

# 401 -2021

## **ТЕХНИЧЕСКАЯ МЕХАНИКА ЖИДКОСТИ**

Методические указания  
к выполнению лабораторных работ  
по гидравлике для студентов, обучающихся по направлениям  
08.03.01 и 08.04.01 «Строительство»,  
20.03.02 «Природопользование и водопользование»  
и специалитета:  
23.05.01 «Наземные транспортно-технологические средства»,  
08.05.01 «Строительство уникальных зданий и сооружений»  
20.05.01 «Пожарная безопасность»  
**всех форм обучения**



Воронеж - 2021

Министерство науки и высшего образования  
Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Воронежский государственный технический университет»

## **ТЕХНИЧЕСКАЯ МЕХАНИКА ЖИДКОСТИ**

Методические указания  
к выполнению лабораторных работ  
по гидравлике для студентов, обучающихся по направлениям  
08.03.01 и 08.04.01 «Строительство»,  
20.03.02 «Природопользование и водопользование»  
и специалитета:  
23.05.01 «Наземные транспортно-технологические средства»,  
08.05.01 «Строительство уникальных зданий и сооружений»  
20.05.01 «Пожарная безопасность»  
всех форм обучения

Воронеж - 2021

**УДК 532.1+532.5(072)**

**ББК 30.123 я 7**

Составители: В.Ф. Бабкин, И.В. Журавлева

Техническая механика жидкости: метод. указания к выполнению лабораторных работ по гидравлике/ ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»; сост.: В.Ф. Бабкин, И.В. Журавлева. - Воронеж, 2021. - 32 с.

Изложен ход проведения лабораторных работ; измерительные приборы и оборудование, постановка гидравлических экспериментов, выполнение гидравлических расчётов и обработка экспериментальных данных.

Предназначены для студентов по направлению 08.03.01 и 08.04.01 «Строительство», 20.03.02 «Природопользование и водопользование» и специалитета: 23.05.01 «Наземные транспортно-технологические средства», 08.05.01 «Строительство уникальных зданий и сооружений», 20.05.01 «Пожарная безопасность» всех форм обучения.

. Ил. 10, табл. 9. Библиогар. 5 назв.

Рецензент - М.Я. Панов, д.т.н., проф. кафедры теплогазоснабжения и нефтегазового дела

*Печатается по решению редакционно-издательского совета  
Воронежского государственного технического университета*

## ВВЕДЕНИЕ

В методических указаниях дана последовательность выполнения лабораторных работ по гидравлике на оборудовании, имеющемся в гидравлической лаборатории ВГТУ.

Выполнение лабораторных работ способствует лучшему усвоению теоретического курса и пониманию физической сущности гидравлических законов. В ходе проведения лабораторных работ приобретаются навыки в обращении с измерительными приборами и оборудованием, постановке гидравлических экспериментов, в выполнении гидравлических расчетов и обработке экспериментальных данных.

При подготовке к каждой работе студент должен самостоятельно во внеаудиторное время изучить теорию по лекциям и рекомендованной литературе; ознакомиться по методическим указаниям с целью работы, описанием лабораторной установки, порядком выполнения работы, подготовить письменный отчет с пустыми бланками расчетных таблиц. Во время лабораторной работы студенты отвечают на контрольные вопросы, обсуждают порядок выполнения работы и затем выполняют ее.

Преподаватель заблаговременно проверяет готовность студента к выполнению предстоящей лабораторной работы.

Студент, не подготовившийся к работе, к ее выполнению не допускается.

Результаты экспериментов заносятся в заготовленные заранее бланки, результаты исследований обрабатываются, строятся графики и формулируется вывод.

Готовые отчёты по лабораторным работам студент предоставляет преподавателю для проверки с теоретическим собеседованием по каждой работе.

Отчет по лабораторной работе должен быть кратким и ясным и содержать следующие разделы:

1. **Цель работы.**
2. Основные теоретические сведения и **расчётные формулы.**
3. **Схему** установки с описанием и принципом работы.
4. Порядок проведения эксперимента и обработки результатов.
5. Расчетные **таблицы**, графики и **вывод.**

**ИЗМЕРЕНИЕ ВЯЗКОСТИ ЖИДКОСТИ**

Тема для изучения при подготовке к работе:  
Физические свойства жидкостей и газов.

**1.1. Цель работы**

Измерение вязкости вискозиметром Энглера и изучение зависимости вязкости жидкости от температуры.

**1.2. Приборы**

Вискозиметр Энглера с электрическим подогревом; секундомер, два термометра, мерный стакан ёмкостью 200 см<sup>3</sup>.

**1.3. Краткие теоретические сведения**

При очень малых скоростях движение всякой жидкости имеет слоистый характер: частицы, непосредственно прилегающие к стенкам трубы или канала, остаются неподвижными, частицы ближайшего слоя потока медленно скользят по ним. Частицы следующего слоя скользят немного быстрее и так далее - до оси трубы или свободной поверхности открытого потока, где наблюдается наибольшая скорость. Ни одна частица не испытывает никаких поперечных смещений, ни одна частица не может покинуть того слоя, в котором она движется (подобный режим движения называется ламинарным).

Опыт показывает, что такое спокойное, упорядоченное движение происходит все же не вполне свободно. Скольжение одного слоя жидкости по другому встречает определенное сопротивление: в жидкости обнаруживается внутреннее трение. Это свойство жидкости оказывать сопротивление относительному сдвигу ее частиц называется **вязкостью**.

В соответствии с законом вязкого трения Ньютона сила внутреннего трения  $dT$ , возникающая между движущимися слоями жидкости (рис. 1), расположенными на бесконечно близком расстоянии  $dy$  друг от друга, прямо пропорциональна разности скоростей слоев  $dV$  и площади поверхности их соприкосновения  $dS$  и обратно пропорциональна расстоянию между слоями  $dy$ :

$$dT = \mu \frac{dV}{dy} dS \quad (1.1)$$

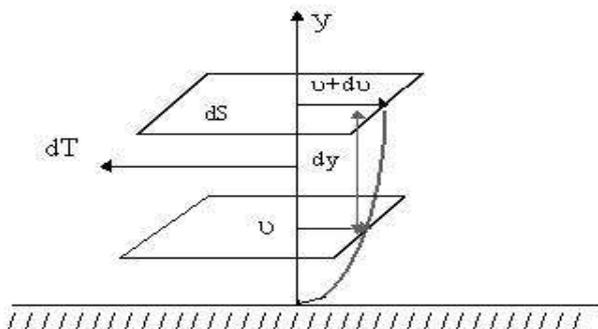


Рис. 1. Схема, поясняющая понятие вязкость **вязкости**.

В системе единиц СИ вязкость измеряется в (н·с)/м<sup>2</sup>, в технической системе - кГ·с/м<sup>2</sup>, в CGS - в пуазах (Пз): **1 Пз = 1 дин·с/см<sup>2</sup> = 0,1 Па·с**.

В расчётах принято широко использовать кинематическую вязкость (**v**), представляющую собой отношение динамической вязкости к плотности жидкости (**ρ**):

$$v = \mu / \rho. \quad (1.3)$$

Кинематический коэффициент вязкости измеряется в м<sup>2</sup>/с, в стоксах (Ст): 1 Ст = 1 см<sup>2</sup>/с = 10<sup>-4</sup> м<sup>2</sup>/с и в сантистоксах (сСт): 1 сСт = 0,01 Ст.

У **жидкостей** вязкость обусловлена взаимным притяжением молекул. При повышении температуры усиливается молекулярное движение, связь между молекулами ослабевает, вязкость жидкости уменьшается.

У **газов** вязкость обусловлена обменом молекулами между слоями. При повышении температуры обмен молекул газов увеличивается, а, следовательно, вязкость газов повышается.

Для измерения вязкости жидкости используются вискозиметры.

Наибольшее применение в технической практике России находит вискозиметр Энглера (ОСТ 6275) (для жидкостей с вязкостью **v < 1000 сСт**) (рис. 2).

В сосуд 1 наливают исследуемую жидкость (200 см<sup>3</sup>), подогревают до заданной температуры и затем, вынув стержень 5, выпускают жидкость из сосуда в ёмкость 7. Время опорожнения замечают секундомером.

За вязкость жидкости по Энглера принимается отношение времени **t** истечения 200 см<sup>3</sup> исследуемой жидкости при данной температуре ко времени истечения такого же объема воды при **T = 20°C (t<sub>в</sub> = 58,3 сек)**. Эта условная единица вязкости называется градусом Энглера:

$${}^0E = \frac{t}{t_v}. \quad (1.4)$$

Для перехода от условной вязкости к кинематической используют эмпирическую формулу Убеллоде

$$v = 0,0731 {}^0E - \frac{0,0631}{{}^0E}, \text{ см}^2/\text{с}. \quad (1.5)$$

#### 1.4. Порядок выполнения работы

Залить в ванну **3** воду, в сосуд **1** - 200 см<sup>3</sup> исследуемой жидкости (индустриальное масло). Довести температуру до заданной величины (в пределах 20-90 °С).

Если температура жидкостей в сосудах **1** и **3** отличается менее чем на 3 °С, вынуть стержень **5** из отверстия, одновременно пустив секундомер. Зафиксировать время опорожнения.

