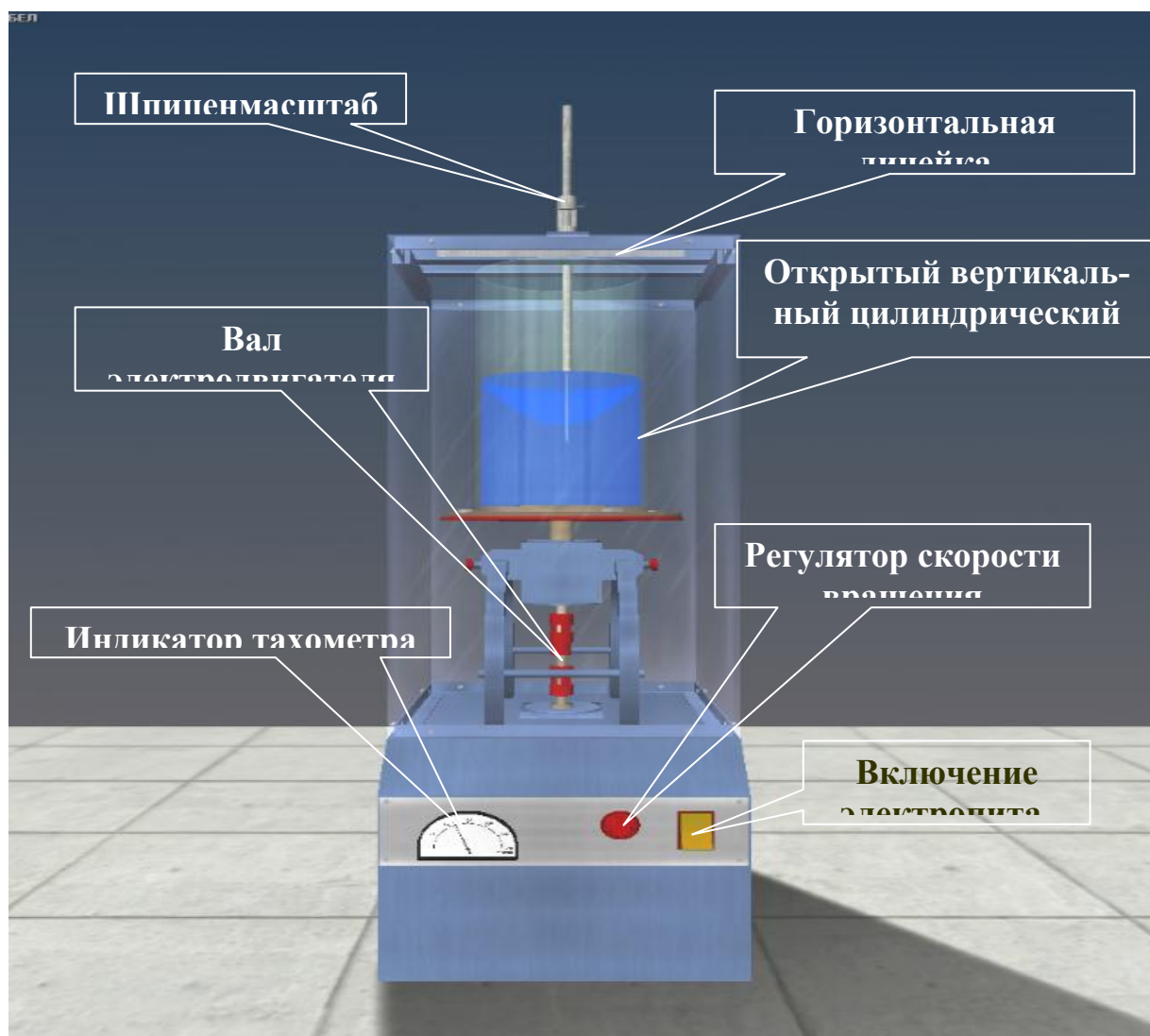


Рис. 2. Схема установки для изучения относительного покоя жидкости во вращающемся цилиндрическом сосуде:

**Цель работы.** 1. Пронаблюдать процесс установления равновесия воды в открытом цилиндре, вращающемся с постоянной угловой скоростью  $\omega$  вокруг вертикальной оси, обратив при этом особое внимание на характер свободной поверхности, и измерить координаты  $x$  и  $z$  пяти её точек, расположенных от оси вращения на расстояниях  $x$ , равных: 0,00 R; 0,25 R; 0,50 R; 0,75 R и 1,00 R.

2. Измерить на установке высоту параболоида вращения  $H_{on}$ , сравнить её с теоретической  $H$ , вычисленной по формуле (4), и определить относительное отклонение.

3. Построить по опытным данным в масштабе параболоид вращения и две эпюры манометрического давления (по глубине жидкости, на расстоянии  $R$  от оси вращения, и по дну цилиндра).

**Порядок выполнения работы.** 1. Измерить мерной иглой (шпиценмаштабом) - координату  $Z$  дна цилиндра.

2. Включить электродвигатель, наблюдать за вращающейся жидкостью и, убедившись, что параболоид вращения принял устойчивое положение, измерить тахометром число оборотов  $n$  вращения цилиндра, а с помощью горизонтальной линейкой и мерной иглой (шпиценмаштабом) - координаты  $x$  и  $z$  пяти точек свободной поверхности вращающейся жидкости.
3. Результаты измерений записать в таблицу, после чего выключить электродвигатель.
4. Выполнить все вычисления, предусмотренные таблицей.
5. По данным таблицы построить в масштабе параболоид вращения и эпюры манометрического давления по дну цилиндра и по высоте его стенки, т.е. на расстоянии  $R$  от оси вращения.
6. Дать заключение по результатам работы.

#### **Основные контрольные вопросы**

1. Поясните, что такое относительный покой жидкости, и приведите примеры использования этого явления в технике.
2. Поясните, что представляет собой свободная поверхность жидкости во вращающемся цилиндрическом сосуде, напишите уравнение этой поверхности.
3. Назовите силы, действующие на каждую частицу жидкости во вращающемся цилиндрическом сосуде, укажите ускорения, вызываемые этими силами. Поясните ответ схемой.
4. Напишите и поясните закон распределения гидростатического давления по глубине жидкости во вращающемся резервуаре.

5. Напишите и поясните формулу для определения высоты параболоида вращения.
6. Изобразите и прокомментируйте эпюру гидростатического давления по дну вращающегося цилиндра с жидкостью.
7. Напишите и поясните закон распределения гидростатического давления по дну цилиндра в жидкости, вращающейся вместе с сосудом вокруг вертикальной оси.
8. Какие силы действуют на жидкость, находящуюся во вращающемся сосуде, как выражаются эти силы?
9. Объясните, как будет направлен вектор равнодействующей сил, действующих на каждую частицу вращающейся жидкости, по отношению к свободной поверхности?
10. Объясните, почему свободная поверхность жидкости во вращающемся цилиндрическом сосуде является криволинейной?

Таблица

№ поз.	Наименования измеряемых и вычисляемых величин	Един. измер.	Результаты измерений и вычислений
1	2	3	4
1	Внутренний радиус цилиндра R	м	
2	Число оборотов вращения цилиндра n	об/мин	
3	Угловая скорость вращения цилиндра $\omega = \pi n / 30$	1/с	
4	Координаты X и Z точек свободной поверхности вращающейся жидкости	x <sub>1</sub> , z <sub>1</sub>	м
		x <sub>2</sub> , z <sub>2</sub>	м
		x <sub>3</sub> , z <sub>3</sub>	м
		x <sub>4</sub> , z <sub>4</sub>	м
		x <sub>5</sub> , z <sub>5</sub>	м
5	Координата z <sub>6</sub> дна цилиндра	м	
6	Превышение вершины параболоида вращения над дном цилиндра $z_0 = z_6 - z_5$	м	
7	Высота параболоида вращения по опыту $H_{оп} = z_5 - z_1$	м	
8	Теоретическая высота параболоида вращения $H = (\omega R)^2 / 2g$	м	
9	Относительное отклонение $\varepsilon_H = (H - H_{оп}) / H$	--	

### Учебная литература к работе 2

1.(с.51...53); 2.(с.41...45); 3.(с.31...34); 4.(с.41...42); 5.(с.39...42).

### Лабораторная работа 3

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПЫТНЫМ ПУТЕМ СЛАГАЕМЫХ УРАВНЕНИЯ Д. БЕРНУЛЛИ ПРИ УСТАНОВИВШЕМСЯ НЕРАВНОМЕРНОМ ДВИЖЕНИИ ЖИДКОСТИ В НАПОРНОМ ТРУБОПРОВОДЕ

**Вводная часть.** Для двух произвольно выбранных живых сечений I-I и II-II струйки реальной жидкости при установившемся движении уравнение Д. Бернулли имеет вид

$$z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{U_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{U_2^2}{2g} + h_{w_{1-2}}. \quad (1)$$

Слагаемые, входящие в уравнение (1), можно истолковать с геометрической и энергетической точек зрения.

С геометрической точки зрения слагаемые уравнения (1) являются высотами (напорами) :

$z$  – геометрическая высота (напор), т.е. превышение центра тяжести рассматриваемого поперечного сечения струйки над плоскостью сравнения 0-0, выбираемой произвольно;

$\frac{p}{\rho g}$  – пьезометрическая высота, т.е. высота подъема жидкости в пьезометре, подключенном к центру тяжести рассматриваемого сечения струйки, отвечающая гидродинамическому давлению  $p$  в этой точке;

$\frac{U^2}{2g}$  – скоростная высота (напор), отвечающая местной скорости  $U$ , т.е. скорости в центре тяжести сечения;

$z + \frac{p}{\rho g}$  – гидростатический напор;

$z + \frac{p}{\rho g} + \frac{U^2}{2g} = H$  – полный напор в рассматриваемом сечении струйки;

$h_{w_{1-2}} = H_1 - H_2$  – потеря полного напора, т.е. часть полного напора, затраченная на преодоление гидравлических сопротивлений на пути между сечениями I-I и II-II.

С энергетической точки зрения слагаемые уравнения (1) представляют собой разновидности удельной энергии, а именно:

$z$  – удельная потенциальная энергия положения жидкости в рассматриваемом сечении струйки;

$\frac{p}{\rho g}$  – удельная потенциальная энергия давления;

$\frac{U^2}{2g}$  – удельная кинетическая энергия;

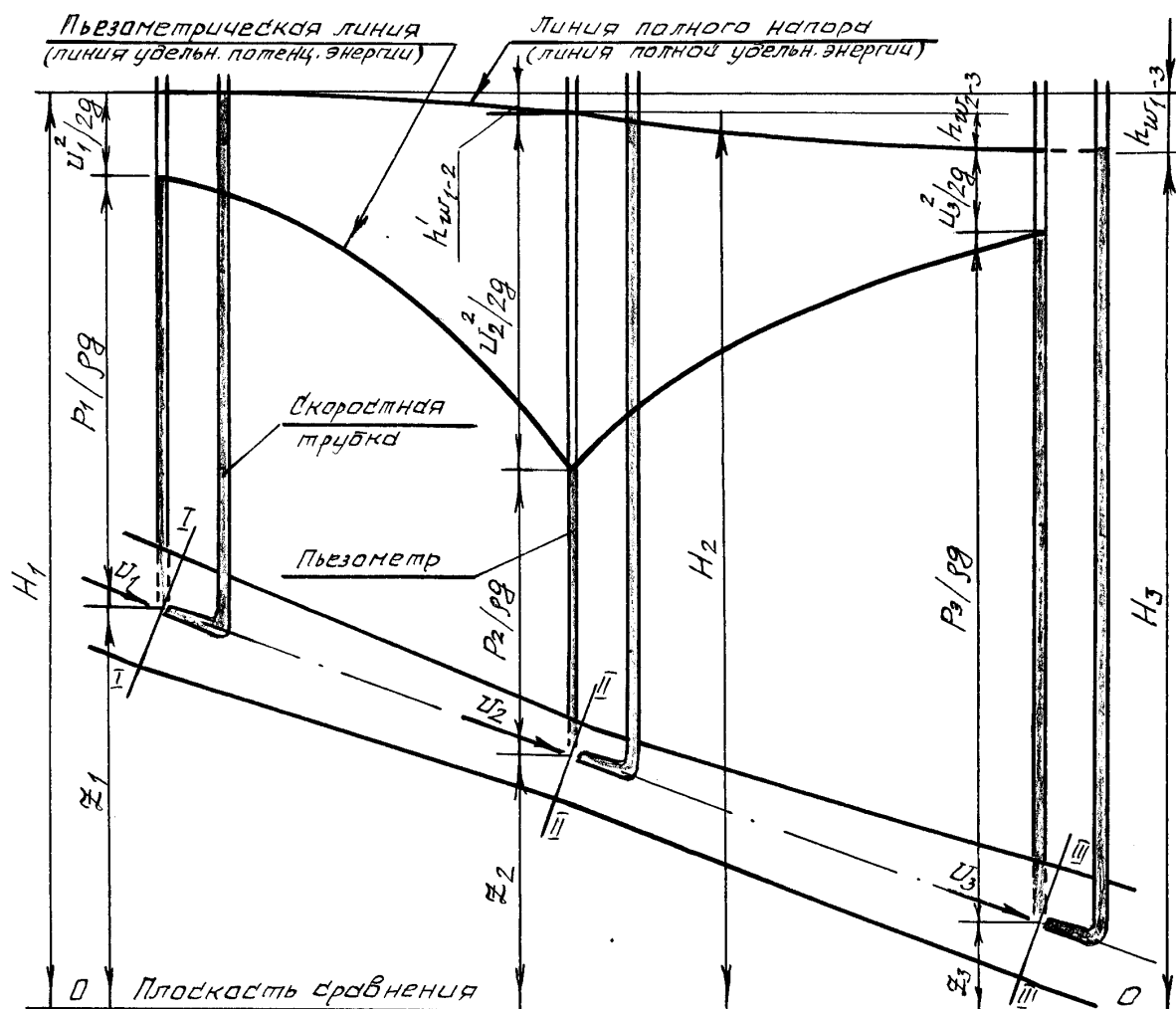
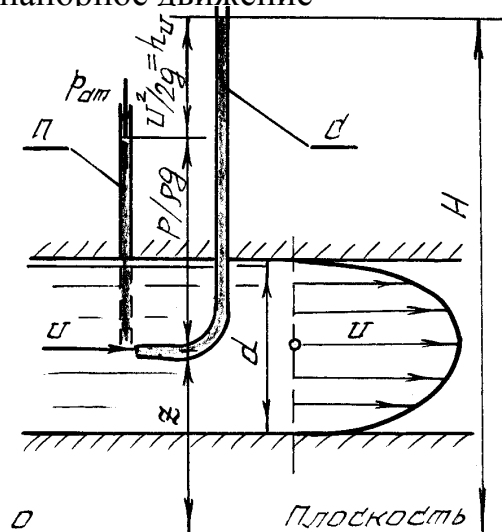


Рис. 1 Диаграмма уравнения Д. Бернулли для струйки реальной жидкости

а) напорное движение



б) безнапорное движение жидкости

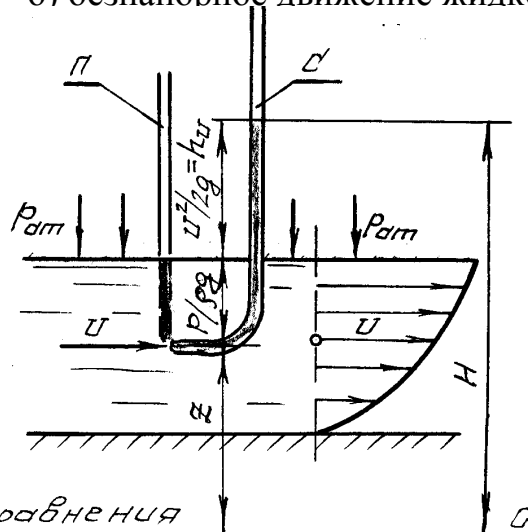


Рис. 2. К измерению скоростного напора  $U^2/2g$  при напорном и безнапорном движении жидкости

$$z + \frac{p}{\rho g} + \frac{U^2}{2g} - \text{полная удельная энергия;}$$

$$z + \frac{p}{\rho g} - \text{удельная потенциальная энергия;}$$

$h_{w_{1-2}}$  - потеря полной удельной энергии струйки, т.е. часть ее, затраченная на преодоление работы сил внутреннего трения, обусловленного вязкостью жидкости.

