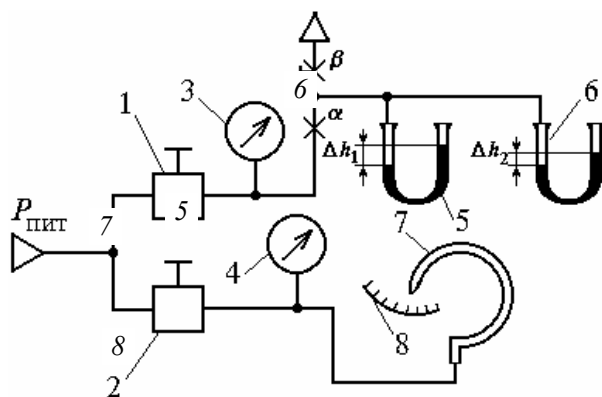


# ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ИЗМЕРЕНИЙ



• ИЗДАТЕЛЬСТВО ТГТУ •

Министерство образования Российской Федерации  
Тамбовский государственный технический университет

# **ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ИЗМЕРЕНИЙ**

Методические указания к лабораторным работам  
для студентов 2 курса дневного и 3 курса заочного отделений  
специальности 072000

**Тамбов**  
**Издательство ТГТУ**  
**2002**

УДК 681.20  
ББК Ж11я73-5  
Ф503

Утверждено Редакционно-издательским советом университета

Рецензент  
Кандидат технических наук, доцент  
*А. В. Трофимов*

Составители:  
*Д. М. Мордасов, М. М. Мордасов*

Ф503 Физические основы измерений: Метод. указ. / Сост.:  
Д. М. Мордасов, М. М. Мордасов. Тамбов: Изд-во Тамб. гос.  
техн. ун-та, 2002. 32 с.

Методические указания содержат теоретический и практический материал, необходимый студентам при выполнении лабораторных работ по изучению физических основ измерения температуры, давления, плотности сыпучих материалов, поверхностного натяжения и вязкости жидкостей.

Предназначены для студентов 2 курса дневного и 3 курса заочного отделений специальности 072000.

УДК 681.20  
ББК Ж11я73-5

© Тамбовский государственный

технический университет, 2002

УЧЕБНОЕ ИЗДАНИЕ

# ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ИЗМЕРЕНИЙ

Методические указания

С о с т а в и т е л и:

МОРДАСОВ Денис Михайлович,  
МОРДАСОВ Михаил Михайлович

Редактор Т. М. Г л и н к и н а

Инженер по компьютерному макетированию М. Н. Р ы ж к о в а

ЛР № 020851 от 27.09.99

П<sub>лр</sub> № 020079 от 28.04.97

Подписано в печать 21.01.2002

Гарнитура Times New Roman. Формат 60×84/16

Бумага газетная. Печать офсетная. Объем: 1,86 усл. печ. л.; 1,7 уч.-изд. л.

Тираж 150 экз. С. 43

Издательско-полиграфический центр

Тамбовского государственного технического университета  
392000, Тамбов, Советская, 106, к. 14

## Лабораторная работа № 1

### ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ

#### манометрическим методом

*Цель работы.* Выявление физических эффектов, возникающих при изменении температуры вещества в замкнутом постоянном объеме. Изучение конструкции и принципа действия манометрических датчиков температуры.

#### *Методические указания*

Манометрический принцип измерения температуры основан на использовании зависимости давления вещества в замкнутом постоянном объеме от температуры. В качестве термометрического тела используется газ (обычно азот), жидкость (ртуть, метиловый спирт, ксилол). Зависимость давления газа от температуры выражается уравнением

$$P_t = P_0 [1 + \beta(t - t_0)], \quad (1)$$

где  $\beta = 1/273,15$  град<sup>-1</sup> – термический коэффициент расширения газа;  $t_0$  и  $t$  – соответственно начальная и конечная температуры, °С;  $P_0$  – давление рабочего вещества при  $t_0$ .

Из уравнения (1) находим величину изменения давления

$$\Delta P = P_t - P_0 = P_0 \beta (t - t_0). \quad (2)$$

Измеряя изменения давления в замкнутой системе, заполненной газом, судят об изменении температуры. Газ для заполнения манометрических термометров должен быть химически инертным, обладать незначительной вязкостью, малой теплоемкостью, легко получаться в чистом виде. Всем этим требованиям наиболее полно удовлетворяет азот.

Изменение давления от температуры для жидкости можно представить уравнением

$$\Delta P = \frac{\beta}{\mu} \Delta t, \quad (3)$$

где  $\Delta P$  – изменение давления;  $\beta$  – коэффициент объемного расширения жидкости;  $\mu$  – коэффициент сжимаемости жидкости;  $\Delta t$  – изменение температуры.