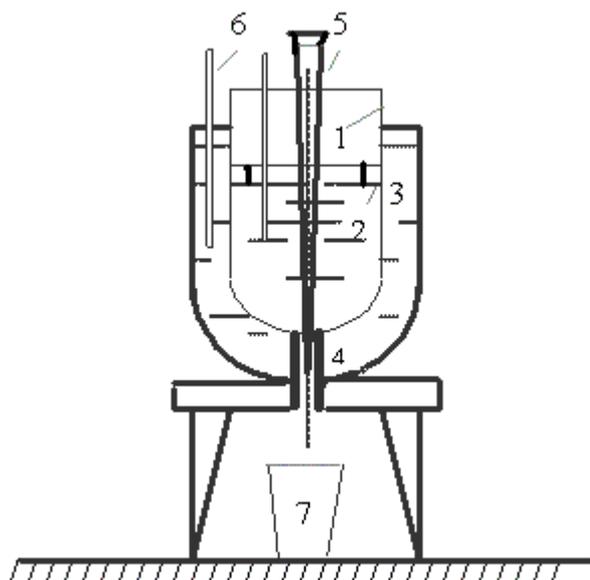


Рис. 2. Схема вискозиметра Энглера:

- 1 - сосуд,
- 2 - крючки уровня залива жидкости,
- 3 - водяная ванна с водой определенной температуры,
- 4 - трубочка с отверстием, припаянная к сосуду 1,
- 5 - стержень, закрывающий отверстие трубочки 4,
- 6 - термометры,
- 7 - сосуд, в который выпускается жидкость

Результаты измерений и вычислений занести в табл. 1.

Таблица 1

Номер опыта	Температура $T$ , °С	Время истечения $t$ , с	Вязкость, °Е	Коэффициент кинематической вязкости, $\nu$ , сСт
1				
2				
3				

Построить график зависимости вязкости от температуры.

Сделать вывод об изменении значений вязкости жидкости с изменением температуры.

#### Контрольные вопросы

1. Что такое текучесть жидкости и как она связана с вязкостью?
2. Чему равна сила вязкого трения в покоящейся жидкости?
3. Почему скорость истечения жидкости через отверстие зависит от ее вязкости?
4. Зависит ли вязкость в °Е от площади отверстия вискозиметра Энглера?
5. Как зависит от температуры вязкость газов?

## РАБОТА № 2

### ИЗМЕРЕНИЕ ДАВЛЕНИЙ ЖИДКОСТНЫМИ ПРИБОРАМИ

Темы для изучения при подготовке к работе:

1. Свойства гидростатического давления.
2. Основное уравнение гидростатики.
3. Приборы для измерения давлений.

#### 2.1. Цель работы

1. Изучение свойств гидростатического давления.
2. Измерение избыточного и вакуумметрического давлений в резервуаре с сжатым и разреженным воздухом с помощью жидкостных манометров и определение абсолютного давления.
3. Определение удельного веса жидкости в спиртовом манометре.

#### 2.2. Краткие теоретические сведения

**Гидростатическое давление** есть напряжение сжатия в точке покоящейся жидкости. Оно всегда направлено по нормали (т.е. перпендикулярно) к площади действия.

Различают **абсолютное** давление  $P_{абс.}$ , отсчитываемое от нуля (от давления в абсолютной пустоте, полного вакуума); **избыточное** давление  $P_{изб.}$  - разность между абсолютным  $P_{абс.}$  и атмосферным  $P_a$  давлениями (когда  $P_{абс.} > P_a$ ), и **вакуумметрическое** давление или просто **вакуум**  $P_{вак.}$  - недостаток абсолютного давления до атмосферного, если последнее больше абсолютного. Очевидны следующие взаимосвязи:

$$P_{изб.} = P_{абс.} - P_a \text{ (при } P_{абс.} > P_a), \quad (2.1)$$

$$P_{вак.} = P_a - P_{абс.} \text{ (при } P_{абс.} < P_a). \quad (2.2)$$

**Единицы измерения давления:** в системе СИ- паскаль ( $P_a = \text{н/м}^2$ ); в технике используется атмосфера (атм)  $1 \text{ атм} = 1 \text{ кг/см}^2$ . Соотношение единиц измерения давления:

$$1 \text{ ат} = 10 \text{ м.вод.ст.} = 735 \text{ мм рт.ст.} = 98070 \text{ Па.}$$

Для измерения избыточного и вакуумметрического давлений используют соответственно манометры и вакуумметры: жидкостные (пьезометры, U-образные дифманометры и др.), пружинные или деформационные (трубчатые, мембранные, сильфонные), поршневые, пьезоэлектрические и др.

**Атмосферное** давление определяют по барометру.

**Жидкостные приборы**, представляющие собой заполненную жидкостью открытую стеклянную трубку различной формы, используются преимущественно в лабораторных исследованиях при измерении давлений, не превышающих 3 атм. Возможность их применения для измерения давлений

обусловлена основным уравнением гидростатики несжимаемой жидкости в поле силы тяжести:

$$P = P_0 + \gamma \cdot h, \quad (2.3)$$

где  $P_0$  - давление на свободной поверхности жидкости;

$h$  - высота столба жидкости, м;

$\gamma$  - объёмный вес жидкости,  $\text{кГ/м}^3$ .

### 2.3. Порядок выполнения работы

1. Определить атмосферное давление по барометру.

2. Для измерения избыточного давления необходимо:

- ✓ открыть кран 2 (рис.3), чтобы объём резервуара имел сообщение с атмосферой и с мановакуумметрами.;

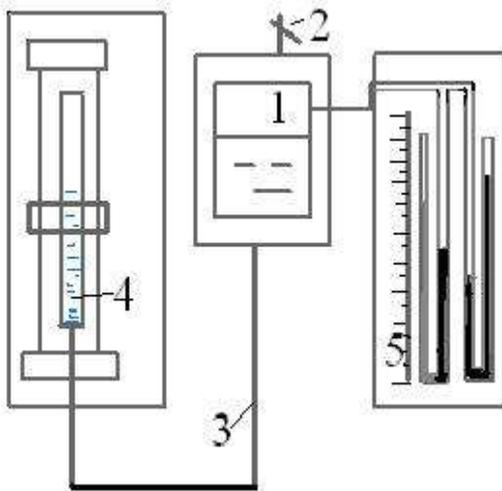


Рис. 3. Схема лабораторной установки для измерения давления в замкнутом воздушном объеме с помощью жидкостных приборов:

1 - герметичный металлический резервуар,

2 - кран, сообщающий или разобщающий сосуд с атмосферным давлением,

3 - резиновая трубка, соединяющая

(как сообщающиеся сосуды) резервуар 1 со стеклянной трубкой 4,

5- шкала жидкостных приборов

- ✓ трубку 4 опустить вниз насколько возможно (при открытом кране 2);
- ✓ закрыть кран 2. В пространстве резервуара имеется объем воздуха с атмосферным давлением  $P_0$ ;
- ✓ медленно передвинуть трубку 4 вверх примерно до половины её возможного хода;
- ✓ отметить уровни жидкости по шкале 5 и занести их значения в табл. 2 (разности уровней в правом и левом коленах манометров: водяного  $h^b$  и спиртового  $h^c$ ).

3. Для измерения вакуумметрического давления необходимо:

- ✓ открыть кран 2 и установить трубку 4 вблизи верхнего положения;
- ✓ закрыть кран 2. В объёме резервуара при этом установлено атмосферное давление;
- ✓ медленно передвинуть трубку 4 вниз на некоторую величину;

- ✓ отметить уровни жидкости по шкале 5 и занести их значения в табл. 2 (разности уровней  $h^B$  и  $h^C$  в коленах водяного и спиртового вакуумметров).

По результатам внесённых значений уровней левого и правого колена U-образной трубки по пп. 2.4 и 3.4, рассчитать разности уровней, избыточное (для сжатия) и вакуумметрическое (для разрежения) давления над уровнем жидкости в цилиндре 1, а также абсолютное давление в каждом опыте. Результаты расчётов занести в табл. 2.

Таблица 2

Форма записи результатов измерений

Жидкостной прибор	Сжатие воздуха					Разрежение воздуха				
	$h_{п.}$ см	$h_{л.}$ см	$h$ , см	$P_{изб.}$ кГ/см <sup>2</sup>	$P_{абс.}$ кГ/см <sup>2</sup>	$h_{л.}$ см	$h_{п.}$ см	$h$ , см	$P_{вак.}$ кГ/см <sup>2</sup>	$P_{абс.}$ кГ/см <sup>2</sup>
Спиртовой										
Водяной										

$$h_6 = \text{_____ мм рт.ст. } \gamma_{рт}=0,0136 \text{ кГ/см}^3; \gamma_{воды}=1000 \text{ кГ/м}^3$$

Для спиртового прибора, прежде чем рассчитывать давления, необходимо по результатам опытов определить удельный вес жидкости в спиртовом манометре:

$$\gamma^c / \gamma^B = h^B / h^c,$$

$$\gamma_{разр.}^c = \frac{h_{разр.}^B \cdot \gamma^B}{h_{разр.}^c}; \quad \gamma_{сжат.}^c = \frac{h_{сжат.}^B \cdot \gamma^B}{h_{сжат.}^c} \Rightarrow \gamma^c = \frac{\gamma_{разр.}^c + \gamma_{сжат.}^c}{2}.$$

**Контрольные вопросы:**

1. Как зависит величина давления в точке покоящейся жидкости от направления?
2. Что такое манометрическое давление и как его измерить жидкостным прибором?
3. Что такое поверхности равного давления и как они располагаются в покоящейся жидкости?
4. Какое давление создается при сжатии в герметичном сосуде воздуха, с первоначальным атмосферным давлением?
5. Какое давление создается при разрежении в герметичном сосуде воздуха, с первоначальным атмосферным давлением?
6. Как можно измерить жидкостным прибором абсолютное давление в точке покоящейся жидкости? Как этот прибор называется и как устроен?
7. Как по положению столбиков жидкости в жидкостном U-образном манометре оценить давление в измеряемой точке?
8. Чем ограничивается наибольшая возможная величина вакуума?
9. Зависит ли точность измерений давления с помощью жидкостных приборов от величины давления?