Удельной энергией называется энергия, приходящаяся на единицу веса жидкости.

Величины слагаемых уравнения (1) могут быть определены опытным путем следующим образом:

$z$  – геометрическим нивелированием или измерением линейкой;

$\frac{p}{\rho g}$  – с помощью пьезометрической трубки (пьезометра);

$\frac{U^2}{2g}$  – по разности отметок уровней жидкости в скоростной и пьезометрической трубках, подключенных к рассматриваемой точке живого сечения струйки;

$h_{w_{1-2}}$  - по разности отметок уровней воды в скоростных трубках, подключенных к сечениям I-I и II-II струйки реальной жидкости.

Скоростная трубка представляет собой трубку, верхний конец которой открыт в атмосферу, а нижний изогнут навстречу скорости  $U$  в рассматриваемой точке потока жидкости. Благодаря этому у входа в изогнутый конец скоростной трубки кинетическая энергия частицы жидкости преобразуется в потенциальную энергию давления столба жидкости высотой

$$h_U = \frac{U^2}{2g}.$$

Поскольку срез нижнего конца скоростной трубки перпендикулярен вектору скорости, а срез нижнего конца пьезометра параллелен, уровень жидкости в скоростной трубке всегда устанавливается выше, чем в пьезометре, на величину

$$\frac{U^2}{2g}.$$

Прибор, объединяющий конструктивно пьезометрическую (П) и скоростную (С) трубки, называется трубкой Пито и широко применяется для измерения скорости движения жидкости  $U = \sqrt{2gh_U}$ .

Для двух сечений потока реальной жидкости уравнение Д. Бернулли имеет вид



$$z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{\alpha_1 g_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{\alpha_2 g_2^2}{2g} + h_{w_{1-2}}, \quad (2)$$

где  $\frac{\alpha g^2}{2g}$  - скоростной напор, отвечающий средней скорости

$g = \frac{Q}{\omega}$  потока жидкости в рассматриваемом живом сечении (здесь  $Q$  - расход потока жидкости,  $\omega$  - площадь живого сечения потока);

$h_{w_{1-2}}$  - потеря полного напора (полной удельной энергии) на преодоление работы сил внутреннего и внешнего трения на пути между живыми сечениями потока жидкости I-I и II-II;

$\alpha$  - коэффициент Кориолиса (корректив кинетической энергии), учитывающий неравномерность распределения местных скоростей  $U$  по живому сечению потока, обусловленную вязкостью жидкости.

Величина  $\alpha$  зависит от режима течения жидкости, а также от вида движения. Так, при равномерном движении для ламинарного режима  $\alpha=2,0$ , а для турбулентного -  $\alpha=1,05 \dots 1,15$ .

Слагаемые уравнений (1) и (2) в различных живых сечениях можно изображать графически в виде диаграммы уравнения Д. Бернулли, дающей наглядное представление о перераспределении по пути движения жидкости потенциальной и кинетической энергии, а также о характере убывания полной энергии.

**Описание установки.** Установка представляет собой трубопровод переменного сечения с напорным баком, вода в который подается по питающему трубопроводу открытием вентиля. Напорный бак снабжен переливным устройством для поддержания уровня воды на постоянной отметке, чтобы обеспечить в трубопроводе переменного сечения установившееся движение жидкости. К сечениям I-I...II-II трубопровода переменного сечения подключены пьезометры и скоростные трубки для измерения величин  $z + \frac{p}{\rho g}$  и  $z + \frac{p}{\rho g} + \frac{U^2}{2g}$ . Величина расхода воды в трубопроводе переменного сечения регулируется вентилем. Для измерения расхода воды имеются мерный бак и секундомер.

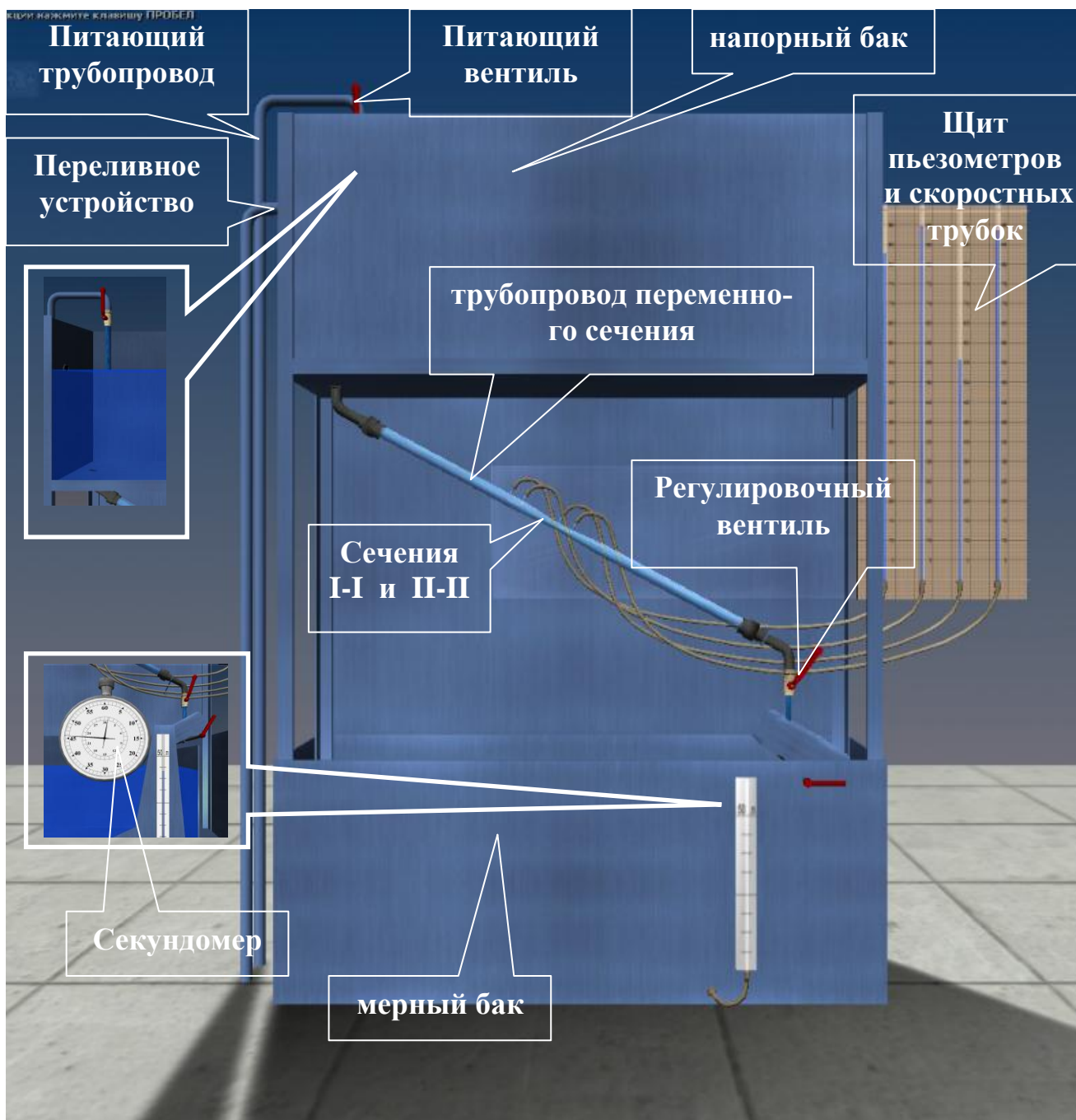


Рис. 3 Схема установки для экспериментальной иллюстрации слагаемых уравнения Д. Бернулли

**Цель работы.** 1. Определить опытным путем слагаемые  $z, \frac{p}{\rho g}, \frac{U^2}{2g}$  уравнения Д. Бернулли для сечений I-I...II-II, а также потери полного напора  $h_{w_{1-2}}$  между сечениями.

2. Вычислить средние скорости потока  $\bar{v}$  и отвечающие им скоростные напоры  $\frac{\bar{v}^2}{2g}$  для указанных живых сечений потока жидкости.

3. Построить в масштабе по опытным данным пьезометрическую линию и линию полного напора.

**Порядок выполнения работы.** 1. При закрытом регулирующем венти-  
ле открыть питающий ventиль для заполнения напорного бака и тру-  
бопровода переменного сечения водой. При этом следует обратить вни-  
мание на уровни воды в пьезометрических и скоростных трубках. Эти  
уровни при отсутствии воздуха в системе должны быть на одной отметке.

2. Открыть регулирующий ventиль так, чтобы трубопровод пе-  
ременного сечения работал полным сечением, а уровень воды в напорном  
баке был постоянным.

3. Измерить с помощью мерного бака  $Q$  и секундомера расход во-  
ды. Затем измерить геометрические высоты  $Z$  центров тяжести сечений  
I-I...II-II относительно плоскости сравнения 0-0, отмеченной на установке.

4. Определить по шкалам отметки уровней воды в пьезометрах и  
скоростных трубках в сечениях I-I...II-II. Результаты всех измерений за-  
писать в таблицу. Затем выполнить все вычисления, предусмотренные  
таблицей, и построить в масштабе по полученным данным линии полного  
напора и пьезометрическую.

5. Дать заключение по результатам работы.

### **Основные контрольные вопросы**

1. Поясните геометрический смысл слагаемых уравнения Д. Бернулли.
2. Поясните энергетический смысл слагаемых уравнения Д. Бернулли.
3. Как называется коэффициент  $\alpha$ , входящий в уравнение Д. Бернулли для потока реальной жидкости, что он учитывает, от чего зависит его величина и каков его физический смысл?
4. Объясните, чем обусловлены потери полного напора и каков их энергетический смысл?
5. Поясните, что понимают под термином "удельная энергия"?
6. Объясните термины "местная скорость" и "средняя скорость" и укажите, как определяют эти скорости?
7. Поясните, что такое скоростная трубка и трубка Пито?
8. Поясните, что такое линия полного напора и пьезометрическая линия; что будут представлять собой эти линии при равномерном движении реальной жидкости?
9. Что понимают под термином «живое сечение потока жидкости»?
10. Охарактеризуйте движение жидкости на пути между сечениями I-I - II-II, исходя из классификации движений жидкости.

Таблица .

№ поз	Наименования и обозначения измеряемых и вычисляемых величин	Ед. изм.	Результаты измерений и вычислений		
			I-I	II-II	III-III
1	2	3	4	5	6
1	Геометрические высоты центров тяжести сечений $z$	м			
2	Отметки уровней воды в пьезометрах, т.е. гидростатические напоры $\left(z + \frac{p}{\rho g}\right)$	м			
3	Отметки уровней воды в скоростных трубках, т.е. полные напоры $H = z + \frac{p}{\rho g} + \frac{U^2}{2g}$	м			
4	Пьезометрические высоты $\left(z + \frac{p}{\rho g}\right) - z$	м			
5	Скоростные высоты $\frac{U^2}{2g} = H - \left(z + \frac{p}{\rho g}\right)$	м			
6	Потери полного напора на пути между соседними живыми сечениями струйками $h_{W_{i-(i+1)}} = H_i - H_{i+1}$	м			
7	Суммарные потери полного напора $h_{W_{I-III}} = H_I - H_{III}$	м			
8	Объем воды в мерном баке $W$	м <sup>3</sup>			
9	Продолжительность наполнения объема $W$ в мерном баке $t$	с			
10	Расход воды в трубопроводе $Q = W/t$	м <sup>3</sup> /с			
11	Диаметр сечения $d$	м			
12	Площадь сечения $\omega$	м <sup>2</sup>			
13	Средняя скорость движения воды $g = Q/\omega$	м/с			
14	Скоростная высота, отвечающая средней скорости, $\frac{g^2}{2g}$	м			
15	Разность скоростных высот $\left(\frac{U^2}{2g} - \frac{g^2}{2g}\right)$	м			

**Примечание к табл. 3**

1. Для сечения III-III (см графу 6) числовые значения величин (см. позиции 5 и 11...15) те же, что и для сечения I-I.

2. Потери полного напора  $h_{w_{1-2}}$  (см. позицию 6) между сечениями II-II и III-III принять равными потерям напора между сечениями I-I и II-II
3. Остальные величины для сеч. III-III (см. позиции 1...4) следует определить с привлечением уравнения Д. Бернулли (см. уравнение 1) и рис. 1, вычерченного в масштабе.

### Учебная литература к работе 3

- 1.(с. 85...94, 97...114); 2.(с. 68...76); 3.(с.37...42); 4.(с. 61...64, с. 68...69);5.(с.84...88,с.98...104).