Как видно из уравнений (2) и (3), изменение давления газа и жидкости при нагревании их в замкнутом объеме является линейной функцией изменения температуры.

### Описание лабораторной установки

На рис. 1 представлена схема экспериментальной установки для проведения работы.

В термостат 1, снабженный нагревателем 2 и мешалкой 3 погружен чувствительный элемент 4 манометрического датчика температуры, к выходу которого подключен манометр 5. Температура в термостате 1 изменяется последовательным включением нагревателя 2 и мешалки 3 и измеряется с помощью лабораторного термометра 6 типа ТЛ-4.

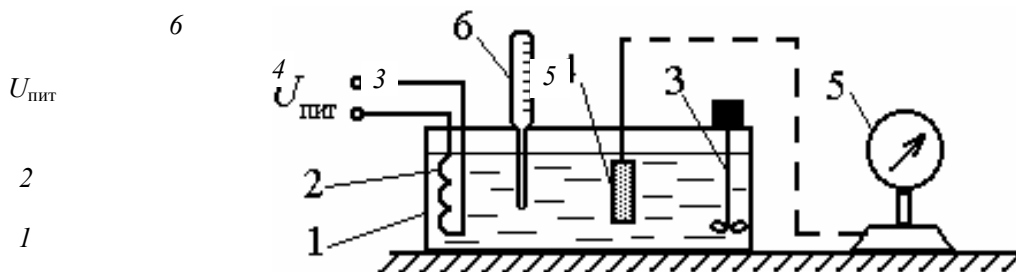


Рис. 1 Схема лабораторной установки

### Порядок выполнения работы

- 1 Измерить и записать в табл. 1 начальную температуру  $t_0$  теплоносителя термостата и соответствующее ей значение давления  $P_0$  термометрического тела.
- 2 Для температур, заданных преподавателем, измерить значения давлений  $P_t$ . Результаты измерений занести в табл. 1.
- 3 Путем расчета погрешностей  $\Delta P_t$  и  $\delta P_t$  сравнить экспериментальные и расчетные значения давлений  $P_t$ . Результаты занести в табл. 1.
- 4 Построить экспериментальную и теоретическую статическую характеристику преобразователя.

Таблица 1

### Результаты экспериментального исследования

#### работы манометрического преобразователя температуры

№	$t, ^\circ\text{C}$	$P_t^{\text{эксп}},$ кПа	$P_t^{\text{теор}},$ кПа	$t_0, ^\circ\text{C}$	$P_0,$ кПа	$\Delta P_t,$ кПа	$\delta P_t,$ кПа
1							

2					
3					
4					
5					
6					
7					

### ***Контрольные вопросы***

- 1 Каков физический смысл температуры?
- 2 На чем основан манометрический принцип измерения температуры?
- 3 Что такое термометрическое тело?
- 4 Сформулируйте требования, предъявляемые к газам для заполнения манометрических термометров.
- 5 Поясните методику выполнения лабораторной работы.

### ***Список литературы***

- 1 Кулаков М. В. Технологические измерения и приборы для химических производств. М.: Машиностроение, 1983. 462 с.
- 2 Фарзани Н. Г., Илясов Л. В., Азим-заде А. Ю. Технологические измерения и приборы: Учеб. пособие. М.: Высш. школа, 1989. 456 с.
- 3 Бородин И. Ф. Технические средства автоматики. М.: Колос, 1982. 303 с.

Лабораторная работа № 2

## ***ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ИЗМЕРЕНИЯ ДАВЛЕНИЯ***

*Цель работы.* Выявление физических эффектов, возникающих при подаче давления в U-образную трубку и в трубку овального сечения (трубку Бурдона). Изучение конструкции и принципа действия U-образных манометров и деформационных приборов давления.

## Методические указания

Давлением называют отношение силы, действующей перпендикулярно поверхности, к площади этой поверхности. Давление – одна из основных величин, определяющих термодинамическое состояние веществ. Давлением во многом определяется ход технологического процесса, состояние технологических аппаратов и режимы их функционирования.

В основу измерения давления U-образным манометром заложен принцип гидростатического уравнивания.

При подаче давлений  $P_a$  и  $P_b$  в трубки U-образного манометра (рис. 2.) равновесие действующих в системе сил, при равенстве площадей  $S_1$  и  $S_2$  сечений трубок, описывается уравнением

$$P_b S + \Delta \rho g h S = P_a S,$$

где  $\Delta \rho = \rho_{ж} - \rho_{г}$  – разность плотностей жидкости  $\rho_{ж}$  и газа  $\rho_{г}$ .