## РАБОТА № 3

### ИССЛЕДОВАНИЕ ОТНОСИТЕЛЬНОГО ПОКОЯ ЖИДКОСТИ

Темы для изучения при подготовке к работе:

1. Дифференциальные уравнения равновесия жидкости.
2. Относительный покой жидкости.

#### 3.1. Цель работы

1. Экспериментально установить форму свободной поверхности жидкости в круглом цилиндрическом сосуде, вращающемся с постоянной угловой скоростью вокруг собственной оси.
2. Сопоставить результаты опыта с данными теоретического расчета.

#### 3.2. Основные теоретические сведения

Относительным покоем называется покой жидкости относительно стенок сосуда, в котором она находится, при движении этого сосуда относительно земли.

Характерным примером относительного покоя жидкости является случай, когда открытый цилиндрический сосуд, заполненный жидкостью, вращается вокруг вертикальной оси, совпадающей с его осью, с постоянной угловой частотой  $\omega$ . Под действием сил трения жидкость постепенно приобретает угловую частоту вращения сосуда и переходит из состояния абсолютного покоя в состояние относительного покоя. В этом состоянии жидкость находится под действием двух массовых сил: силы тяжести и центробежной силы, направленной по радиусу от оси вращения. В этом случае для любой точки жидкости с ординатой  $z$  закон распределения давления можно записать в виде

$$P = P_0 + \gamma \cdot (z_0 - z) + \rho \cdot \omega^2 \cdot r^2 / 2, \quad (3.1)$$

где  $P$  и  $P_0$  - гидростатические давления в точках с ординатой  $z$  и на свободной поверхности;  $z_0$  - ордината точки свободной поверхности, расположенной на вертикальной оси сосуда;  $r$  - расстояние точки по горизонтали от оси вращения;  $\omega$  - угловая частота вращения.

Поверхности равного давления (поверхности уровня) в рассматриваемом случае представляют собой семейство конгруэнтных параболоидов вращения с вертикальной осью, описываемых уравнением:

$$\frac{\omega^2 \cdot r^2}{2} - g \cdot z = \text{const.} \quad (3.2)$$

Полагая для свободной поверхности, где  $P = P_a$ , константу равной нулю, из (3.2) определяются ординаты точек свободной поверхности:

$$z = \frac{\omega^2 \cdot r^2}{2 \cdot g}. \quad (3.3)$$

В любом меридиональном сечении кривая свободной поверхности является параболой с вертикальной осью.

### 3.3. Описание экспериментальной установки

Экспериментальная установка (рис. 4) состоит из открытого цилиндрического стеклянного сосуда 2, заполненного водой. Вращение сосуда осуществляется электродвигателем 9 через редуктор 1.

Измерение отметок свободной поверхности производится с помощью координатника 6, закрепленного на неподвижной раме 3. Координатник состоит из горизонтальных направляющих, по которым с помощью винта 8 перемещается каретка с установленной на ней измерительной иглой 5. На направляющих закреплена горизонтальная шкала 4, а на каретке - вертикальная шкала 7.

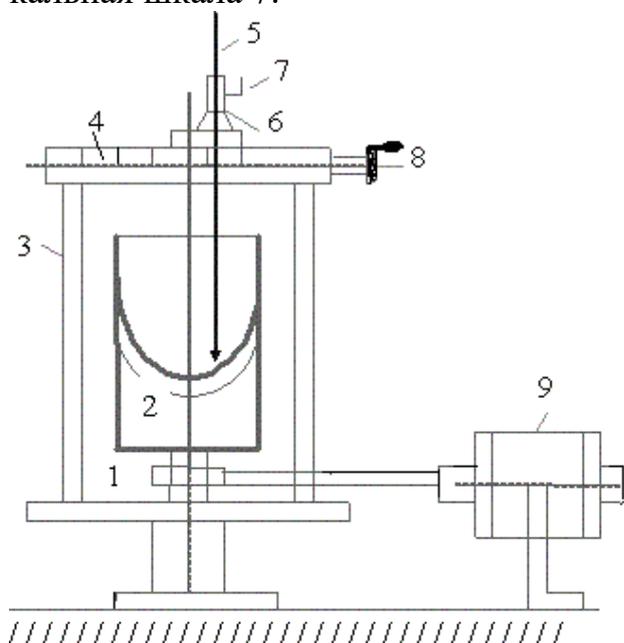


Рис. 4. Схема лабораторной установки:

- 1 -редуктор;
- 2 - цилиндрический стеклянный сосуд;
- 3 - неподвижная рама;
- 4 - горизонтальная шкала;
- 5- измерительная игла;
- 6 - координатник;
- 7 - вертикальная шкала;
- 8 - винт;
- 9 - электродвигатель

### 3.4. Порядок выполнения работы

Включить электродвигатель 9 и выждать определенное время, в течение которого установится постоянная форма свободной поверхности жидкости в сосуде в виде параболоида вращения, приступить к измерению отметок свободной поверхности. Для этого вначале измерительную иглу 5 установить по оси сосуда 2 и опустить до соприкосновения с поверхностью жидкости. Произвести отсчёт по горизонтальной 4 и вертикальной 7 линейкам. Затем иглу поднять с помощью винта 8, переместить по горизонтали влево или вправо на 1 см от оси и выполнить отсчёт второй точки по горизонтальной и вертикальной линейкам. Отсчёты по третьей, четвертой и последующим точкам осуществить с интервалом 0,5 или 1 см. Полученные данные занести в табл. 3.

Форма записи результатов измерений

Номер точки	1	2	3	4	5	6	7
Отсчёт по горизонтальной шкале, см							
Отсчёт по вертикальной шкале, см							
Расстояние от оси вращения $r$ , см	0						
Ордината опытная $z_{оп}$ , см	0						
Ордината расчетная $z_p$ , см							

### Обработка результатов измерений

По указанному на приборе числу оборотов сосуда  $n = 220$  об/мин определить угловую частоту вращения  $\omega$  по формуле

$$\omega = \frac{2\pi \cdot n}{60} = \frac{\pi \cdot n}{30}. \quad (3.4)$$

По формуле (3.3) вычислить расчётные ординаты точек свободной поверхности. Принимая начало координатных осей  $r$  и  $z$  в точке свободной поверхности, лежащей на оси сосуда, полагают в этой точке  $r=0$  и  $z=0$ . Координаты других опытных точек определить разностью отсчётов по этим точкам с отсчётами осевой точки.

Нанести на график, построенный в координатах  $r$  и  $z$ , опытные и теоретические значения координат свободной поверхности, взятые из табл.3, и сопоставить их между собой.

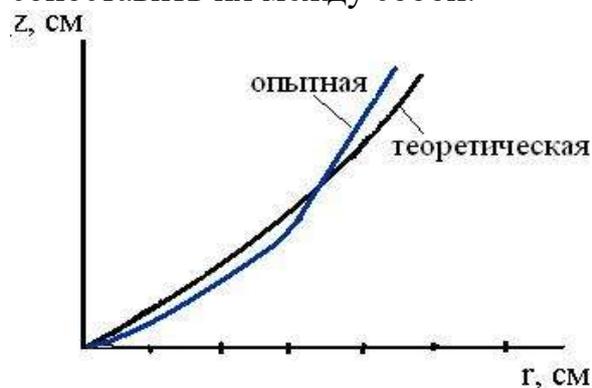


Рис.5. График зависимости свободной поверхности жидкости от расстояния до оси вращения сосуда

### Контрольные вопросы

1. Что понимается под абсолютным и относительным покоями жидкости?
2. Что называется поверхностью уровня? Напишите уравнение поверхности уровня.
3. Какими свойствами обладают поверхности уровня?
4. Какие силы действуют на жидкость при вращении сосуда с жидкостью?
5. Объясните, почему при вращении сосуда с жидкостью свободная поверхность имеет форму параболоида вращения.
6. Какую форму будет иметь свободная поверхность при вращении сосуда в предположении отсутствия силы тяжести?

## РАБОТА № 4

### ГЕОМЕТРИЧЕСКАЯ ИНТЕРПРЕТАЦИЯ УРАВНЕНИЯ БЕРНУЛЛИ

Темы для изучения при подготовке к работе:

1. Уравнение Бернулли для струйки идеальной жидкости.
2. Уравнение Бернулли для потока реальной жидкости.

#### 4.1. Цель работы

1. Построить пьезометрическую и напорную линии для струйки потока переменного сечения, используя для измерения трубки полного напора.
2. Оценить зависимость давления и скорости потока от площади сечения трубопровода.