### Лабораторная работа 4

#### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ИЛЛЮСТРАЦИЯ ЛАМИНАРНОГО И ТУРБУЛЕНТНОГО РЕЖИМОВ ДВИЖЕНИЯ ЖИДКОСТИ, УСТАНОВЛЕНИЕ ЗАКОНОВ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ КРИТИЧЕСКОГО ЧИСЛА РЕЙНОЛЬДСА

**Вводная часть.** Многочисленными экспериментальными исследованиями установлено, что движение жидкости может происходить или при ламинарном, или при турбулентном режиме. Ламинарный режим наблюдается при небольших скоростях движения. При этом окрашенные струйки жидкости не перемешиваются, сохраняясь по всей длине потока, т.е. движение жидкости при ламинарном режиме является струйчатым, перемешивание частиц жидкости отсутствует.

Турбулентный режим наблюдается при значительных скоростях и характеризуется интенсивным перемешиванием частиц жидкости, что обуславливает пульсацию скоростей и давления.

Средняя скорость потока, при которой происходит смена режима движения жидкости, называется критической ( $v_{кр}$ ). Величина ее, как показывают опыты в трубопроводах круглого сечения, зависит от рода жидкости, характеризуемого динамической вязкостью  $\mu$  и плотностью  $\rho$ , а также от диаметра трубопровода  $d$ . Одновременно опытами установлено, что величина безразмерного алгебраического комплекса, отвечающего критической скорости  $v_{кр}$ :

$$Re_{кр(d)} = \frac{v_{кр} \rho d}{\mu} = \frac{v_{кр} d}{\nu} \approx 2320 = const, \quad (1)$$

от  $\mu$ ,  $\rho$  и  $d$  не зависит.

$Re_{кр(d)}=2320$ , называется критическим числом Рейнольдса. Устойчивый ламинарный режим наблюдается при значениях числа Рейнольдса

$Re_{(d)} = \frac{vd}{\nu} < Re_{кр(d)} \approx 2320$ , а турбулентный – при

$Re_{(d)} > Re_{kp(d)} \approx 2320$ . Таким образом, **число Рейнольдса**

$$Re_{(d)} = \frac{vd}{\nu} \quad (2)$$

является критерием, позволяющим судить о режиме движения жидкости в круглой трубе, работающей полным сечением.

Величину  $\nu = \frac{\mu}{\rho}$ , входящую в формулы (1) и (2), называют кинематическим коэффициентом вязкости жидкости.

Из изложенного следует, что для определения режима движения жидкости в круглом трубопроводе при напорном движении достаточно вычислить по формуле (2) число Рейнольдса и сравнить его с критическим.

Знание режима движения жидкости необходимо для правильной оценки потерь напора при гидравлических расчетах. Как показывают опыты в круглых трубах при напорном равномерном движении (результаты их представлены на рис.1 в виде графика зависимости потерь напора по длине  $h_l$  от средней скорости  $U$ ), при ламинарном режиме потери напора  $h_l$  пропорциональны средней скорости  $U$  в первой степени, а при турбулентном - в степени  $1,75 \leq m \leq 2$ . Заметим, что с помощью этого графика определяют величину критической скорости  $U_{кр}$ , а через нее - и критическое число Рейнольдса по формуле (1).

**Описание установки.** Установка включает в себя расположенную горизонтально стеклянную трубу ( $d=1,0$  см), в которой и изучается движение воды при различных режимах, напорный бак, емкость с раствором красителя, подаваемого открытием краника по трубке во входное сечение стеклянной трубы. Для измерения расхода воды в стеклянной трубке служат мерная емкость и секундомер.

Вода в напорный бак подается по питающему трубопроводу открытием вентиля из резервуара лаборатории. Для поддержания уровня воды в напорном баке во время опытов на постоянной отметке имеется переливное устройство. Температура воды в напорном баке измеряется термометром.

Регулирование расхода воды, а следовательно и средней скорости ее движения в стеклянной трубке, осуществляется краном. На стеклянной трубке имеются пьезометры для определения потерь напора по длине  $h_l$  (по разности их показаний).



**Цель работы:** 1. Убедиться на опыте путем окрашивания струйки воды в стеклянной трубе в существовании ламинарного и турбулентного режимов.

2. Вычислить по данным опытов, проведенных на этой трубе, числа Рейнольдса при ламинарном и турбулентном режимах, сравнить их с критическим, убедиться, что при ламинарном режиме  $Re < Re_{кр}$ , а при турбулентном –  $Re > Re_{кр}$ .

3. Построить по опытным данным график  $lgh_l = f(lg v)$ , определить с его помощью критическую скорость  $v_{кр}$ , а через нее вычислить критическое число  $Re_{кр(d)} = \frac{v_{кр} d}{\nu}$ .

4. Подтвердить с помощью графика  $lgh_l = f(lg v)$ , что при ламинарном режиме потери напора по длине  $h_l$  пропорциональны средней скорости в первой степени, а при турбулентном - в степени  $1,75 \leq m \leq 2$ .

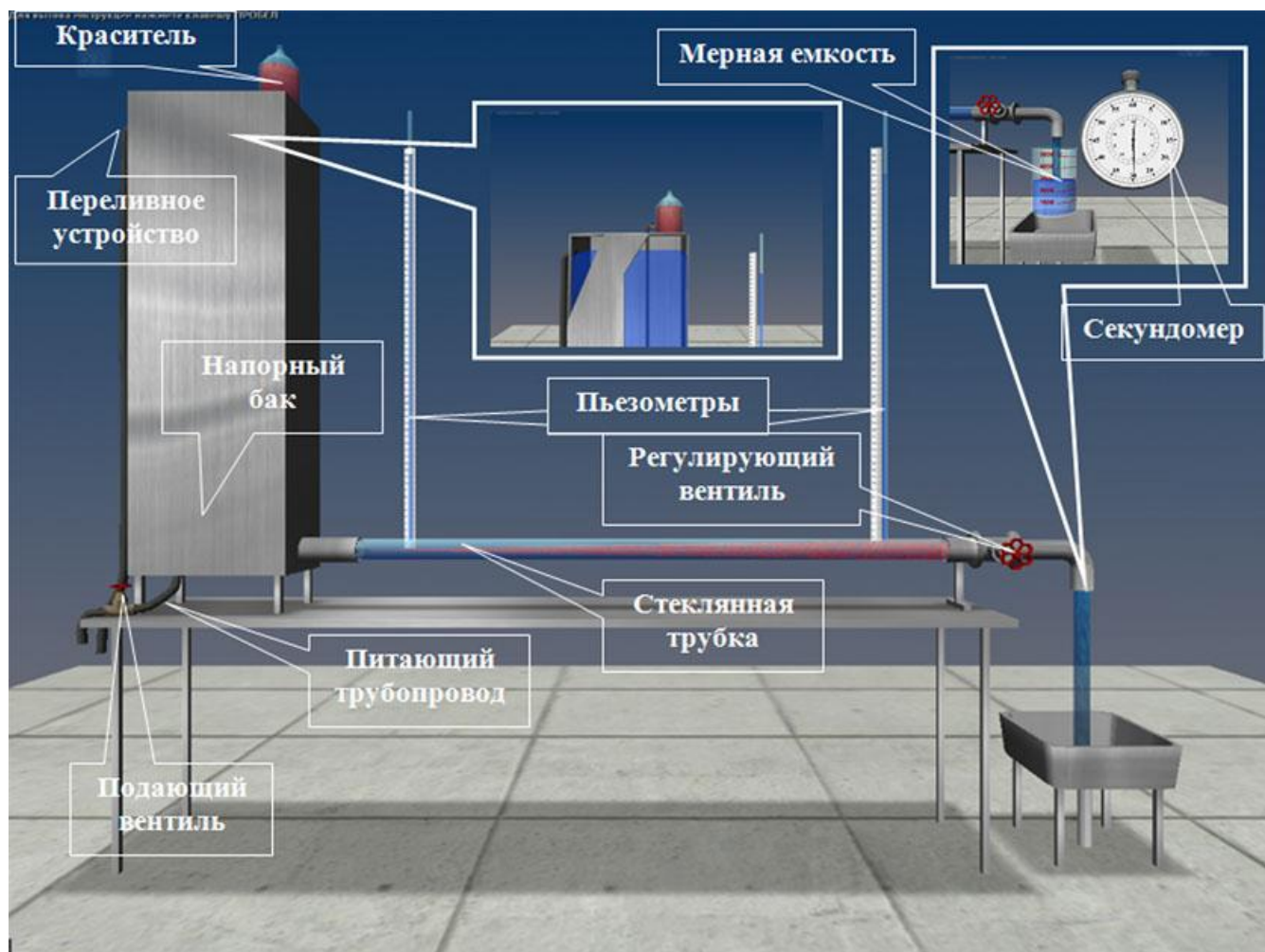


Рис. 2. Схема установки для изучения режимов движения жидкости.



**Порядок выполнения работы.** 1. Открыть подающий клапан на питающем трубопроводе и наполнить водой напорный бак настолько, чтобы работало переливное устройство.

2. Открыть незначительно регулирующий клапан на стеклянной трубке, чтобы скорость движения воды в ней была небольшой (вода должна течь тонкой струйкой).

3. Приоткрыть кран на емкости с красителем и направить в стеклянную трубку небольшое количество раствора красителя, чтобы окрашенная струйка воды представляла собой отчетливо выраженную нить по всей длине трубы.

4. Измерить с помощью мерной емкости и секундомера расход воды  $Q$  в трубе.

5. Измерить температуру воды в напорном баке термометром.

6. Результаты измерений записать в таблицу 1.

7. Увеличить открытием регулирующего клапана скорость движения воды в стеклянной трубке, но так, чтобы окрашенная струйка жидкости сохранялась, т.е. чтобы режим остался ламинарным, и, выполнив те же измерения, что и в первом опыте, записать их результаты в таблицу 1.

8. Дальнейшим увеличением открытия регулирующего клапана создать в стеклянной трубке турбулентный режим (об этом будет свидетельствовать интенсивное перемешивание с водой раствора красителя) и выполнить третий и четвертый опыты так, как описано выше. Результаты измерений записать в таблицу 1.

9. Для заполнения таблицы 2 сделать десять аналогичных опытов, увеличивая в каждом опыте открытие регулирующего клапана в диапазоне от 0 до 100% так, чтобы 4-5 замеров были выполнены в ламинарном режиме, а 5-6 - в турбулентном. Результаты измерений записать в табл. 2.

10. Выполнить все вычисления, предусмотренные табл. 1 и 2.

11. Построить в масштабе по данным табл. 2 график  $lgh_l = f(lgv)$  и определить с его помощью критическую скорость  $v_{кр}$ , а через неё и

$Re_{крон} = \frac{v_{кр} \cdot d}{\nu}$ , а также показатели степени  $m_l$  и  $m_T$  и коэффициенты пропорциональности  $B_l$  и  $B_T$ .

13. Дать заключение по результатам работы.

### Основные контрольные вопросы

1. Назовите режимы движения жидкости и укажите их характерные особенности.
2. Поясните, что такое критерий Рейнольдса, и назовите факторы, от которых он зависит, и укажите, в чем заключается его физический смысл?

3. Поясните, что такое критическое число Рейнольдса?
4. Поясните, каким образом при гидравлических расчётах определяют режим движения жидкости и, с какой целью?
5. Поясните, что такое критическая скорость, от каких факторов она зависит и как её определяют?
6. Напишите и поясните аналитические зависимости потерь напора по длине от средней скорости потока при ламинарном и турбулентном режимах движения жидкости.
7. Изобразите график зависимости потерь напора по длине от средней скорости ( в логарифмических координатах) и дайте пояснения к нему.

Таблица 1

№ позиции	Наименования и обозначения измеряемых и вычисляемых величин	Ед. изм.	Рез. измерений и вычислений			
			Ламин. режим		Турбул. режим	
			Опыт 1	Опыт 2	Опыт 3	Опыт 4
1	2	3	4	5	6	7
1	Объём воды в мерном сосуде $W$	см <sup>3</sup>				
2	Время наполнения объёма $t$	с				
3	Расход воды $Q = W/t$	см <sup>3</sup> /с				
4	Внутренний диаметр стеклянной трубы $d$	см				
5	Площадь попереч. сечения трубы $\omega = \pi d^2/4$	см <sup>2</sup>				
6	Средняя скорость движения воды $v = Q/\omega$	см/с				
7	Температура воды $T$	°C				
8	Кинематический коэффициент вязкости воды $\nu$ (по справочнику)	см <sup>2</sup> /с				
9	Число Рейнольдса $Re_d = \frac{v \cdot d}{\nu}$	-				
10	Критическое число Рейнольдса $Re_{кр(d)спр}$ (по справочнику)	-				

Таблица 2

№ № пози- ций	Наименования и обозначения измеряемых и вычисляемых величин	Ед. изм.	Результаты измерений и вычислений									
			Номера опытов									
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1	Объём воды в мерном сосуде $W$	см <sup>3</sup>										
2	Время наполнения $t$	с										
3	Расход воды $Q = W/t$	см <sup>3</sup> /с										
4	Внутренний диаметр трубы $d$	см										
5	Площадь попереч. сече- ния трубы $\omega = \pi d^2/4$	см <sup>2</sup>										
6	Средняя скорость потока $v = Q/\omega$	см/с										
7	Логарифм средней ско- рости $\lg v$	-										
8	Отметка уровня воды в пьезометре 1, $\nabla_1$	см										
9	Отметка уровня воды в пьезометре 2, $\nabla_2$	см										
10	Потеря напора по длине $h_l = \nabla_1 - \nabla_2$	см										
11	Логарифм потери напора по длине $\lg h_l$	-										
12	Температура воды $T$	°C										
13	Кинематический коэф- фициент вязкости воды $\nu$ (по справочнику)	см <sup>2</sup> /с										

8. Поясните, как определяются  $Re$  и  $Re_{кр}$  для труб некруглого сечения?

9. Поясните, почему график  $h_l = f(\vartheta)$  строят в логарифмических координатах?

10. Поясните, что такое гидравлический радиус и что он характеризует?

### Учебная литература к работе 4

1.(с.124...128, 140...144); 2.(с.147...152); 3.(с.62...65, с.69..72, с.82...84); 4.(с.76...81); 5.(с.110...118).

### Лабораторная работа 5

## ИЗУЧЕНИЕ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ СОПРОТИВЛЕНИЙ НАПОРНОГО ТРУБОПРОВОДА С ОПРЕДЕЛЕНИЕМ КОЭФФИЦИЕНТОВ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО ТРЕНИЯ И МЕСТНЫХ СОПРОТИВЛЕНИЙ

**Вводная часть.** Экспериментальными исследованиями установлено, что при движении жидкости часть полного напора (энергии) затрачивается на преодоление работы сил вязкости и инерции, т.е. возникают **потери напора**.