#### 4.2. Краткие теоретические сведения

Для потока реальной жидкости при установившемся движении уравнение Бернулли для произвольно выбранных сечений I-I и II-II имеет вид

$$z_1 + \frac{P_1}{\gamma} + \frac{\alpha_1 \cdot v_1^2}{2g} = z_2 + \frac{P_2}{\gamma} + \frac{\alpha_2 \cdot v_2^2}{2g} + h_{1-2}, \quad (4.1)$$

где  $z$  - удельная потенциальная энергия положения центра тяжести сечения потока, отсчитанная от произвольно выбранной горизонтальной плоскости сравнения. В нашем случае за плоскость сравнения принимается плоскость, проходящую через центр тяжести первого сечения;

$P/\gamma$  - удельная потенциальная энергия давления (пьезометрическая высота);

$v^2/(2g)$  - удельная кинетическая энергия потока (скоростной напор);

$\alpha$  - коэффициент, учитывающий неравномерность распределения скоростей по сечению потока. Для струйки можно считать  $\alpha=1$ ;

$h_{1-2}$  - потеря полной удельной энергии потока на преодоление сопротивления на участке между рассматриваемыми сечениями.

*С геометрической точки зрения* все члены уравнения (4.1) выражают *высоты* и имеют размерность длины. *Физический смысл* уравнения - закон сохранения энергии при движении жидкости.

*Энергетический смысл* уравнения Бернулли - *полная удельная энергия потока* ( $E$ ) на участке

$$E = z + \frac{P}{\gamma} + \frac{\alpha \cdot v^2}{2g}, \quad (4.2)$$

а геометрический смысл - **полный гидродинамический напор ( $H$ )**, который может быть измерен высотой уровня жидкости в трубке полного напора.

ра, представляющей L-образную открытую трубку, поставленную одним концом навстречу потоку.

Сумма членов ( $h=z+P/\gamma$ ) называется **гидростатическим напором** и измеряется высотой жидкости в пьезометрах, установленных в сечениях. Тогда пьезометрический напор можно выразить из последнего равенства:

$$P/\gamma=h-z. \quad (4.3)$$

Откуда давление находится как

$$P=\gamma\cdot(h-z), \quad (4.4)$$

где  $\gamma=1000 \text{ кГ/м}^3$  - удельный вес воды.

Разница между полным гидродинамическим и гидростатическим напорами равняется **скоростному напору**:

$$H-h= \frac{v^2}{2g} . \quad (4.5)$$

Из формулы (4.5) определяется скорость:

$$v = \sqrt{2g \cdot (H - h)}. \quad (4.6)$$

### 4.3. Описание экспериментальной установки

Установка (рис. 6) представляет собой наклонный к горизонту водомер Вентури, сначала плавно сужающийся от диаметра  $d_1=40 \text{ мм}$  до  $d_2=20 \text{ мм}$ , а потом плавно расширяющийся до диаметра  $d_3$ . В трех сечениях установлены пьезометры 1,2,3 и трубки полного напора 1',2',3'. Концы всех трубок установлены на оси симметрии водомера Вентури. Поток воды создается с помощью напорного бака Б и регулируется вентилем В.

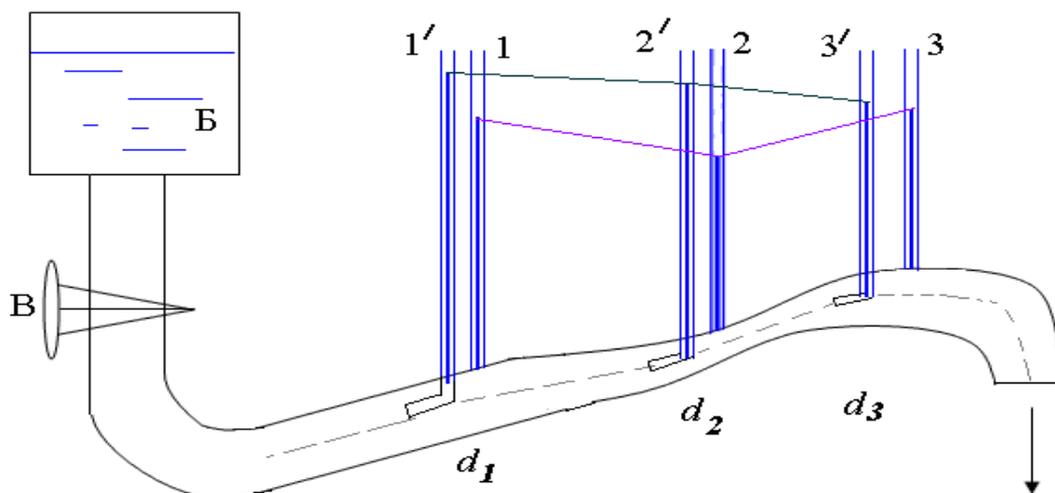
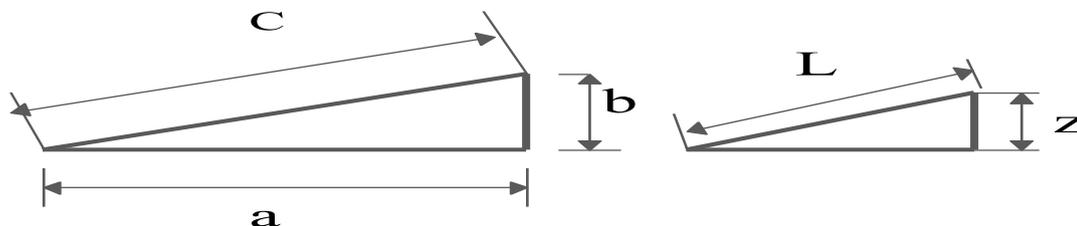


Рис. 6. Схема установки с расходомером Вентури

#### 4.4. Порядок выполнения работы

1. Для определения положения центров тяжести сечений 2 и 3 установки (рис. 6)  $z_2$  и  $z_3$  воспользуемся геометрическим подобием треугольников. Для этого необходимо от точки изгиба трубы отмерить длину  $C=200$  см и найти высоту ( $b$ ) от горизонтальной плоскости, проходящей через точку изгиба трубы.



Используя подобие треугольников, из соотношений найти искомые величины:

$$\frac{L_{1-2}}{C} = \frac{z_2}{b}, \quad \frac{L_{1-3}}{C} = \frac{z_3}{b};$$

где  $L_{1-2}$  и  $L_{1-3}$  - расстояния между сечениями 1-2 и 1-3;

$z_2, z_3$  - положения центров тяжести 2-го и 3-го сечений.

2. Открыть вентиль В, установить некоторый расход жидкости через во-домер Вентури.

3. Измерить и занести в табл. 4:

а) высоты уровней жидкости в пьезометрах в рассматриваемых трех сечениях  $h_1, h_2, h_3$ ;

б) высоты уровней жидкости в трубках полного напора  $H_1, H_2, H_3$ .

4. Вычислить во всех трех сечениях:

а) пьезометрический напор и давление по формулам (4.3) и (4.4);

б) скоростные напоры и скорости по формулам (4.5) и (4.6).

5. Вычислить потери напора на участках по отношению к первому сечению:

$$h_{1-2} = H_1 - H_2; \quad h_{1-3} = H_1 - H_3. \quad (4.7)$$

Таблица 4

Форма записи результатов измерений

Сечения	z, см	h, см	H, см	Потери напора, см	Давление P, кг/см <sup>2</sup>	Скорость, v, м/с	
						по ф-ле (4.6)	из ф-лы (4.8)
1	0						
2							
3							

$b =$  \_\_\_\_\_ мм;  $L_{1-2} =$  \_\_\_\_\_ мм;  $L_{1-3} =$  \_\_\_\_\_ мм.

6. По данным табл. 4 в масштабе на миллиметровой бумаге построить пьезометрическую и напорную линии с отметкой в каждом сечении четырех высот: геометрической  $z$ , пьезометрической  $P/\gamma$ , скоростной  $v^2/(2g)$  и потери напора  $h_{1-2}$ ;  $h_{1-3}$ . За плоскость сравнения принять плоскость, проходящую через ось потока в первом сечении.

7. По водомеру и секундомеру определить, за какое время по трубопроводу протекает объем воды  $W=10000 \text{ см}^3$ .  $t= \text{---}$  с и определить объемный расход  $Q$  и средние скорости  $v_1, v_2, v_3$  по формуле

$$v=4 \cdot Q/(\pi \cdot d^2). \quad (4.8)$$

Убедиться по результатам расчёта, что для струйки выполняется уравнение сохранения расхода в виде

$$v_1 \cdot S_1 = v_2 \cdot S_2 = v_3 \cdot S_3, \quad (4.8, a)$$

где в качестве площадей  $S$  взяты полные площади сечений водомера Вентури.

8. Сделать вывод о зависимости давления и скорости от площади сечения потока.

### Контрольные вопросы

1. Каковы энергетический и геометрический смыслы уравнений Бернулли?
2. Для каких потоков справедливо уравнение Бернулли в виде (4.1)?
3. Почему для струйки можно считать  $\alpha=1$ ?
4. Будут ли отличаться между собой скоростные напоры в данном сечении, замеряемый трубкой полного напора и вычисленный по средней скорости? Обоснуйте свой ответ.

## РАБОТА № 5

### ИЗУЧЕНИЕ РЕЖИМОВ ТЕЧЕНИЯ ЖИДКОСТИ В НАПОРНОМ ТРУБОПРОВОДЕ

Тема для изучения:

Ламинарное и турбулентное течение жидкостей.

#### 5.1. Цели работы

1. Визуальное наблюдение устойчивых ламинарного и турбулентного режимов течения жидкости.
2. Проверка этих режимов по числам Рейнольдса.

#### 5.2. Краткие теоретические сведения

Опыт показывает, что возможны два режима или два вида движения жидкостей и газов: **ламинарный** и **турбулентный**.

**Ламинарное движение** характеризуется упорядоченным перемещением отдельных частиц без перемешивания и без пульсаций скоростей и давле-

ний. Если в прямой трубе постоянного сечения течение жидкости ламинарное, то все линии тока направлены параллельно оси трубы.

**Турбулентное (беспорядочное)** движение характеризуется интенсивным перемешиванием частиц жидкости и пульсациями скоростей и давлений. Отдельные частицы жидкости при турбулентном движении имеют причудливые траектории, т.к. наряду с основным продольным перемещением жидкости вдоль трубы существуют поперечные перемещения и вращательное движение отдельных объемов жидкости.

Существование двух видов движения экспериментально подтверждено О. Рейнольдсом. На основании опытов он установил, что значение критической скорости прямо пропорционально кинематической вязкости жидкости и обратно пропорционально диаметру трубы:

$$v_{кр} = \frac{k \cdot \nu}{d}, \quad (5.1)$$

где  $k$  - безразмерный коэффициент пропорциональности, называемый **критическим числом Рейнольдса**, которое показывает во сколько раз силы инерции потока больше сил вязкого трения, и обозначается

$$Re_{кр} = \frac{v_{кр} \cdot d}{\nu}. \quad (5.2)$$

Значение  $Re_{кр}$  зависит от условий входа в трубу, шероховатости её стенок, отсутствия или наличия первоначальных возмущений в жидкости, конвекционных токов и др. При практических расчетах для круглых труб постоянного диаметра принимается  $Re_{кр} = 2320$ .

Ламинарное течение устойчиво и практически наблюдается при значениях числа Рейнольдса:

$$Re < Re_{кр}, \quad (5.3)$$

где

$$Re = vd/\nu,$$

здесь  $v$  - средняя скорость движения жидкости по сечению в трубе, м/с;

$v = Q/S$  ( $Q$  - объемный расход в м<sup>3</sup>/с,  $S$  - площадь сечения трубы.

Для трубы круглого сечения  $S = \pi d^2/4$ ).

$d$  - диаметр трубопровода, м;  $\nu$  - кинематическая вязкость, м<sup>2</sup>/с, кинематическая вязкость воды определяется по эмпирической формуле  $\nu = f(T^\circ C)$ :

$$\nu = 0,0175 \cdot (1 + 0,0158 \cdot T)^{-2}, \quad \text{см}^2/\text{с}. \quad (5.4)$$

При  $Re > Re_{кр}$  ламинарное течение теряет, а турбулентное течение приобретает устойчивость и, наконец, при числах Рейнольдса, больших некоторого значения  $Re'_{кр}$ , наблюдается вполне развитая турбулентность. Интервал  $Re_{кр} < Re < Re'_{кр}$  соответствует переходному режиму, при котором турбулентность перемежается с ламинарным режимом. Численное значение  $Re'_{кр}$

зависит от рода жидкости и условий течения и изменяется в широких пределах (4000 для минеральных масел, 12000 для воды).

Ламинарное течение практически наблюдается в тонких (капиллярных) трубках, в слое смазки в подшипниках, в зазорах между поршнем и цилиндром, в пограничном слое лопаток насосов и т.д.

Течения в реальных трубопроводах наиболее распространенных маловязких жидкостей (вода, бензин, масло, кислоты и пр.) являются, как правило, турбулентными.

### 5.3. Порядок выполнения работы

1. Открыть частично вентиль **5** и зажим **9** (рис. 7). Наблюдая за струйкой подкрашенной жидкости, вентилем **5** установить вытянутую прямую нить подкрашенной струйки.

2. Замерить температуру **T** текущей воды. Вычислить по эмпирической формуле (5.4) кинематическую вязкость.

3. Отметить уровень воды в мерном баке **6**, одновременно пустив секундомер. Когда в бак сольется заданный объем воды ( $W=1990 \text{ см}^3$ ), остановить секундомер и зафиксировать время **t** наполнения бака.

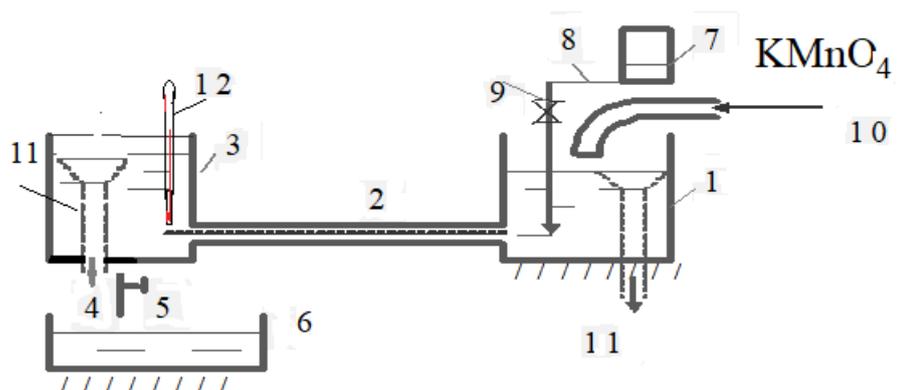


Рис. 7. Схема лабораторной установки Рейнольдса:

- 1 - бак с постоянно поддерживаемым уровнем воды;
- 2 - стеклянная трубка ( $d=2,5 \text{ см}$ ); 3-бак; 4-труба; 5-вентиль;
- 6 - мерный бак  $D=42 \text{ см}$  (площадь поперечного сечения бака  $F=1384,75 \text{ см}^2$ );
- 7 - сосуд с подкрашивающей жидкостью (раствор марганца  $\text{KMnO}_4$ );
- 8 - труба подачи подкрашивающей жидкости; 9 - зажим;
- 10,11 - трубки для постоянного поддержания уровня жидкости соответственно для заполнения и слива;
- 12 - термометр для контроля температуры воды ( $T^\circ\text{C}$ )

4. Рассчитать расход, который слился в бак  $Q=W/t, \text{ см}^3/\text{с}$ .

5. Все измерения повторить для переходного и турбулентного режимов течения. Чтобы изменить режим течения плавно, увеличить открытие вентиля **5**, наблюдая за формой окрашенной струйки.

Для переходного режима характерна волнистая траектория движения. Признаком турбулентного режима будет размывание окрашенной струйки по всему сечению трубы, так что вся вода в стеклянной трубе **2** становится окрашенной.

6. Результаты всех измерений и расчётов занести в табл. 5.

Таблица 5

Форма записи результатов измерений

Объём, $W, \text{ см}^3$	Время, $t, \text{ с}$	Расход, $Q,$ $\text{ см}^3/\text{с}$	Скорость, $v,$ $\text{ см}/\text{с}$	Число $Re$	Режим течения

### Контрольные вопросы

1. В каких случаях в природе и технике встречается ламинарное течение?
2. Вычертить эпюру скоростей движения жидкости в круглой трубе при ламинарном течении.
3. По каким параметрам изменяются со временем местные скорости в любой точке потока при турбулентном режиме движения жидкости?
4. Вычертить эпюру распределения скоростей в турбулентном потоке по сечению круглой трубы.
5. Каков физический смысл числа Рейнольдса?
6. Как изменится значение числа Рейнольдса с изменением площади поперечного сечения круглой трубы (при неизменных температуре и расходе жидкости)?
7. Какова зависимость между диаметром живого сечения трубы и скоростью движения жидкости в ней (при неизменном расходе и температуре)?

## РАБОТА № 6

### ИЗУЧЕНИЕ ЗАКОНОВ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ В НАПОРНОМ ТРУБОПРОВОДЕ

Тема для изучения при подготовке к работе:

Потери напора по длине в различных режимах течения.

#### 6.1. Цель работы

1. Определить коэффициенты гидравлического трения при течении воды в напорном трубопроводе в различных режимах.
2. Вычислить шероховатость внутренней поверхности стенки трубы.

## 6.2. Краткие теоретические сведения

В технических трубопроводах имеют место гидравлические сопротивления, которые приводят к потере напора. Как показывает опыт, во многих случаях потери напора примерно пропорциональны квадрату средней скорости движения жидкости, поэтому в гидравлике принято выражать потерянный напор пропорционально скоростному напору:

$$h = \zeta \frac{v^2}{2g}, \quad (6.1)$$

где  $\zeta$  - безразмерный коэффициент пропорциональности, называемый коэффициентом сопротивления.

Сопротивление при турбулентном режиме больше, чем при ламинарном вследствие перемешивания жидкости.

Потери напора потока вызываются сопротивлениями двух видов:

- 1) сопротивлениями по длине, обусловленными силами трения;
- 2) местными сопротивлениями, вызванными изменениями скорости потока по величине и направлению.

*Потери напора по длине*, или, как их еще называют, потери на трение или путевые потери, затрачиваемые на преодоление сопротивления вязкого трения при течении жидкости в трубе, описываются уравнением (6.1), а коэффициент сопротивления  $\zeta_{тр}$  удобно связывать с относительной длиной трубы  $L/d$  и коэффициентом гидравлического трения  $\lambda$ . В результате формула (6.1) приобретет вид формулы Дарси-Вейсбаха:

$$h_{тр} = \lambda \cdot \frac{L}{d} \cdot \frac{v^2}{2g}, \quad (6.2)$$

где  $L$  - длина трубы,  $\lambda$  - коэффициент гидравлического трения.