При равномерном движении жидкости гидравлическое сопротивление, проявляющееся равномерно по всей длине потока, называют сопротивлением по длине, а вызываемые им потери напора - **потерями напора по длине** ( $h_l$ ). Эти потери в круглых трубопроводах, работающих полным сечением, вычисляют по формуле Дарси-Вейсбаха:

$$h_l = \lambda \frac{l}{d} \frac{v^2}{2g}, \quad (1)$$

где  $\lambda$  - безразмерный коэффициент, называемый коэффициентом гидравлического трения (**коэффициентом Дарси**). Величина коэффициента  $\lambda$  характеризует гидравлическое сопротивление трубопровода и зависит в общем случае от числа Рейнольдса  $Re$  и относительной шероховатости  $\Delta_s/d$  трубопровода, т.е.  $\lambda=f(Re, \Delta_s/d)$ ;

$l, d$  – длина и внутренний диаметр трубопровода;

$v$  – средняя скорость движения потока жидкости.

Величину коэффициента  $\lambda$  при гидравлических экспериментах вычисляют по опытным данным из формулы (1). При гидравлических же расчетах – по эмпирическим и полуэмпирическим формулам, например, при ламинарном режиме  $\lambda_l=64/Re$ , а при турбулентном режиме движения и работе трубопровода в области доквадратичного сопротивления – по формуле А.Д. Альтшуля:

$$\lambda_{\text{до кв.}} = 0,11 \left( \frac{\Delta_s}{d} + \frac{68}{Re} \right)^{0,25}. \quad (2)$$

Величину **абсолютной эквивалентной шероховатости**  $\Delta_s$  при расчетах берут из справочной литературы в зависимости от материала трубопровода и состояния его внутренней поверхности. Например, для труб из

органического стекла  $\Delta_3=0,006$  мм, а для стальных водопроводных умеренно заржавленных труб  $\Delta_3=0,20\dots0,50$  мм.

Область гидравлического сопротивления при расчетах определяют или непосредственно по графикам  $\lambda=f(Re, \Delta_3/d)$ , полученным опытным путем для труб из различных материалов и приведенным в справочной литературе, или же с помощью соотношений  $\frac{10d}{\Delta_3}$  и  $\frac{500d}{\Delta_3}$ , предложенных А.Д. Альтшулем на основе использования упомянутых графиков. В последнем случае вычисляют соотношения  $\frac{10d}{\Delta_3}$  и  $\frac{500d}{\Delta_3}$  и сравнивают их с

числом Рейнольдса  $Re_{(d)} = \frac{vd}{\nu}$ . При этом, если  $Re \geq \frac{500d_3}{\Delta_3}$ , трубопро-

вод работает в области **квадратичного сопротивления**. Если  $Re \leq \frac{10d}{\Delta_3}$ , трубопровод работает в области **гидравлически гладких труб**. Если же  $\frac{10d}{\Delta_3} < Re < \frac{500d_3}{\Delta_3}$ , трубопровод работает в области **доквадратичного сопротивления**.

Следует иметь в виду, что для каждой области гидравлического сопротивления предложены и используются при гидравлических расчетах свои формулы для вычисления коэффициента  $\lambda$ .

Другой вид гидравлических сопротивлений, возникающих в местах резкого изменения конфигурации потока – изменение скорости потока по величине или направлению, называют местными сопротивлениями, а вызываемые ими потери напора - **местными потерями напора** ( $h_m$ ).

При прохождении через любое местное сопротивление поток жидкости деформируется, вследствие чего движение становится неравномерным, резко изменяющимся, для которого характерны :

- а) значительное искривление линий тока и живых сечений потока;
- б) отрывы транзитной струи от стенок трубопровода (ввиду действия закона инерции) и возникновение в местах отрыва устойчивых водоворотов;
- в) повышенная (по сравнению с равномерным движением) пульсация скоростей и давлений;
- г) изменение формы ( переформирование ) эпюр скоростей.

Местные потери напора при гидравлических расчетах вычисляют по формуле Вейсбаха :

$$h_m = \zeta \frac{v^2}{2g}, \quad (3)$$

где  $\zeta$  - безразмерный коэффициент, называемый **коэффициентом местного сопротивления**;

$U$  - средняя скорость потока в сечении за местным сопротивлением, т.е. ниже по течению (если скорость  $U$ , как исключение, принимается перед местным сопротивлением, это обязательно оговаривается).

Величина коэффициента  $\zeta$  зависит в общем случае от числа Рейнольдса  $Re$  и от конфигурации, т.е. формы проточной части местного сопротивления. В частном случае, когда трубопровод, на котором расположено местное сопротивление, работает в области квадратичного сопротивления, величина коэффициента  $\zeta$  от  $Re$  не зависит.

Величину  $\zeta$  для каждого вида местного сопротивления определяют по данным гидравлических экспериментов, пользуясь формулой (3). Полученные таким образом значения коэффициентов  $\zeta$  для различных видов местных сопротивлений берутся при гидравлических расчётах (обычно при квадратичной области сопротивления) из справочной и специальной литературы. Исключением являются резкое расширение и резкое сужение трубопровода, для которых численные значения коэффициентов  $\zeta$  определяются по формулам, полученным теоретически и полуэмпирически. При резком расширении трубопровода, когда средняя скорость в формуле (3) взята перед местным сопротивлением, т.е.  $U_1$ ,

$$\zeta'_{pp} = (1 - \omega_1 / \omega_2)^2. \quad (4)$$

Если же скорость берется за местным сопротивлением, т.е.  $U_2$ , то

$$\zeta''_{pp} = (\omega_2 / \omega_1 - 1)^2. \quad (5)$$

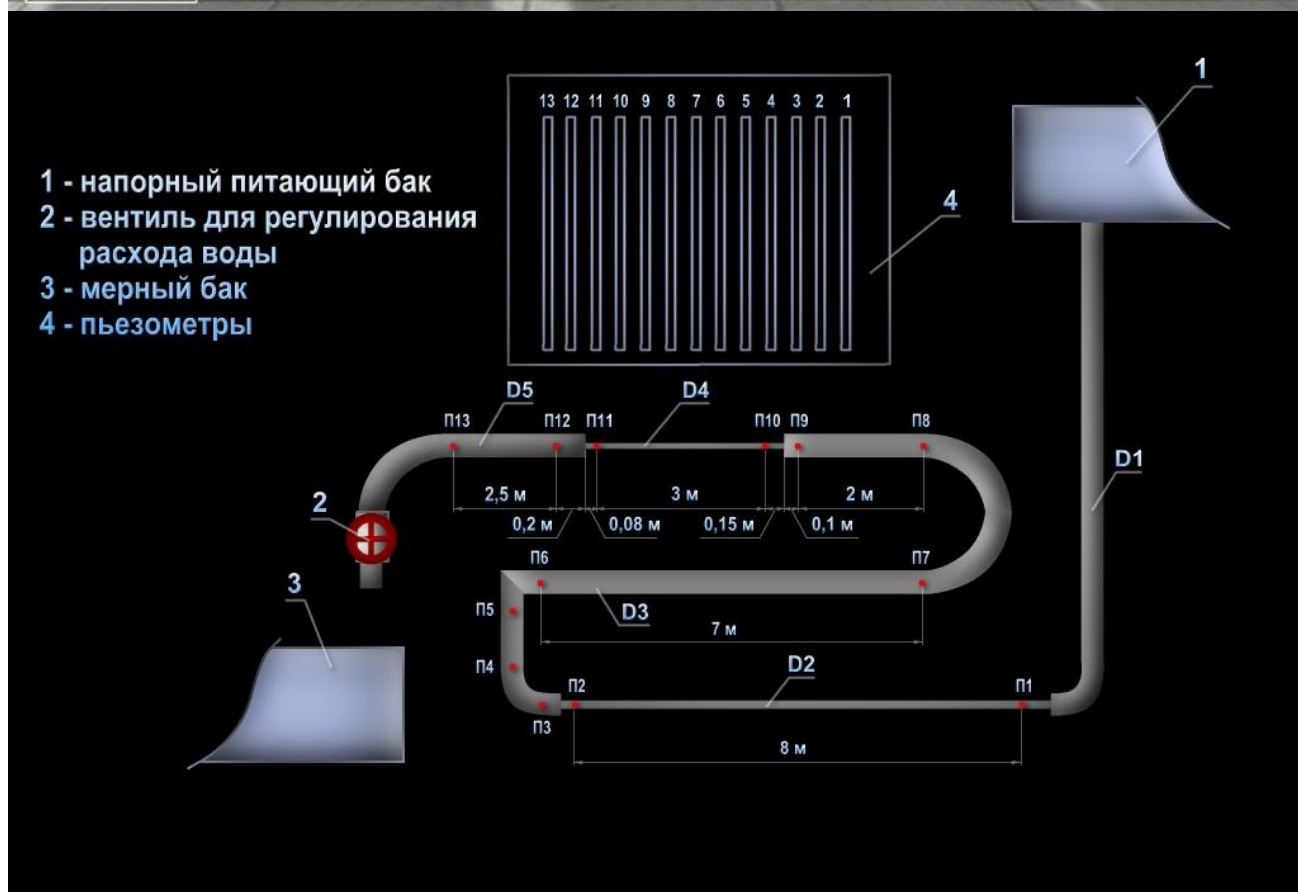
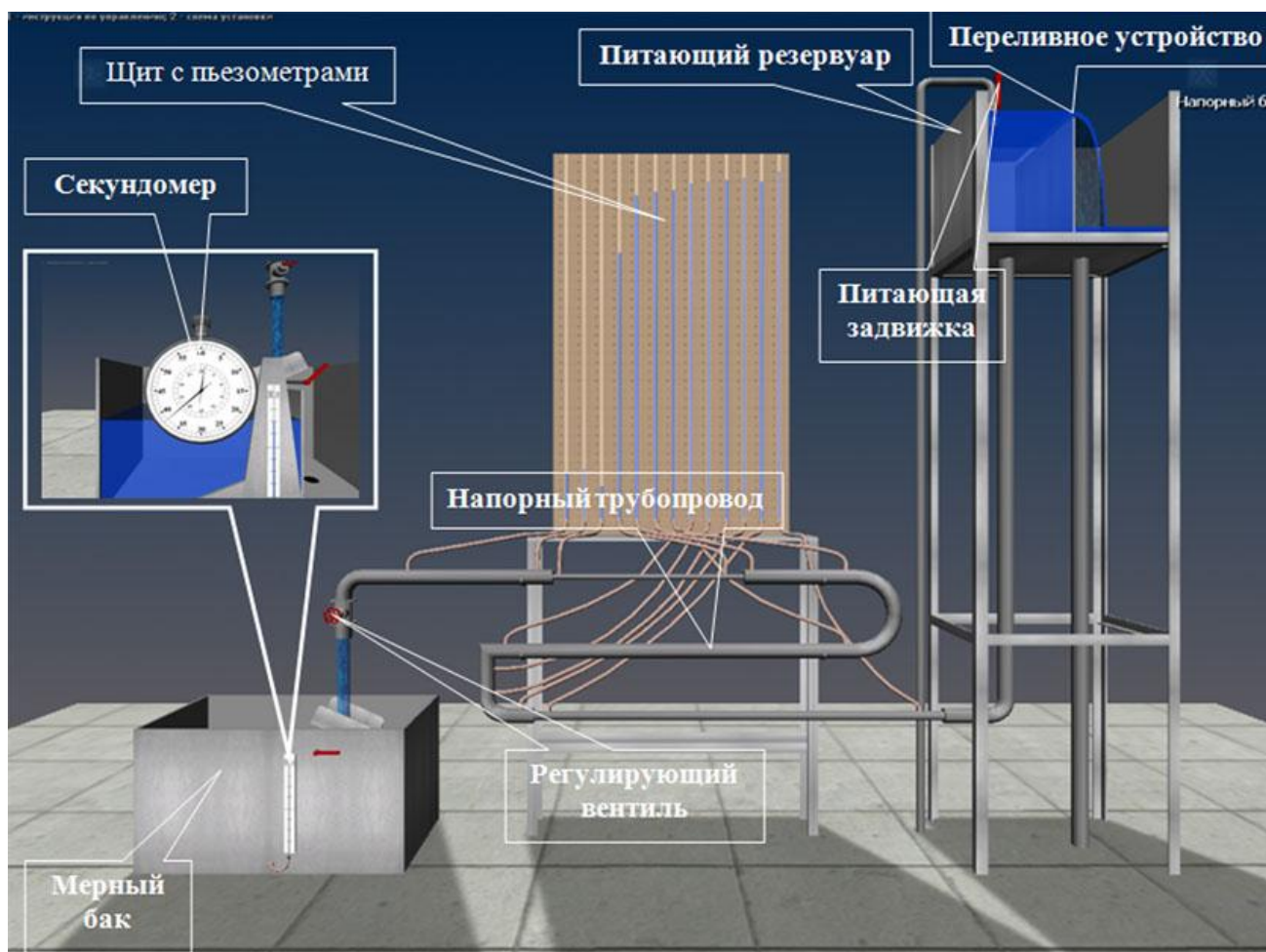
Коэффициент сопротивления при резком сужении трубопровода ( $\zeta_{p.c.}$ ) принято относить к скорости после сужения. При этом

$$\zeta_{p.c} = \left( \frac{1}{\varepsilon} - 1 \right)^2, \quad (6)$$

где  $\varepsilon = \frac{1}{1 + \sqrt{1 - \omega_2 / \omega_1}}$  - коэффициент сжатия струи.

**Описание установки.** Установка представляет собой **напорный трубопровод** с последовательно расположенными на нем гидравлическими сопротивлениями (по длине и местными). К каждому гидравлическому сопротивлению подключено по два **пьезометра** (перед и за ним). Все пьезометры для удобства работы выведены на **щит**. Для регулирования расхода воды  $Q$  в системе служит **вентиль**. Величина  $Q$  измеряется с помощью **мерного бака** и **секундомера**. Подача воды в систему осуществляется

из питающего резервуара по трубе открытием затворки. Постоянный уровень воды в питающем резервуаре ( для обеспечения установившегося движения в системе) поддерживается переливным устройством.



### Рис.1. Схема установки для изучения гидравлических сопротивлений

**Цель работы:** 1. Определить по опытным данным, воспользовавшись формулами (1) и (3), значения коэффициента гидравлического трения  $\lambda_{on}$  и величины коэффициента  $\zeta$  для трех видов местных сопротивлений;

2. Установить, воспользовавшись соотношениями А.Д. Альтшуля области гидравлического сопротивления, в которых работали участки напорного трубопровода;

3. Вычислить значения коэффициентов гидравлического трения  $\lambda$  по соответствующим эмпирическим формулам;

4. Найти справочные значения коэффициентов местных сопротивлений;

5. Оценить сходимость  $\lambda_{on}$  и  $\zeta_{on}$  с их расчетными (справочными) значениями.

6. Построить по опытным данным ( в масштабе) график напоров для участка предложенного преподавателем.

**Порядок выполнения работы.** Открыть питающую задвижку и наполнить установку водой. После наполнения водой резервуара и стабилизации уровня воды в нем ( переливное устройство должно при этом работать) следует открытием регулирующего вентиля подать воду в систему трубопроводов. Далее, необходимо измерить: отметки уровней воды в пьезометрах, расход воды в системе ( с помощью мерного бака и секундомера), а также ее температуру (термометром в питающем резервуаре). Результаты измерений для одного опыта (при одном расходе воды) записать в таблицу.

Обработать опытные данные и результаты представить в виде таблицы. Сформулировать выводы по результатам работы.

При закрытом вентиле 2 и задвижке 6 включить насос и обеспечить

#### Основные контрольные вопросы

1. Напишите и поясните формулы Дарси-Вейсбаха и Вейсбаха.
2. Поясните, как опытным путем определяют величины коэффициентов  $\lambda$  и  $\zeta$ .
3. Что характеризуют коэффициенты  $\lambda$  и  $\zeta$ , от каких факторов в общем случае они зависят и как их определяют при гидравлических расчетах?
4. Объясните, что такое  $\Delta_z$  и  $\Delta_z/d$ , как найти величину  $\Delta_z$  при гидравлических расчетах?
5. Назовите области гидравлического сопротивления трубопроводов и объясните, как определяют область сопротивления при гидравлических расчетах.
6. Изобразите схемы движения жидкости при резком повороте трубы на  $90^\circ$ , а также при резком расширении и резком сужении трубопровода и





## Лабораторная работа 6

### ИЗУЧЕНИЕ ИСТЕЧЕНИЯ ЖИДКОСТИ ЧЕРЕЗ МАЛЫЕ ОТВЕРСТИЯ В ТОНКОЙ СТЕНКЕ И НАСАДКИ ПРИ ПОСТОЯННОМ НАПОРЕ В АТМОСФЕРУ

**Вводная часть.** Малым считается отверстие, высота которого не превышает  $0,1 H$  (рис. 1). Здесь  $H$  - превышение свободной поверхности жидкости над центром тяжести отверстия.

Стенку считают тонкой, если ее толщина  $\delta < (1,5...3,0)d$  (рис. 1). При выполнении этого условия величина  $\delta$  не влияет на характер истечения жидкости из отверстия, так как вытекающая струя жидкости касается только острой кромки отверстия.

Поскольку частицы жидкости движутся к отверстию по криволинейным траекториям, то за счет сил инерции струя, вытекающая из отверстия, сжимается. Благодаря действию сил инерции струя продолжает сжиматься и после выхода из отверстия. Наибольшее сжатие струи, как показывают опыты, наблюдается в сечении с-с на расстоянии примерно  $(0,5...1,0)d$  от входной кромки отверстия (рис. 1). Это сечение называют сжатым. Степень сжатия струи в этом сечении оценивают величиной

**коэффициента сжатия  $\varepsilon$ :**

$$\varepsilon = \frac{\omega_c}{\omega}, \quad (1)$$

где  $\omega_c$  и  $\omega$  - соответственно площадь сжатого живого сечения струи и площадь отверстия.

Среднюю скорость струи  $\mathcal{G}_c$  в сжатом сечении с-с при  $p_0 = p_{at}$  вычисляют по формуле, полученной из уравнения Д. Бернулли, составленного для сечений I-I и с-с (рис. 1):

$$\mathcal{G}_c = \varphi \sqrt{2gH}, \quad (2)$$

где  $\varphi$  - коэффициент скорости отверстия.

$$\varphi = \frac{1}{\sqrt{\alpha + \zeta}} \approx \frac{1}{\sqrt{1 + \zeta}}. \quad (3)$$

Исходя из уравнения траектории струи, вытекающей из отверстия, получено еще одно выражение для коэффициента  $\varphi$ :

$$\varphi = \frac{x_i}{2\sqrt{y_i H}}. \quad (4)$$

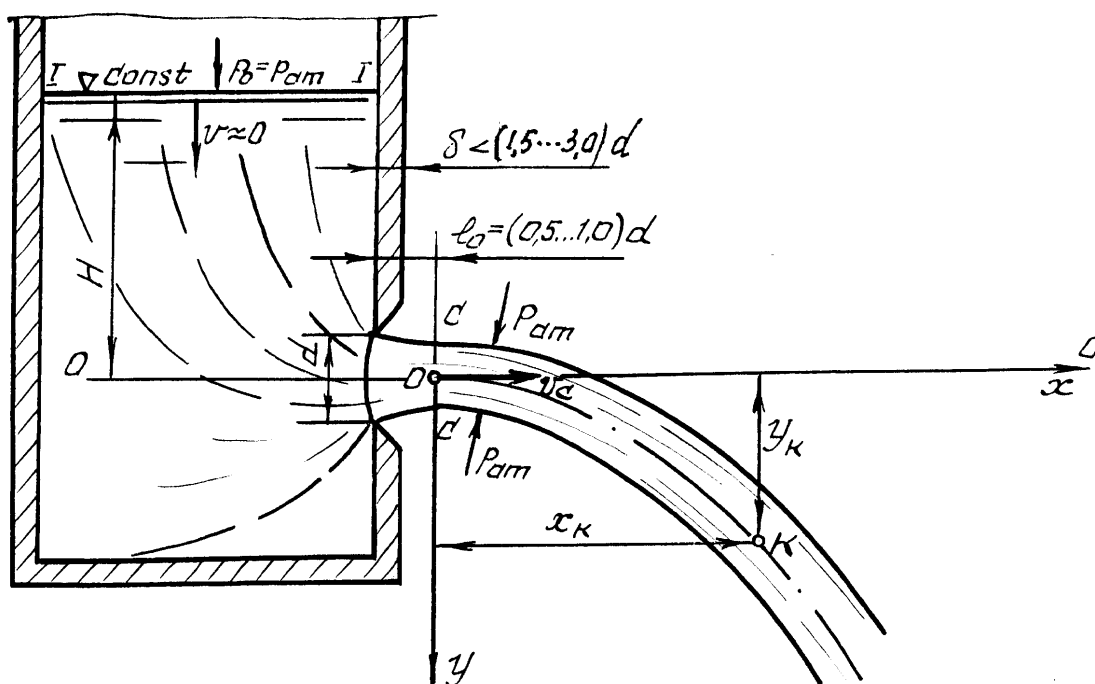


Рис. 1. Истечение жидкости из малого отверстия в тонкой стенке в атмосфере

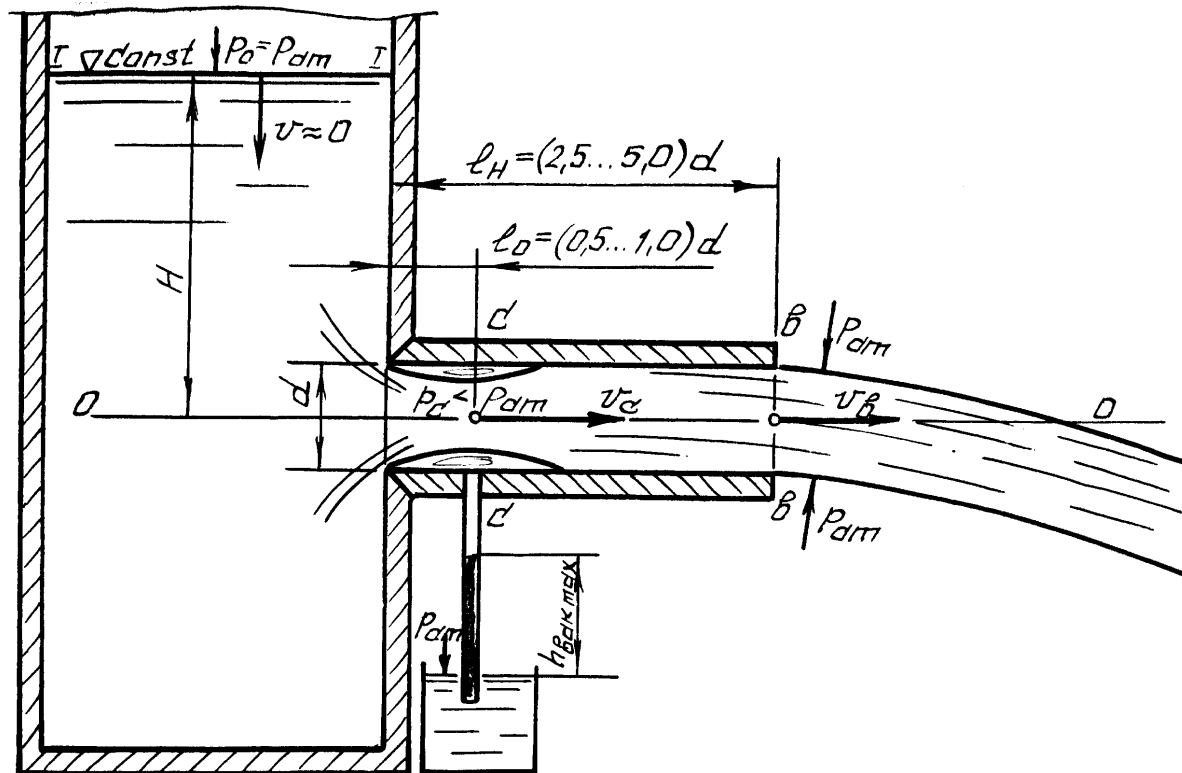


Рис. 2. Истечение жидкости из внешнего цилиндрического насадка в атмосфере

В формулах (3) и (4)  $\alpha$  - коэффициент Кориолиса,  $\zeta$  - **коэффициент сопротивления отверстия**,  $x_i$  и  $y_i$  - координаты произвольно взятой точки траектории струи.

Поскольку напор теряется главным образом вблизи отверстия, где скорости достаточно велики, при истечении из отверстия во внимание принимают только **местные потери напора**.

Расход жидкости  $Q$  через отверстие вычисляем как

$$Q = \varphi \varepsilon \omega \sqrt{2gH}, \quad (5)$$

где

$$\varphi \varepsilon = \mu. \quad (6)$$

Здесь  $\mu$  - коэффициент расхода отверстия, учитывающий влияние гидравлического сопротивления и сжатия струи на расход жидкости. С учетом выражения для  $\mu$  формула (5) принимает вид

$$Q = \mu \omega \sqrt{2gH}. \quad (7)$$

Величины коэффициентов  $\varepsilon$ ,  $\zeta$ ,  $\varphi$ ,  $\mu$  для отверстий определяют опытным путем. Установлено, что они зависят от формы отверстия и числа Рейнольдса. Однако при больших числах Рейнольдса ( $Re \geq 10^5$ ) указанные коэффициенты от  $Re$  не зависят и для круглых и квадратных отверстий при совершенном сжатии струи равны:  $\varepsilon = 0,62 \dots 0,64$ ,  $\zeta = 0,06$ ,  $\varphi = 0,97 \dots 0,98$ ,  $\mu = 0,60 \dots 0,62$ .

Насадкой называют патрубок длиной  $2,5d \leq L_H \leq 5d$  (рис. 2), присоединенный к малому отверстию в тонкой стенке с целью изменения гидравлических характеристик истечения ( скорости, расхода жидкости, траектории струи).

Насадки бывают цилиндрические ( внешние и внутренние), конические (сходящиеся и расходящиеся) и коноидальные, т.е. очерченные по форме струи, вытекающей из отверстия.

Использование насадка любого типа вызывает увеличение расхода жидкости  $Q$  благодаря вакууму, возникающему внутри насадка в области сжатого сечения с-с (см.рис. 2) и обуславливающему повышение напора истечения.

Среднюю скорость истечения жидкости из насадка  $\mathcal{G}$  и расход  $Q$  определяют по формулам, полученным из уравнения Д. Бернулли, записываемого для сечений 1-1 и в-в (рис. 2):

$$\mathcal{G} = \varphi_H \sqrt{2gH}. \quad (8)$$

Здесь  $\varphi_H = \frac{1}{\sqrt{\alpha + \zeta_H}}$  - коэффициент скорости насадка,

$\zeta_H$  - коэффициент сопротивления насадка.

Для выходного сечения в-в коэффициент сжатия струи  $\varepsilon = 1$ , так как насадок здесь работает полным сечением. Поэтому коэффициент расхода насадка  $\mu_H = \varphi_H$ .

Расход жидкости, вытекающий из насадка, вычисляется по формуле, аналогичной формуле (7):

$$Q = \mu_H \omega \sqrt{2gH}. \quad (8)$$

**Описание установки.** Установка представляет собой напорный резервуар, в боковой поверхности которого имеется отверстие, закрываемое рычажным клапаном. Перед отверстием (снаружи резервуара) смонтирован поворотный круг с круглым отверстием и насадками различных типов. Поворачивая круг, можно установить против отверстия насадок нужного типа или отверстие требуемой формы. Вода в резервуар подается по трубопроводу открытием задвижки. Постоянный уровень воды в резервуаре во время опытов поддерживается переливной трубой.

Для определения напора истечения  $H$  резервуар снабжен водомерной трубкой со шкалой, нуль которой совмещен с центром отверстия. Расход воды при истечении из отверстий и насадок измеряется с помощью передвижного мерного бака и секундомера. Координаты  $X$  и  $Y$  произвольных точек траектории струи измеряются с помощью координатной сетки, нанесенной на щит.

**Цель работы:** 1. Определить по опытным данным величины коэффициентов:  $\mu_{on}$ ,  $\varphi_{on}$ ,  $\varepsilon_{on}$ ,  $\zeta_{on}$ , при истечении воды через малое круглое отверстие диаметром  $d = 2$  см при постоянном напоре в атмосферу и величины коэффициентов  $\mu_{Hon} = \varphi_{Hon}$  и  $\zeta_{Hon}$  для внешнего цилиндрического и конических (сходящегося и расходящегося) насадков при  $H = \text{Const}$  в атмосферу.