Коэффициент  $\lambda$  зависит от числа  $Re$  и относительной шероховатости  $\Delta/d$ , здесь  $\Delta$  - абсолютная шероховатость, т.е. некоторая осредненная эквивалентная высота неровностей внутренней поверхности стенки трубы. Для новых стальных труб  $\Delta=0,06$  мм, для бывших в употреблении  $\Delta=0,2-1$  мм.

Существует несколько областей изменения числа Рейнольдса, в которых закон сопротивления  $\lambda=f(Re, \Delta/d)$  имеет различный вид:

1. **Область линейного сопротивления** (ламинарный режим), для которой потери напора  $h_{тр}$  пропорциональны первой степени скорости и не зависят от шероховатости труб:

$$0 < Re < Re_{кр} \quad \lambda = 64/Re \quad (\text{формула Стокса}). \quad (6.3)$$

2. **Область гладкого трения.**

В этой области изменения числа  $Re$  поток состоит из турбулентного ядра и вязкого пристенного подслоя, затапливающего неровности поверхно-

сти стенки, ввиду чего  $\lambda$  не зависит от шероховатости и труба считается гидравлически гладкой. По мере роста числа  $Re$  сверх  $Re'_{кр}$  толщина вязкого подслоя  $\delta$  уменьшается и при граничном значении  $Re=Re_{гл.тр}$  самые высокие бугорки шероховатости начинают выступать из него. Из теории пограничного слоя для толщины вязкого подслоя получается формула

$$\delta = 20,94 \sqrt{L/(dgh_{тр.})} , \quad (6.4)$$

$$Re'_{кр} < Re < Re_{гл.тр} , \quad \lambda = 0,3164 \cdot Re^{-0,25} \text{ (формула Блазиуса).} \quad (6.5)$$

### 3. Область смешанного трения.

С увеличением числа  $Re$  выступы еще более обнажаются вязким подслоем, что вносит дополнительные вихреобразования, и сопротивление возрастает. Таким образом, сопротивление в этой области обусловлено смешанным влиянием вязкости (число  $Re$ ) и шероховатости. Верхняя граница области  $Re_{ш}$  есть число Рейнольдса, при котором за пределы вязкого подслоя выходят самые низкие выступы, т.е. вязкий слой практически исчезает:

$$Re_{ш} = 500 d/\Delta, \quad (6.6)$$

$Re_{гл.тр} < Re < Re_{ш}$  (формула Альтшуля):

$$\lambda = 0,11(\Delta/d + 68/Re)^{0,25}. \quad (6.7)$$

### 4. Область квадратичного сопротивления.

$$Re_{ш} < Re, \quad \lambda = 0,11(\Delta/d)^{0,25} \text{ (формула Шифринсона)} \quad (6.8)$$

В этой области все выступы шероховатости больше толщины вязкого подслоя. Гидравлическое сопротивление, обусловленное вихреобразованием на шероховатой стенке, определяется только относительной шероховатостью  $\Delta/d$ , значения  $\lambda$  не зависят от числа Рейнольдса, и потери напора в трубе пропорциональны квадрату скорости.

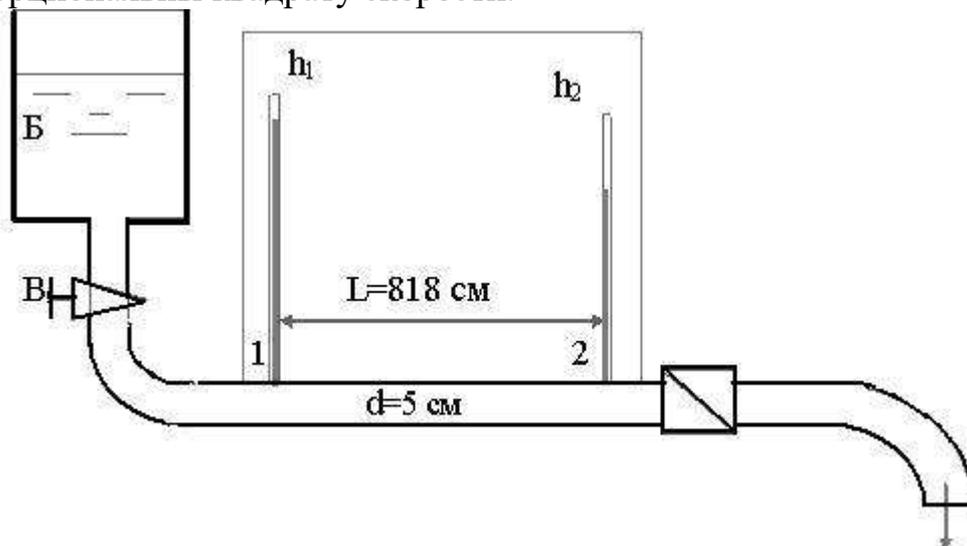


Рис. 8. Схема установки для оценки потерь напора по длине

### 6.3. Порядок выполнения эксперимента

1. Определить температуру воды и вычислить кинематическую вязкость по формуле  $\nu = 0,0175 \cdot (1 + 0,0158 \cdot T)^{-2}$ , в см<sup>2</sup>/с. (6.9)

2. Открыть вентиль В, установить постоянный расход жидкости в трубе.

3. По водомеру и секундомеру определить за какое время по трубопроводу (рис. 8) протекает объем воды  $W = 10000 \text{ см}^3$ .  $t = \text{___}$  с.

4. Вычислить расход, скорость, число **Re** для каждого опыта.

5. Определить высоты уровней жидкости в пьезометрах в сечениях 1 и 2.

6. Вычислить потери на трение.

Из уравнения Бернулли (4.1), написанного для сечений 1 и 2, при условии  $v_1 = v_2$  и горизонтальности трубы (т.е.  $z_1 = z_2$ ), получим

$$h_{\text{тр}} = h_1 - h_2. \quad (6.10)$$

7. Вычислить опытные значения коэффициентов гидравлического трения по формуле

$$\lambda = \frac{2g \cdot h_{\text{тр}} \cdot d}{L \cdot v^2} \quad (6.11)$$

(размерности всех величин необходимо привести к системе СИ).

8. Определить значения шероховатости трубы.

9. Задавшись шероховатостью трубы в пределах  $\Delta = 1 - 2$  мм определить  $\lambda_{\text{расч}}$  по формуле (6.7).

Результаты расчётов внести в табл. 6.

Таблица 6

Форма записи результатов измерений

$t = \text{___} \text{ } ^\circ\text{C}$   $\nu = \text{___} \text{ см}^2/\text{с}$

Номера опыта	Объём W, см <sup>3</sup>	Время t, с	Расход Q, см <sup>3</sup> /с	v, см/с	Re	h <sub>1</sub> , см	h <sub>2</sub> , см	h <sub>тр</sub> , см	$\lambda_{\text{оп}}$	$\lambda_{\text{расч}}$	$\Delta$ , см
1											
2											

### Контрольные вопросы

1. В начале или в конце горизонтальной прямолинейной шероховатой трубы постоянного сечения больше скорость, если давления в сечениях не зависят от времени?

2. Вывести формулу для расчета потерь напора на трение.

3. Влияет ли температура на скорость течения вязкой жидкости в трубопроводе, если начальный напор остается постоянным?

## РАБОТА № 7

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТОВ МЕСТНЫХ СОПРОТИВЛЕНИЙ

Тема для изучения при подготовке к работе:

Местные сопротивления.

#### 7.1. Цель работы

Определить опытным путем коэффициенты различных местных сопротивлений и сравнить их со справочными данными.

#### 7.2. Краткие теоретические сведения

Потери напора, сосредоточенные на коротких участках и обусловленные изменением скорости потока по величине или по направлению, называют *местными*.

Местные потери напора  $h_m$  определяются по эмпирической формуле Вейсбаха:

$$h_m = \zeta_m \cdot \frac{v^2}{2g}, \quad (7.1)$$

где  $v$  - средняя скорость потока в сечении трубопровода до или за местным сопротивлением;

$\zeta_m$  - коэффициент данного местного сопротивления, отнесенный к соответствующему скоростному напору.

Численные значения  $\zeta_m$  зависят от вида местного сопротивления и определяются, как правило, опытным путем. Лишь для внезапного расширения потока  $\zeta_p$  определен теоретически. Из формулы Борда для потерь напора при внезапном расширении потока

$$h_{в.р.} = \frac{(v_1 - v_2)^2}{2g} \quad (7.2)$$

следует, что

$$h_{в.р.} = \zeta_p \frac{v_1^2}{2g} = \left(1 - \frac{d_1^2}{d_2^2}\right)^2 \cdot \frac{v_1^2}{2g} \quad \text{и} \quad \zeta_p = \left(1 - \frac{d_1^2}{d_2^2}\right)^2. \quad (7.3)$$

#### 7.3. Описание экспериментальной установки

Лабораторная установка (рис. 9) состоит из напорного резервуара 1, снабженного сливной линией 2, напорного трубопровода 5 с регулировочным вентилем 9 на его конце и турбинным расходомером 8.