2. Сравнить значения коэффициентов, полученные в опытах, со справочными и подсчитать относительные отклонения.

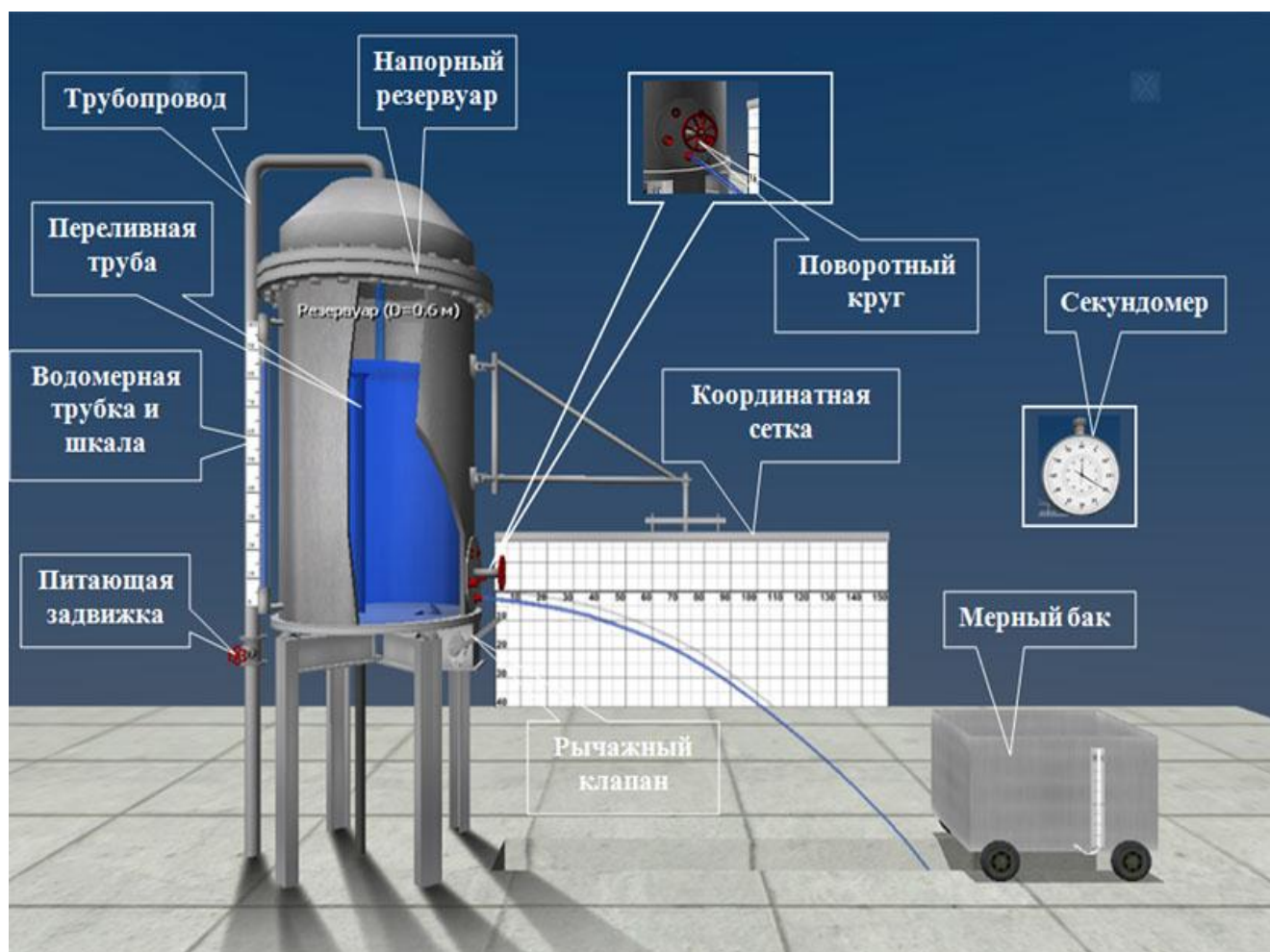


Рис. 3 Схема установки для изучения истечения жидкости через отверстия и насадки.

### Порядок выполнения работы.

1. Открыть задвижку, заполнить водой резервуар настолько, чтобы работала переливная труба.
2. Поворотом круга установить перед отверстием круглое отверстие диаметром  $d = 2$  см и закрепить круг в этом положении.
3. Открыть клапан и обеспечить с помощью задвижки истечение воды при постоянном напоре  $H$ , измерить его, а также координаты  $X_k$  и  $Y_k$  произвольно выбранной точки  $K$  траектории струи.
4. Измерить расход воды  $Q$  с помощью мерного бака и секундомера (измеряемый объем воды должен быть не менее 50 литров).
5. Результаты измерений записать в табл. 1.
6. Устанавливая с помощью поворотного круга против отверстия поочередно внешний цилиндрический и конические (сходящийся и расходящийся) насадки, измерить для каждого из них расход воды  $Q$  и напор  $H$  (последний должен поддерживаться в опытах постоянным и равным напору при истечении из круглого отверстия).

7. Результаты измерений записать в табл. 1.

8. Обработать опытные данные, выполнив все вычисления, предусмотренные табл. 1.

9. Дать заключение по результатам работы.

### Основные контрольные вопросы

1. Что понимают под малым отверстием в тонкой стенке при истечении жидкости из отверстий?
2. Сжатое сечение, причины сжатия струи, чем оценивают величину сжатия струи?
3. Что называют насадком, типы насадков, их назначение?
4. Коэффициент скорости. Что он учитывает, как определяется?
5. Коэффициент расхода. Что он учитывает, как определяется?
6. Коэффициент сопротивления (отверстия, насадка). Как он определяется по опытным данным?
7. Объясните, почему при истечении из насадка расход жидкости больше, чем при истечении из малого круглого отверстия в тонкой стенке?

таблица 8

№ по- зиц.	Наименования измеряемых и вычисляемых величин	Ед. изм.	Результаты измерений и вычислений			
			Круг. отвер- стие	Насадки		
				Внешн. цилинд.	Ко- нич. сход.	Конич. расход
1	2	3	4	5	6	7
1	Диаметры отверстия и насадков на выходе $d$	$м$	$2,0 \cdot 10^{-2}$	$2,0 \cdot 10^{-2}$	$2,0 \cdot 10^{-2}$	$2,6 \cdot 10^{-2}$
2	Площади круглого отверстия и насадков на выходе $\omega = \pi d^2/4$	$м^2$				
3	Объем воды в мерном баке $W$	$м^3$				
4	Время наполнения $t$	$с$				
5	Расход воды $Q = W/t$	$м^3/с$				
6	Напор истечения $H$	$м$				
7	Координаты произвольной точки «К» траектории струи, вытекающей из круглого отверстия	$X_K$ $м$				
		$Y_K$ $м$				
8	Коэффициенты расхода отверстия и насадков (по опыту) $\mu_{on} = Q/\omega\sqrt{2gH}$	-				
9	Коэффициенты скорости насадков (по опыту) $\varphi_{Hon} = \mu_{Hon}$	-				

Продолжение таблицы 8

1	2	3	4	5	6	7
10	Коэффициент скорости отверстия (по опыту) $\varphi_{on} = X_k / (2\sqrt{Y_k \cdot H})$	-				
11	Коэффициент сопротивления отверстия и насадков (по опыту) $\zeta_{on} = 1/\varphi_{on}^2 - 1$	-				
12	Коэффициент сжатия отверстия и насадков (по опыту) $\varepsilon_{on} = \mu_{on}/\varphi_{on}$					
13	Справочные значения коэффициентов расхода, скорости, сопротивления и сжатия для отверстия и насадков	$\mu_{cnp}$	-			
		$\varphi_{cnp}$	-			
		$\zeta_{cnp}$	-			
		$\varepsilon_{cnp}$	-			
14	Относительные отклонения $\Delta_\mu = \frac{(\mu_{cnp} - \mu_{on})}{\mu_{cnp}}$	-				
	коэффициентов расхода, скорости, сопротивления и сжатия для отверстия и насадков $\Delta_\varphi = \frac{(\varphi_{cnp} - \varphi_{on})}{\varphi_{cnp}}$	-				
	$\Delta_\zeta = \frac{(\zeta_{cnp} - \zeta_{on})}{\zeta_{cnp}}$	-				
	$\Delta_\varepsilon = \frac{(\varepsilon_{cnp} - \varepsilon_{on})}{\varepsilon_{cnp}}$	-				

8. Напишите и поясните формулы для определения скорости и расхода при истечении жидкости из отверстий и насадков в атмосферу при постоянном напоре.
9. Изобразите схемы истечения жидкости из малого отверстия в тонкой стенке и через внешний цилиндрический насадок в атмосферу.
10. Какое уравнение лежит в основе формул для вычисления скорости истечения  $\mathcal{V}$  и расхода жидкости  $Q$  при истечении из отверстий и насадков? Напишите и поясните это уравнение.

#### Учебная литература к работе 6

1(с.379...385, с389..393, с.398,399), 2(с.284...288, с.291..297), 3(с.106...109, с.115), 4(с.106...112), 5(с.199.210, с.215...220, с.222...225).



## Лабораторная работа 7

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИЗУЧЕНИЕ ПРЯМОГО ГИДРАВЛИЧЕСКОГО УДАРА В НАПОРНОМ ТРУБОПРОВОДЕ

**Вводная часть.** Гидравлическим ударом называется изменение (повышение или понижение) давления в напорном трубопроводе при резком изменении скорости движения жидкости (например, в результате резкого закрытия или открытия затвора).

Повышение давления при гидравлическом ударе может быть настолько большим, что способно привести к разрыву трубопровода.

При быстром закрытии затвора сначала остановится не вся масса жидкости, заключенная в трубопроводе, а лишь часть ее, находящаяся непосредственно перед затвором (рис. 1). Это происходит благодаря инерции и упругим свойствам жидкости и материала трубы (остановившаяся масса жидкости несколько сжимается, труба расширяется, а давление в жидкости резко возрастает). Затем повышение давления весьма быстро распространяется по трубопроводу от затвора к резервуару. Скорость распространения повышения давления называют **скоростью распространения ударной волны  $C$** . После того как во всем трубопроводе давление повысится, жидкость начнет выходить из зоны повышенного давления обратно в резервуар, давление в трубопроводе начнет понижаться. Затем в зону пониженного давления снова пойдет жидкость из резервуара, и давление снова повысится. Благодаря упругим свойствам жидкости и стенок трубопровода этот процесс довольно быстро затухает. Наиболее опасным является первое повышение давления.

Ударная волна пройдет по всему трубопроводу (от затвора до резервуара) за время  $t = l/C$  (здесь  $l$  – длина трубопровода). Время одного цикла, включающего повышение и понижение давления, называется фазой удара  $T = 2l/C$ .

Если время закрытия  $t_z$  затвора меньше или равно фазе удара  $T$  ( $t_z \leq T$ ), удар называется прямым.

Удар может возникнуть, например, при внезапном выключении насоса, подающего воду по нагнетательному трубопроводу в резервуар. Жидкость после выключения насоса по инерции некоторое время будет двигаться, и в трубопроводе возникнет пониженное давление. Затем начнется обратное движение жидкости из резервуара в область пониженного давления в трубопроводе, и давление здесь повысится подобно тому, как это наблюдалось при прямом ударе.

Из изложенного ясно, что параметры движения жидкости при гидравлическом ударе изменяются с течением времени. Следовательно, при гидравлическом ударе движение жидкости является неустановившимся.

Для определения повышения давления  $\Delta p$  при прямом гидравлическом ударе Н. Е. Жуковским в 1898 г. предложена формула

$$\Delta p = \rho C \mathcal{V}, \quad (1)$$

где  $\rho$  - плотность жидкости;

$C$  - скорость распространения ударной волны;

$\mathcal{V}$  - средняя скорость движения жидкости в трубопроводе до закрытия затвора (при установившемся движении).

Величину  $C$  вычисляют по формуле

$$C = \frac{\sqrt{\frac{E_{жс}}{\rho}}}{\sqrt{1 + \frac{E_{жс} d}{E_{тр} \delta}}}, \quad (2)$$

где  $\sqrt{\frac{E_{жс}}{\rho}} = C_{зв}$  - скорость звука в жидкой среде (для воды  $C_{зв} \approx 1425$  м/с);

$E_{жс}$  и  $E_{тр}$  - модули упругости соответственно жидкости и материала трубопровода (для воды  $E_{жс} \approx 1,96 \cdot 10^9$  Па, для стали  $E_{тр} \approx 1,96 \cdot 10^{11}$  Па);

$d$  - внутренний диаметр трубопровода;  $\delta$  - толщина стенки трубопровода.

**Описание установки.** Установка состоит из горизонтального стального трубопровода, присоединенного к напорному резервуару, в котором уровень воды во время опытов поддерживается на постоянной отметке с помощью переливного устройства. В конце трубопровода имеется вентиль для регулирования скорости движения воды в нем, клапанный затвор, позволяющий практически мгновенно перекрывать трубопровод, пружинный манометр, с помощью которого измеряется давление в жидкости до и в момент закрытия затвора.

Для измерения расхода воды служит мерный бак, снабженный водомерной трубкой со шкалой, и секундомер.

**Цель работы:** Определить опытным путем величину повышения давления  $\Delta p_{он}$  при прямом гидравлическом ударе в напорном трубопроводе, сравнить ее с величиной  $\Delta p$ , вычисленной по формуле Н. Е. Жуковского, и подсчитать относительное отклонение  $\varepsilon_{\Delta p} = \frac{|\Delta p - \Delta p_{он}|}{\Delta p} \cdot 100\%$ .

### Порядок выполнения работы.

1. Измерить по манометру давление в трубопроводе до удара (при закрытом регулирующем вентиле) и результаты измерения записать в таблицу.

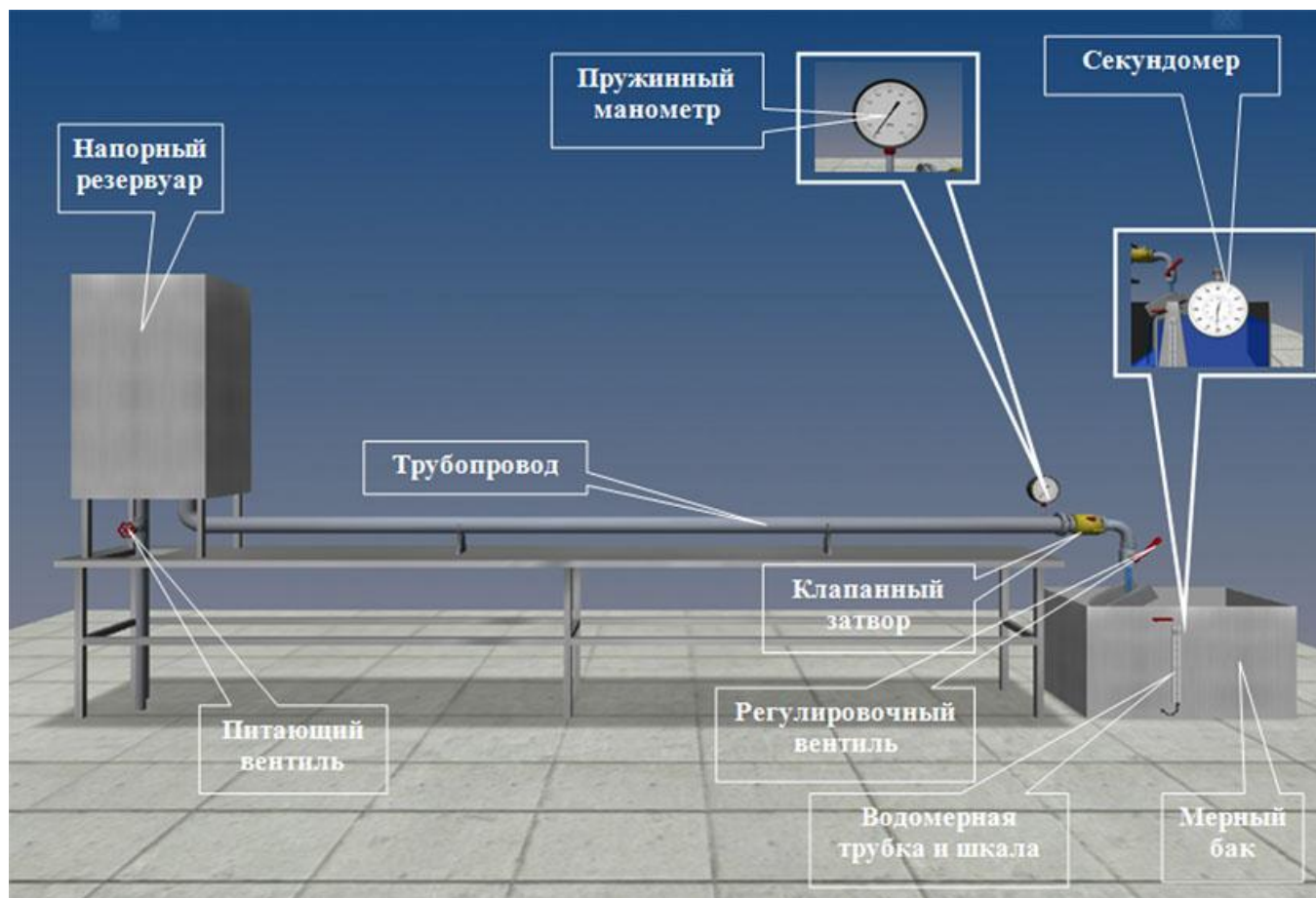


Рис.1. Схема установки для изучения гидравлического удара.

2. Открыв (не полностью) регулировочный вентиль, обеспечить пропуск по трубопроводу некоторого расхода воды.
3. Измерить расход воды  $Q$  с помощью мерного бака и секундомера. При этом измеряемый объем воды должен быть не менее 50 литров.
4. Перекрыть клапанным затвором трубопровод и измерить по манометру величину максимального давления при ударе.
5. Записать в таблицу полученные при измерениях данные.
6. Сделать еще два аналогичных опыта при других расходах воды.
7. Обработать опытные данные так, как указано в таблице.
8. Дать заключение по результатам работы.

#### Основные контрольные вопросы

1. Сформулируйте понятие гидравлического удара.
2. Прямой и непрямой гидравлический удар.
3. Что такое фаза удара?
4. Объясните процесс изменения давления в трубопроводе, питаемом из резервуара, при прямом гидравлическом ударе.
4. Напишите и поясните формулу Н. Е. Жуковского для определения по-

вышения давления при ударе.

5. Напишите и поясните формулу для определения скорости распространения ударной волны.

### Учебная литература к работе 7

- 1.(с.356...362), 2.(с.260...264), 3.(с.140...147), 4.(с.155...160),  
5.(с.279...283, с.289...293)

Таблица

№ поз.	Наименования измеряемых и вычисляемых величин	Ед. изм.	Результаты измерений и вычислений		
			Опыт 1	Опыт 2	Опыт 3
1	2	3	4	5	6
1	Внутренний диаметр трубопровода $d$	м			
2	Толщина стенки трубопровода $\delta$	м			
3	Площадь поперечного сечения трубопровода $\omega = \pi d^2/4$	м <sup>2</sup>			
4	Объем воды в мерном баке $W$	м <sup>3</sup>			
5	Время наполнения объема $t$	с			
6	Расход воды в трубопроводе $Q = W/t$	м <sup>3</sup> /с			
7	Средняя скорость движения воды в трубопроводе ( до удара) $V = Q/\omega$	м/с			
8	Скорость распространения ударной волны $C = \frac{1425}{\sqrt{1 + E_{\text{в}} d / E_{\text{Тр}} \cdot \delta}}$	м/с			
9	Повышение давления при ударе по формуле Н. Е. Жуковского $\Delta p = \rho C V$	Па			
10	Давление в трубопроводе до удара ( по манометру) $p_1$	Па			
11	Наибольшее давление в трубопроводе при ударе (по манометру) $p_2$	Па			
12	Повышение давления при ударе (по опытам) $\Delta p_{\text{он}} = p_2 - p_1$	Па			
13	Относительное отклонение $\Delta_{\Delta p} = \frac{ \Delta p - \Delta p_{\text{он}} }{\Delta p} \cdot 100$	%			

## Лабораторная работа 8

### ИЗУЧЕНИЕ ФИЛЬТРАЦИИ В ПЕСЧАНОМ ГРУНТЕ НА УСТАНОВКЕ ДАРСИ

**Вводная часть.** Под фильтрацией понимают движение воды в порах водонасыщенного грунта. Знание законов фильтрации необходимо при проектировании, строительстве и эксплуатации производственных, жилых и общественных зданий, гидротехнических сооружений, входящих в системы природопользования и инженерной экологии.

В частности, знание закономерностей фильтрации необходимо для определения притока грунтовой воды к котлованам строящихся зданий, дренажным и водозаборным устройствам, для расчётов осадки фундаментов и вычисления потерь воды через земляные плотины и дамбы.

Движение грунтовых вод так же, как и потоков в напорных трубопроводах и открытых каналах, может быть установившимся и неуставившимся, равномерным и неравномерным, напорным и безнапорным.

Режим движения грунтовых вод может быть ламинарным и турбулентным.

В данной работе изучается установившаяся напорная фильтрация при ламинарном режиме, описываемая законом Дарси. Аналитическое выражение этого закона обычно записывают в двух видах:

$$v = kJ \quad (1)$$

и

$$Q = \omega kJ. \quad (2)$$

Здесь  $v$  - скорость фильтрации, т.е. адаптивная скорость, равная

$$v = \frac{Q}{\omega}, \quad (3)$$

где  $Q$  - действительный (фактический) фильтрационный расход;

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

$k$  - коэффициент фильтрации, имеющий размерность скаляра (обычно в см/с или м/сут) и характеризующий водопроницаемость грунта.

Величину  $k$  определяют для каждого вида грунта опытным путём (при постоянной температуре фильтрующей жидкости). В справочной литературе величины коэффициента фильтрации грунтов обычно даются при температуре  $t = 10^\circ \text{C}$ . Для перехода от величины коэффициента  $k_t$ , полученной при температуре  $t$ , отличной от  $10^\circ \text{C}$ , к величине его при  $10^\circ \text{C}$

( $k_{10}$ ) применяется формула

$$k_{10} = \frac{k_t}{\tau}, \quad (4)$$

где  $\tau$  - температурная поправка, вычисляемая по эмпирической формуле:

$$\tau = 0,7 + 0,03t, \text{ } ^\circ\text{C}. \quad (5)$$

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

$$J_{1-2} = \frac{H_1 - H_2}{l_{1-2}} = \frac{h_{1-2}}{l_{1-2}}. \quad (6)$$

В случае фильтрации скоростным напором пренебрегают, поэтому полный напор считают равным гидростатическому, т.е.

$$H = z + \frac{p}{\rho g}. \quad (7)$$

Закон Дарси показывает, что скорость фильтрации пропорциональна градиенту напора, или, другими словами, потери напора линейно зависят от скорости фильтрации.

Заметим, что реальная скорость движения жидкости в порах грунта  $v_d$  равна

$$v_d = \frac{Q}{\omega_{nop}}. \quad (8)$$

Скорости  $v_d$  и  $v$  связаны между собой отношением

$$v_d = \frac{v}{n}, \quad (9)$$

где  $n = \omega_{nop} / \omega$  - пористость грунта.

Выражение ( 9) получено в результате совместного решения зависимостей ( 8) и ( 3).

**Описание установки.** Установка представляет собой выполненную из прозрачного органического стекла вертикальную колонну квадратного сечения с внутренними размерами 10x10 см, заполненную пятью слоями песчаного грунта различной крупности. Толщина каждого слоя однородного грунта – 10 см. На границах слоёв имеются штуцеры, к которым через резиновые шланги подсоединены стеклянные пьезометры (№ 1...6) для измерения напоров.

Вода в колонну поступает из питающего бака по трубе. Для поддержания постоянного уровня воды над поверхностью грунта в установке (с целью обеспечения установившегося движения фильтрационного потока) имеется переливная трубка.

Изменение в опытах величины градиента напора  $J$  (а следовательно и фильтрационного расхода  $Q$ ) достигается изменением высотного положения сливного устройства, соединённого гофрированным резиновым шлангом с нижней частью колонны. Измерение фильтрационного расхода воды  $Q$  осуществляется мерным сосудом с нанесённой на стенке шкалой (в  $\text{см}^3$ ). Время  $t$  заполнения профильтрованной водой нужного объема  $W$  отмеряется секундомером. Температура воды  $t^\circ \text{C}$  измеряется термометром.

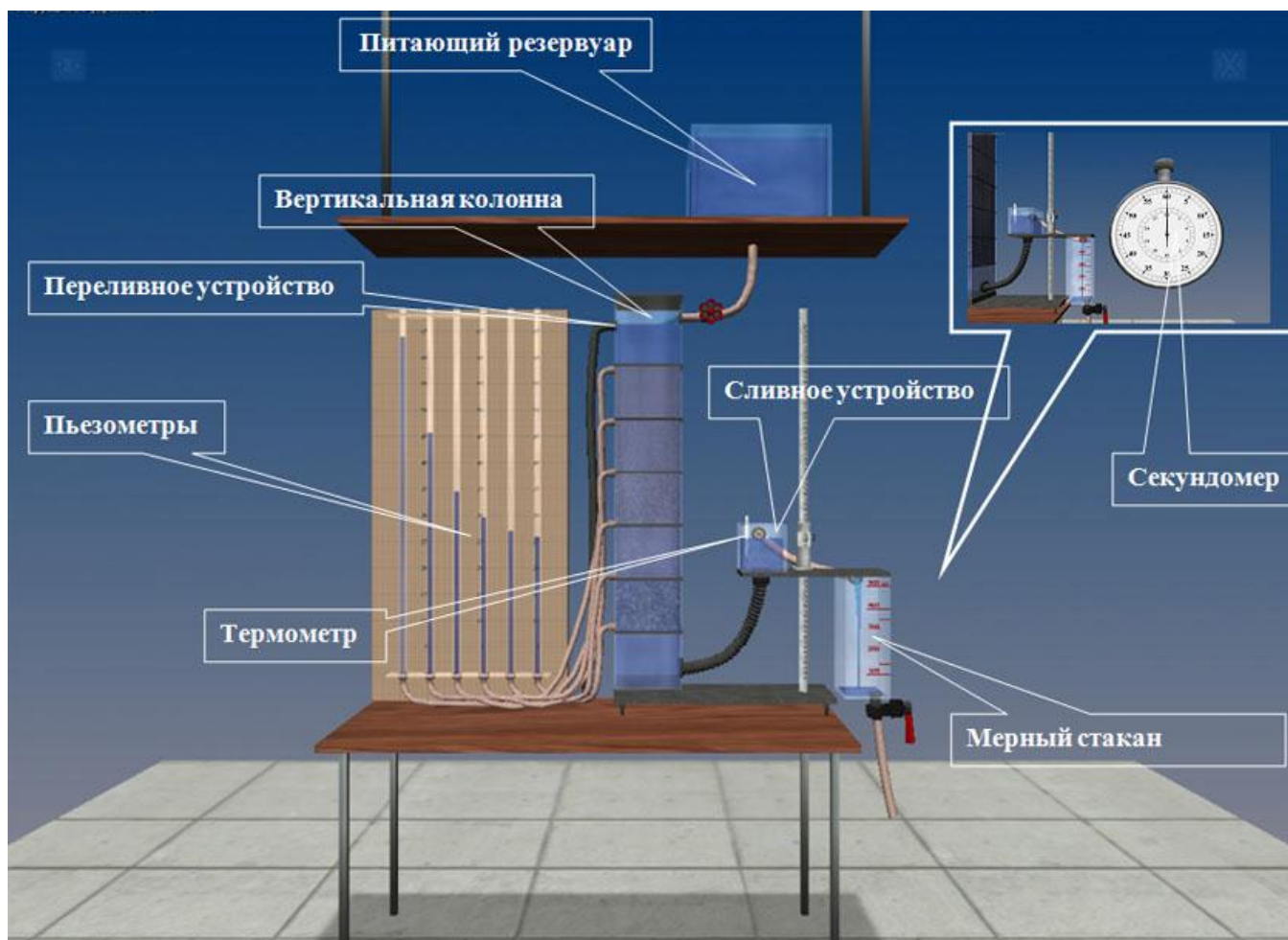


Рис. 3. Схема фильтрационной установки

**Цель работы:** 1. Убедиться в справедливости закона Дарси путём построения в масштабе (по данным пяти опытов) графиков зависимости скорости фильтрации  $\nu$  от градиента напора  $J$ , т.е. графиков  $\nu = f(J)$  для пяти видов песчаного грунта, отличающихся крупностью частиц (рис. 1).