По длине напорного трубопровода **5** имеются различные местные сопротивления: внезапное расширение и сужение трубы **6** (с диаметрами  $d_1=50$  мм и  $d_2=100$  мм) и вентиль **7**. До каждого местного сопротивления и после него установлены пьезометры, смонтированные на общем щите **10**, снабженном шкалой. Подача воды в напорный резервуар **1** осуществляется по трубе **3** и регулируется вентилем **4**.

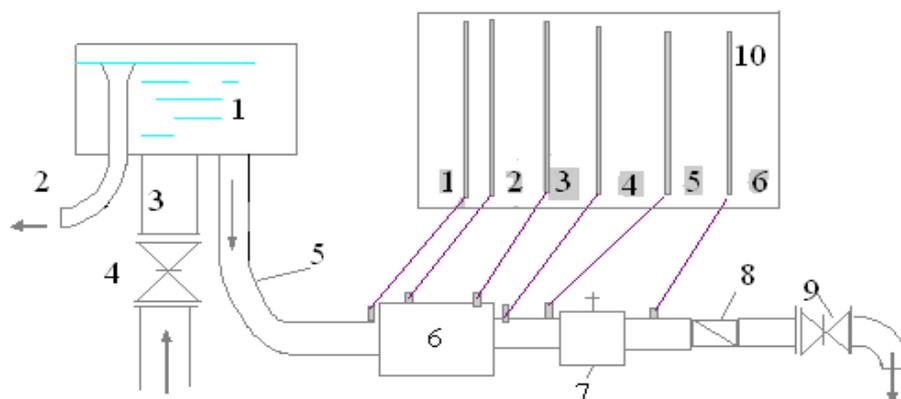


Рис. 9. Схема лабораторной установки по определению местных сопротивлений

#### 7.4. Порядок выполнения работы

При помощи вентиля **4** и **9** устанавливают определенный режим движения воды по напорному трубопроводу. Уровень воды в резервуаре **1** должен оставаться при этом постоянным, а через переливную трубку **2** должно вытекать небольшое количество воды.

Снимают показания всех пьезометрических трубок. С помощью секундомера определяют время, за которое стрелка расходомера пройдет десять делений по шкале, чему соответствует объем воды, прошедший через расходомер, равный 10 л. С помощью вентиля **4** и **9** устанавливают новый режим движения воды и повторяют измерения.

Результаты измерений сводят в табл. 7.

Таблица 7

Форма записи результатов измерений

Номер опыта	Показания пьезометров, см						Объем воды, протекающий через расходомер $V, \text{ м}^3$	Время по секундомеру $t, \text{ с}$
	$h_1$	$h_2$	$h_3$	$h_4$	$h_5$	$h_6$		

### 7.5. Обработка результатов измерений

Определяют объемный расход воды по формуле

$$Q=V/t. \quad (7.4)$$

Вычисляют средние скорости до внезапного расширения и после него:

$$v_1 = \frac{4Q}{\pi d_1^2}; \quad v_2 = \frac{4Q}{\pi d_2^2}. \quad (7.5)$$

Определяют потери напора в каждом местном сопротивлении:

- при внезапном расширении потока:

$$h_{в.р.} = h_1 - h_2 + \frac{v_1^2 - v_2^2}{2g}; \quad (7.6)$$

- при внезапном сужении потока:

$$h_{в.с.} = h_3 - h_4 + \frac{v_2^2 - v_1^2}{2g}; \quad (7.7)$$

- в вентиле:

$$h_{в.} = h_5 - h_6. \quad (7.8)$$

По формуле

$$\zeta_M = 2g \cdot h_M / v_1^2 \quad (7.9)$$

вычисляют коэффициент каждого местного сопротивления  $\zeta_p$ ,  $\zeta_c$ ,  $\zeta_{в.}$ .

Подсчитывают теоретическое значение коэффициента местного сопротивления при внезапном расширении потока:

$$\zeta_{р.т.} = \left(1 - \frac{d_1^2}{d_2^2}\right)^2. \quad (7.10)$$

Результаты вычислений сводят в табл. 8.

Таблица 8

Форма записи результатов вычислений

Номер опыта	Расход Q, м <sup>3</sup> /с	Средняя скорость, м/с		Потери напора, м			Коэффициенты сопротивлений			
		v <sub>1</sub>	v <sub>2</sub>	h <sub>р</sub>	h <sub>с</sub>	h <sub>в</sub>	ζ <sub>р</sub>	ζ <sub>с</sub>	ζ <sub>в</sub>	ζ <sub>р.т.</sub>

Сопоставляют опытный коэффициент сопротивления при внезапном расширении потока  $\zeta_p$  с его теоретическим значением  $\zeta_{р.т.}$ , а остальные коэффициенты с соответствующими справочными данными.

#### Контрольные вопросы

1. Что понимается под местными сопротивлениями?
2. Перечислите простейшие сопротивления.
3. Изобразите схематично характер течения при внезапном расширении потока.
4. Изобразите схематично характер течения при внезапном сужении потока.

5. Запишите различные виды формул для коэффициента сопротивления при внезапном расширении потока.
6. Что такое эквивалентная длина местного сопротивления?
7. Каковы преимущества диффузора перед внезапным расширением?
8. Как называется устройство, осуществляющее постепенное сужение потока? Изобразите его.
9. На какие группы могут быть разбиты местные потери в зависимости от изменения формы и размеров живого сечения потока?

## РАБОТА № 8

### ИСТЕЧЕНИЕ ВОДЫ ЧЕРЕЗ МАЛОЕ ОТВЕРСТИЕ В ТОНКОЙ СТЕНКЕ И ЧЕРЕЗ ЦИЛИНДРИЧЕСКИЙ НАСАДОК ПРИ ПОСТОЯННОМ НАПОРЕ

Тема для изучения при подготовке к работе:

Истечение жидкости из отверстий и через насадки

#### 8.1. Цель работы

1. Экспериментально определить коэффициенты сжатия, скорости, расхода и сопротивления при истечении воды через круглое малое отверстие и через круглый цилиндрический насадок.
2. Сопоставить пропускную способность отверстия и насадка при одинаковых напорах.

#### 8.2. Краткие теоретические сведения

При истечении жидкости через отверстия наблюдается уменьшение сечения струи, вызванное необходимостью поворота траекторий частиц к направлению вдоль оси отверстия и сжимающим действием, возникающих вследствие этого центробежных сил инерции. Участок уменьшения сечения струи заканчивается сжатым сечением на расстоянии, равном примерно половине диаметра отверстия  $d$ , после чего струя вновь расширяется. Отношение площади самого узкого сечения струи  $S_c$  к площади отверстия  $S$  называется коэффициентом сжатия  $\epsilon$ .

Расход жидкости через отверстие выражается формулой

$$Q = v \cdot \epsilon \cdot S = \mu \cdot S \cdot \sqrt{2gH_0}, \quad (8.1)$$

где  $v$  - скорость в сжатом сечении струи. Из уравнения Бернулли следует

$$v = \varphi \sqrt{2gH_0}, \quad (8.2)$$

здесь  $H_0$  - расчётный напор. При истечении из открытого резервуара в атмосферу  $H_0 = H$ .

$$\varphi - \text{коэффициент скорости; } \varphi = (1 + \zeta)^{-1/2} \quad (8.3)$$

$$\mu - \text{коэффициент расхода} \quad \mu = \varphi \cdot \varepsilon \quad (8.4)$$

$\zeta$  - коэффициент сопротивления,  $\varepsilon$  - коэффициент сжатия.

При истечении через насадок (короткая труба длиной  $L = (2-6) \cdot d$ , присоединённая к отверстию в стенке) также наблюдается сжатие струи. Пройдя сжатое сечение, струя расширяется или до размеров поперечного сечения насадка (безотрывный режим истечения) или до размеров, меньших поперечного сечения насадка (истечение с отрывом). В последнем случае струя вылетает, не касаясь стенок насадка.

При безотрывном режиме истечения в сжатом сечении, находящемся внутри насадка, образуется вакуум, подсасывающий жидкость и способствующий увеличению пропускной способности, хотя сопротивление для насадка больше, чем для отверстия. С увеличением напора  $H_0$  до некоторой предельной величины давление в сжатом сечении может понизиться до давления насыщения паров при данной температуре, тогда жидкость вскипает и образующиеся пары заставляют поток оторваться от стенок, насадок будет действовать как простое отверстие.

Расчётные формулы (8.1)-(8.4) справедливы и для насадков при безотрывном режиме истечения. Под  $S$  понимается выходное сечение насадка,  $v$  - скорость в сжатом сечении струи *после* выходного отверстия насадка (для цилиндрического насадка это сечение совпадает с выходным).

После выхода из отверстия или насадка жидкие частицы, имея начальную горизонтальную скорость, свободно падают, описывая параболическую траекторию по закону

$$x = v \cdot t, \quad z = g \cdot t^2 / 2. \quad (8.5)$$

Заметим, что  $z$  отсчитывается от оси отверстия вниз, а горизонтальная координата -  $x$  отсчитывается от самого узкого сечения струи для отверстия и от выходного сечения цилиндрического насадка.

Преобразовывая формулу (8.5) подстановкой  $t = x/v$  в выражение для  $z$  и используя (8.2), получим соотношение, связывающее коэффициент скорости  $\varphi$  с координатами струи:

$$\varphi = \frac{x}{2 \cdot \sqrt{zH_0}}. \quad (8.6)$$

### 8.3. Порядок выполнения работы

1. Установить требуемый напор  $H$ ; максимально открыть вентиль  $B$ ; при закрытом затворе вставить и закрепить в стенке бака  $B_1$  диск с отверстием (рис. 10).