2. Определить по графику  $\nu = f(J)$  для одного вида песчаного грунта (указанного преподавателем) среднюю величину коэффициента фильтрации  $k_f$  и указать её на графике (рис. 1).

3. Построить в масштабе по данным одного опыта, указанного преподавателем, эпюру напоров, т.е. график  $H = f(z)$  изменения напора  $H$  по пути фильтрации (рис. 2).

1. **Порядок выполнения работы.** При наиболее высоком положении сливного устройства, провести опыт № 1: определить отметки уровней воды в пьезометрах, т.е. напоры  $H$  в точках 1...6 фильтрационного потока; измерить превышения  $z$  этих точек над плоскостью сравнения; измерить в мерном сосуде объем  $W$  воды, профильтровавшей через грунт, продолжительность наполнения объема  $t$  и температуру воды  $t^\circ\text{C}$ . Полученные данные записать в табл.1.

2. Опустить сливное устройство на 5...10 см, и, выждав некоторое время, чтобы режим фильтрации установился, выполнить опыт № 2, измерив и записав в табл.1 те же величины, что и в опыте № 1.

3. Всего необходимо сделать пять опытов, опуская сливное устройство в каждом последующем опыте на 5...10 см.

4. Поднять сливное устройство в наиболее высокое положение и перекрыть кран на трубке питающего бака.

5. Обработать опытные данные и результаты обработки представить в виде табл.2.

6. Построить в масштабе по данным табл.2 график  $\nu = f(J)$  для всех пяти видов исследуемого грунта (рис.1), а по данным табл.1 – эпюру напоров  $H = f(z)$  для одного из опытов, указанного преподавателем (рис. 2)

7. Дать заключение по результатам работы.

### Основные контрольные вопросы

1. Напишите и поясните закон Дарси.
2. Напишите и поясните зависимость, связывающую скорость фильтрации с действительной средней скоростью движения жидкости в порах грунта.
3. Изобразите график  $\nu = f(J)$  и объясните, как с его помощью можно определить среднюю величину коэффициента фильтрации грунта?
4. Поясните, что такое коэффициент фильтрации?



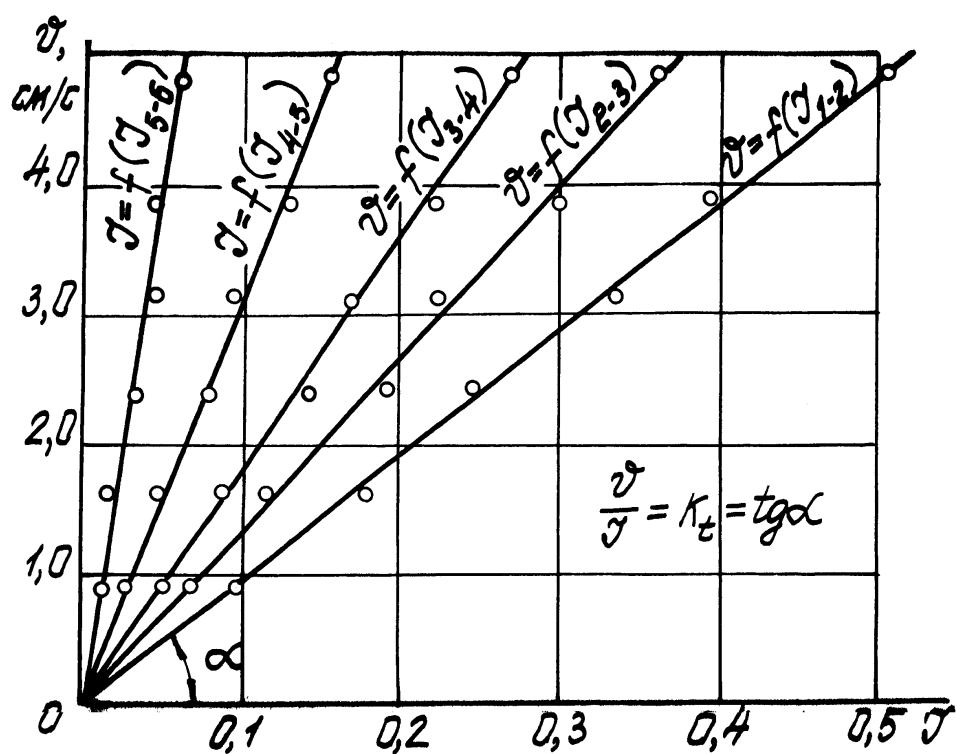


Рис. 1. График зависимости скорости фильтрации  $v$  от градиента напора  $J$

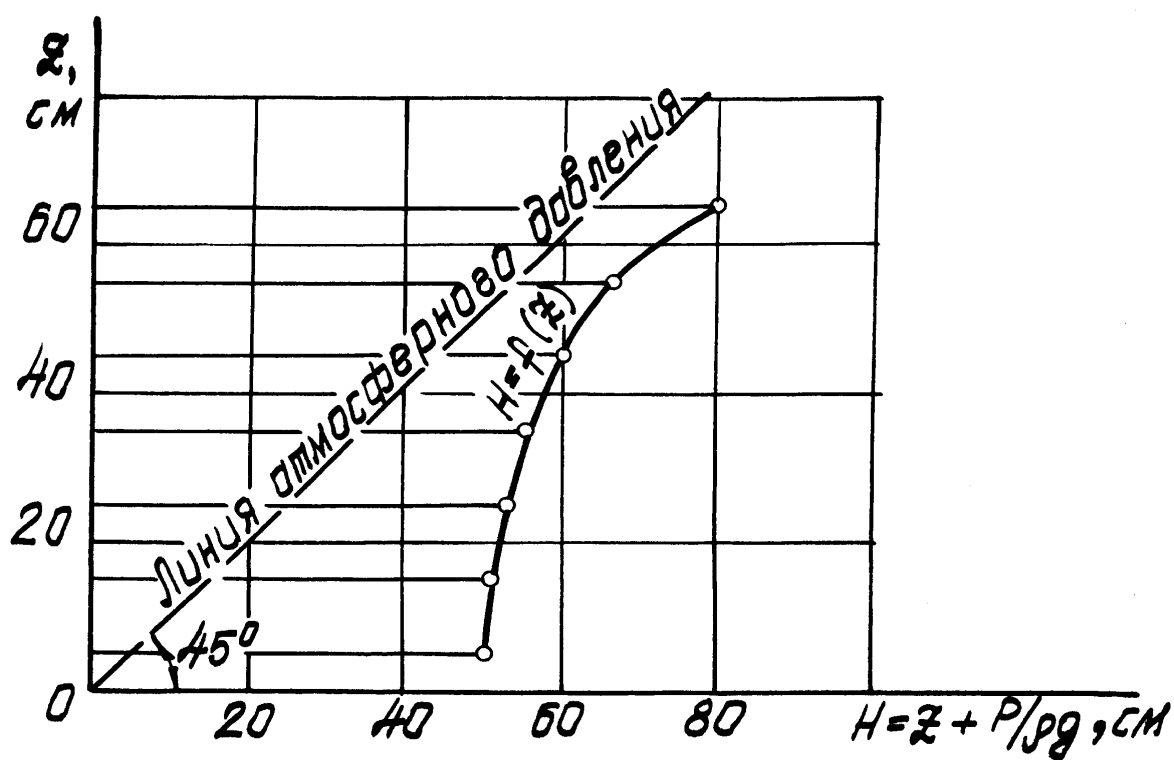


Рис. 2. Эпюра напоров

5. Сформулируйте понятие градиента напора и поясните, как определяется его величина?
6. Изобразите эпюру напоров  $H = f(z)$  и дайте комментарий к ней.
7. Объясните, почему величина коэффициента фильтрации грунта зависит от температуры фильтрующей жидкости?
8. Как найти величину коэффициента фильтрации  $k$  грунта при  $10^\circ\text{C}$ , если известна его величина при температуре  $t$ , отличающейся от  $10^\circ\text{C}$ ?
9. От каких факторов зависит фильтрационная способность грунта?

### Учебная литература к работе 8

1(с.535...534); 5(с. 535...542); 7(с. 379...384); 8(с. 443...448);  
9(с. 255...258)

Таблица 1

№ поз.	Наименование и обозначение измеряемых величин		Един. изм.	Численные значения				
				Номера опытов				
				1	2	3	4	5
1	2		3	4	5	6	7	8
1	Напоры (отметки уровней воды в пьезометрах, подключенных в точках 1...6) $H_i = z_i + p_i / \rho g$	$H_1$	см					
		$H_2$	см					
		$H_3$	см					
		$H_4$	см					
		$H_5$	см					
		$H_6$	см					
2	Объем профильтровавшей воды $W$		см <sup>2</sup>					
3	Продолжительность фильтрации $t$		с					
4	Превышение точек 1...6 подключения пьезометров над плоскостью сравнения (геометрические высоты) $z_i$	$z_1$	см					
		$z_2$	см					
		$z_3$	см					
		$z_4$	см					
		$z_5$	см					
		$z_6$	см					
5	Температура воды $t$		°C					

Таблица 2

№ поз.	Наименование и обозначение вычисляемых величин	Един. изм.	Численные значения				
			Номера опытов				
			1	2	3	4	5
1	2	3	4	5	6	7	8
1	Фильтрационный расход $Q = W/t$	см <sup>3</sup> /с					
2	Скорость фильтрации $v = Q/\omega$	см/с					
3	Потери напора $h_i - h_{i+1} = H_i - H_{i+1}$	$h_{1-2}$	см				
		$h_{2-3}$	см				
		$h_{3-4}$	см				
		$h_{4-5}$	см				
		$h_{5-6}$	см				
4	Градиент напора $J_i - J_{i+1} = h_i - h_{i+1}/l$	$J_{1-2}$	-				
		$J_{2-3}$	-				
		$J_{3-4}$	-				
		$J_{4-5}$	-				
		$J_{5-6}$	-				
5	Коэффициент фильтрации $k_{t_{i-i+1}} = v / J_{i-i+1}$	$k_{t1-2}$	см/с				
		$k_{t2-3}$	см/с				
		$k_{t3-4}$	см/с				
		$k_{t4-5}$	см/с				
		$k_{t5-6}$	см/с				
6	Температурная поправка $\tau = 0,7 + 0,03 t ^\circ\text{C}$	-					
7	Коэффициент фильтрации при 10°C $k_{10_{i-i+1}} = k_{t_{i-i+1}} / \tau$	$k_{101-2}$	см/с				
		$k_{102-3}$	см/с				
		$k_{103-4}$	см/с				
		$k_{104-5}$	см/с				
		$k_{105-6}$	см/с				

### Библиографический список

1. Альтшуль, А.Д. Гидравлические сопротивления [Текст] / А.Д. Альтшуль. М.: Недра, 1982. 224 с.
2. Альтшуль, А.Д. Гидравлика и аэродинамика [Текст] / А.Д. Альтшуль, Л.С. Животовский, Л.П. Иванов. М.: Стройиздат, 1987. 414 с.
3. Богомолов, А.И. Гидравлика [Текст] / А.И. Богомолов, К.А. Михайлов. М.: Стройиздат, 1972. 648 с.
4. Гидравлические расчеты водосбросных гидротехнических сооружений [Текст]: справочное пособие. М.: Энергия, 1988. 624 с.

5. Гиргидов, А.Д. Механика жидкости и газа (гидравлика) [Текст]: учебник для вузов/ А.Д. Гидров. 2-е изд., испр. и доп. СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2003. 545 с.
6. Емцев, Б.Т. Техническая гидромеханика [Текст] / Б.Т. Емцев. М.: Машиностроение, 1987. 440 с.
7. Идельчик, И.Е. Справочник по гидравлическим расчетам [Текст] / И.Е. Идельчик. М.: Машиностроение, 1975. 559 с.
8. Казарян, С.М.. Лабораторный практикум по гидравлике, гидравлическим машинам и гидроприводам [Текст]: учеб. пособие для вузов / С.М. Казарян, А.Ш. Барекян, Д.Д. Скубаренко, А.К. Челышев. Ер.: Луйс. 319 с.
9. Константинов, Н.М., Петров Н.Н., Высоцкий Л.И., Гидравлика, гидрология, гидрометрия [Текст]: учебник для вузов. В 2 ч. / Н.М. Константинов, Н.Н. Петров, Л.И. Высоцкий. Ч.1. М.: Высш. шк., 1987. 304 с. Ч. 2. М.: Высш. шк., 1987. 431 с.
10. Павловский, Н.Н. Гидравлический справочник [Текст] / Н.Н. Павловский. Л.-М.: ОНТИ, НКТП, 1937. 890 с
11. Справочник по гидравлическим расчетам / Под ред. П.Г. Киселева. М.: Энергия, 1997. 312 с.
12. Чертоусов, М.Д. Гидравлика. Специальный курс [Текст] / М.Д. Чертоусов. М.-Л.: Госэнергоиздат, 1962. 640 с.
13. Чоу, В.Т. Гидравлика открытых каналов [Текст] / В.Т. Чоу. М.: Стройиздат, 1969. 464 с.
14. Чугаев, Р.Р. Гидравлика[Текст]: учебник для вузов В 2 кн. / Р.Р. Чугаев. Кн.1. М.: Энергоатомиздат, 1991. 351 с. Кн. 2. М.: Энергоатомиздат, 1991. 367 с.
15. Штеренлихт, Д.В. Гидравлика [Текст] / Д.В. Штеренлихт. М.: Колос, 2006. 656 с.

## Содержание

Введение.....	3
Общие указания по выполнению лабораторных работ. Рекомендации по составлению и оформлению отчетов о работах и их защите.....	4
Работа 1. Измерение гидростатического давления, экспериментальное подтверждение основного уравнения гидростатики и закона Паскаля.....	4
Работа 2. Изучение относительного покоя жидкости при вращательном движении.....	11
Работа 3. Определение опытным путем слагаемых уравнения Д. Бернулли при установившемся неравномерном движении жидкости в напорном трубопроводе.....	16
Работа 4. Экспериментальная иллюстрация ламинарного и турбулентного режимов движения жидкости. Установление законов гидравлического сопротивления и определение критического числа Рейнольдса.....	24

Работа 5. Изучение гидравлических сопротивлений напорного трубопровода с определением коэффициентов гидравлического трения и местных сопротивлений.....	30
Работа 6. Изучение истечения жидкости через малые отверстия в тонкой стенке и насадки при постоянном напоре в атмосферу.....	38
Работа 7. Экспериментальное изучение прямого гидравлического удара в напорном трубопроводе.....	46
Работа 8. Изучение фильтрации в песчаном грунте на установке Дарси....	51