2. Закрыть сливное отверстие бака  $B_2$ , измерить уровень  $h_0$  воды в нем, поставить бак  $B_2$  на место ожидаемого падения струи.

3. Открыть затвор  $Z$  и одновременно пустить секундомер для измерения времени истечения.

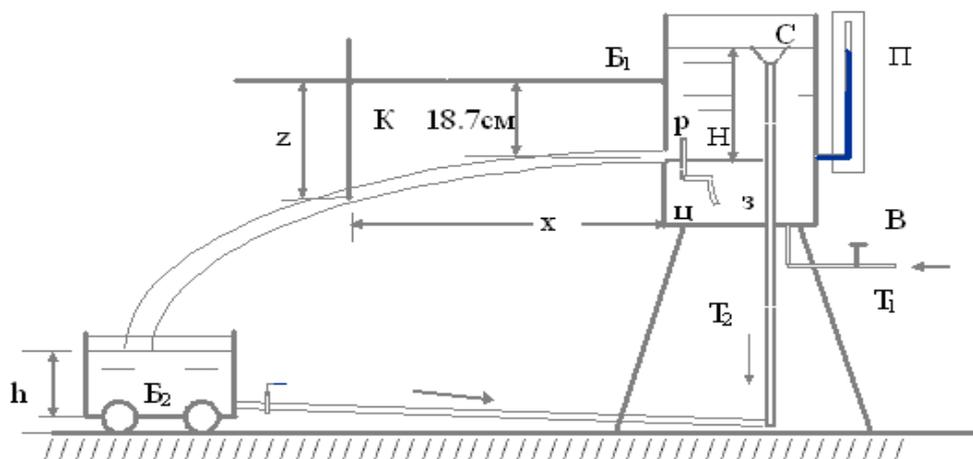


Рис. 10. Схема экспериментальной установки для исследования истечения жидкости через отверстие и насадки:

Б<sub>1</sub> и Б<sub>2</sub>- баки; Т<sub>1</sub> и Т<sub>2</sub>-трубы водопрводная и сливная; С-воронка трубы Т<sub>2</sub>, П-пьезометр для контроля напора Н; З-затвор, жестко соединен с валом Ц, на конце которого закреплена рукоятка Р, поворотом которой закрывается и открывается затвор; К - координатник для измерения координат струи

4. Измерить вертикальные координаты (Z) центра тяжести струи, перемещая вертикальную линейку от начала к концу струи по горизонтали через равные расстояния.

Все измеренные значения Z<sub>i</sub> занести в табл. 9 и уменьшить на вертикальное смещение горизонтальной линейки координатника вверх относительно центра отверстия.

Измеренные значения X<sub>i</sub> уменьшить с учётом поправки на горизонтальное смещение сжатого сечения от плоскости стенки (нуль линейки)- для отверстия.

5. Закрывать затвор З и одновременно остановить секундомер.

6. Измерить уровень h воды в мерном баке Б<sub>2</sub> и подсчитать объём W жидкости, поступившей в бак за время истечения t по формуле

$$W=(h-h_0)F, \text{ здесь } F=2840\text{см}^2 - \text{площадь бака Б}_2. \quad (8.7)$$

7. Результаты наблюдений занести в табл. 9.

Таблица 9

Форма записи результатов вычислений

Наименование насадка, d и L	№ точки	X <sub>i</sub> , см	H, см	Z <sub>i</sub> , см	Z <sub>i</sub> , см	φ <sub>i</sub>	W, см <sup>3</sup>	t, с	Q <sub>v</sub> , см <sup>3</sup> /с	φ	μ	ζ	ε
Круглое отверстие d=3см	1												
	2												
	3												
Внешний цилиндрический насадок d=3 см L=6 см	1												
	2												
	3												

**Примечание.** Если какое-либо из φ<sub>i</sub> окажется больше 1, это будет свидетельствовать об ошибке в измерениях x, z, т.к. по физическому смыслу коэффициент скорости для реальной жидкости всегда меньше единицы. Ошибочное значение (φ<sub>i</sub> >1) нельзя включать в расчёт по (8.7).

8. При закрытом затворе вставить и закрепить в стенке бака  $B_1$  диск с внешним цилиндрическим насадком.

9. Повторить выполнение пп. 2-7, только для внешнего цилиндрического насадка по п. 4, внести поправку на вычет длины насадка и рассчитывать  $x_i$  для цилиндрического насадка.

10. Обработать результаты опытов.

- По формуле (8.6) найти  $\varphi_i$  для наблюдаемых  $i$ -тых точек.

- Рассчитать  $Q=W/t$ ; коэффициент расхода  $\mu=Q/(S\sqrt{2gH})$ .  $S=\pi d^2/4$ . (8.8)

- Вычислить осредненное значение коэффициента скорости

$$\varphi = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \varphi_i, \quad (8.9)$$

где  $N$  - число точек струи, для которых измерялись координаты при истечении через отверстие или насадок.

- Коэффициенты сопротивления- $\zeta$  и сжатия - $\varepsilon$  определить по формулам

$$\zeta = \varphi^{-2} - 1, \quad \varepsilon = \mu/\varphi. \quad (8.10)$$

11. Сравнить величины  $Q$ ,  $\varphi$ ,  $\mu$ ,  $\zeta$ ,  $\varepsilon$  для отверстия и различных насадков и сделать вывод о целесообразности применения того или иного насадка (отверстия) в различных производственных ситуациях.

### Контрольные вопросы

1. С какой целью используются в технике насадки различной формы?
2. Чем отличается насадок от трубы?
3. Как изменяются величины  $Q$ ,  $\varphi$ ,  $\mu$  при увеличении напора  $H$  при истечении через внешний цилиндрический насадок?
4. В каком случае больше сопротивление: при истечении из отверстия или из насадка?
5. При безотрывном режиме истечения из цилиндрического насадка или из отверстия будет больше пропускная способность и почему?
6. Чему равен коэффициент сжатия для внешнего цилиндрического насадка и почему?
7. Как связаны между собой коэффициенты расхода и скорости и каково их соотношение для внешнего цилиндрического насадка?
8. Как доказать наличие вакуума внутри насадка?
9. Как зависят коэффициенты  $\varphi$ ,  $\mu$ ,  $\zeta$ ,  $\varepsilon$  от числа Рейнольдса?

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Калицун В.И., Дроздов Е.В. Основы гидравлики и аэродинамики : Учебник. - 2-е изд., перераб. и доп. - М. : Стройиздат, 2002. - 296 с. : ил. - Библиогр.: с.294. - ISBN 5-274-00456-3
2. Штеренлихт, Д.В. Гидравлика: учеб. рек. МО РФ - 3-е изд. – М.: Колосс, 2005. – 655 с.
3. Чугаев, Р. Р. Гидравлика: (Техническая механика жидкости): учебник для вузов. - 4-е изд., доп. и перераб. - Л. : Энергоатомиздат. Ленинградское отделение, 1982 (Л. : Ленингр. произв.-техн. об-ние "Печатный Двор" им. А. М. Горького Союзполиграфпрома при Гос. ком. СССР по делам изд-в, полиграфии и кн. торговли, 1982). - 671 с.
4. Константинов Н.М. Гидравлика, гидрология, гидрометрия: учебник для вузов/Н.М. М Константинов, Н.А. Петров, П.И. Высоцкий - М.: Высшая школа, 1987. - 304 с.
5. Башта Т.М. Гидравлика, гидравлические машины и гидравлические приводы: учебник для вузов/ Т.М. Башта, С.С. Руднев, Б.Н. Некрасов, О.В. Байбаков, Ю.Л. Кирилловский - М.: Машиностроение, 1982. - 423 с.

## О Г Л А В Л Е Н И Е

<b>В В Е Д Е Н И Е</b> .....	<b>3</b>
РАБОТА № 1 Измерение вязкости жидкости .....	4
РАБОТА № 2 Измерение давлений жидкостными приборами .....	7
РАБОТА № 3 Исследование относительного покоя жидкости .....	10
РАБОТА № 4 Геометрическая интерпретация уравнения Бернулли ..	13
РАБОТА № 5 Изучение режимов течения жидкости в напорном трубопроводе .....	16
РАБОТА № 6 Изучение законов гидравлического сопротивления в напорном трубопроводе .....	19
РАБОТА № 7 Экспериментальное определение коэффициентов местных сопротивлений .....	23
РАБОТА № 8 Истечение воды через малое отверстие в тонкой стенке и через цилиндрический насадок при постоянном напоре	27
<b>БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК</b> .....	<b>30</b>

**Техническая механика жидкости**  
методические указания к выполнению  
лабораторных работ по гидравлике  
для студентов направлений 08.03.01, 08.04.01, 20.03.02,  
и специальностей: 23.05.01, 08.05.01, 20.05.01  
всех форм обучения

**С о с т а в и т е л и:**

Виктор Филиппович Бабкин,  
Ирина Владимировна Журавлева

Редактор

Подписано в печать \_\_\_\_\_ 2021. Формат 60x84 1/16.

Бумага для множительных аппаратов.

Усл. печ. л. 2,0. Тираж 150 экз. Заказ № \_\_\_\_\_

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»  
394026 Воронеж, Московский просп., 14

Участок оперативной полиграфии издательства ВГТУ  
394026 Воронеж, Московский просп., 14