Измеряемое давление  $P = P_a - P_b$  определяется высотой  $h$  столба уравнивающей жидкости, ее плотностью  $\rho_{ж}$  и плотностью среды  $\rho_{г}$  над уравнивающей жидкостью:

$$P = h(\rho_{ж} - \rho_{г})g. \quad (4)$$

Если  $\rho_{ж} \gg \rho_{г}$ , то уравнение (4) упрощается и принимает вид

$$P = \rho_{ж} g h.$$

При измерении отсчет необходимо производить по двум уровням. Нельзя отсчитывать уровень в одной трубке и результат умножать на два. Неодинаковый диаметр стеклянных трубок может привести к большим дополнительным погрешностям.

Физические основы деформационных измерений основаны на использовании упругой деформации чувствительного элемента или развиваемой им силы, являющейся мерой измеряемого давления. Различают три формы чувствительных упругих элементов: трубчатые пружины, сильфоны и мембраны.

Если трубчатую пружину выполнить в виде согнутой по кругу на угол  $\gamma \approx 270^\circ$  трубки Тр некруглого сечения (овального или эллиптического), то при увеличении давления трубка стремится распрямиться (если большая ось сечения трубки располагается перпендикулярно плоскости изгиба трубки – плоскости чертежа, рис. 3), и угол  $\gamma$  становится меньше. При уменьшении давления свободный конец  $A$  трубки

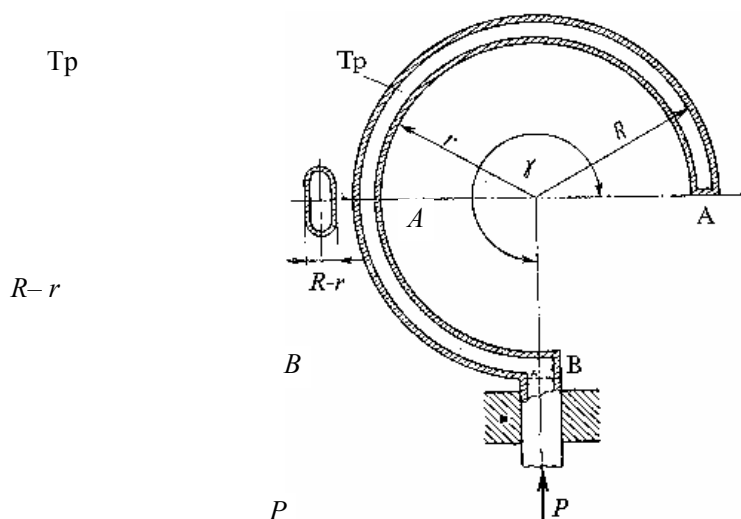


Рис. 3 Одновитковая трубчатая пружина

перемещается в обратном направлении. Перемещение конца трубки служит мерой давления внутри трубки (или точнее разности давлений внутри и вне трубки). Закономерности, определяющие перемещение конца трубки, очень сложны. Упрощенно можно объяснить это явление следующим образом.

Известно, что любая трубка некруглого сечения при повышении давления в ней стремится под воздействием возникающих равномерных нормальных напряжений в стенках трубки принять круглую форму.

В первом приближении будем считать, что периметр сечения трубки и ее длина при изменении давления останутся неизменными. Тогда при увеличении давления малая ось сечения трубки будет увеличиваться, а большая уменьшаться. Соответственно, радиус  $R$  увеличится и станет равным  $R'$ , а радиус  $r$  уменьшится до  $r'$ . Так как по принятому допущению длины дуг трубки останутся без изменения, то  $R\gamma = R'\gamma'$  и  $r\gamma = r'\gamma'$ , где  $\gamma'$  – угол после увеличения давления. Отсюда, производя почленно вычитание, получаем

$$R\gamma - r\gamma = R'\gamma' - r'\gamma' ,$$

или

$$(R - r)\gamma = (R' - r')\gamma' .$$

Так как по предыдущему  $(R - r) < (R' - r')$ , то при увеличении давления угол  $\gamma' < \gamma$ , т.е. трубка раскручивается.

Обозначив изменение малой оси сечения трубки через  $\Delta r = (R' - r') - (R - r)$ , а изменение угла – через  $\Delta\gamma = \gamma - \gamma'$ , из (5) (пренебрегая произведением  $\Delta r \Delta\gamma$ ) получим

$$\Delta\gamma \approx \frac{\Delta r}{R - r} \gamma .$$

Отсюда угол отклонения конца трубки прямо пропорционален начальному углу  $\gamma$  и обратно пропорционален размеру малой оси  $(R - r)$ .

Перемещение  $W$  конца трубки  $A$  связано с изменением начального угла  $\gamma$  соотношением

$$W = \frac{\Delta\gamma}{\gamma} R \sqrt{(\gamma - \sin \gamma)^2 + (1 - \cos \gamma)^2} .$$

Для  $\gamma = 270^\circ = \frac{3}{2}\pi$

$$W \approx 5,8R \frac{\Delta\gamma}{\gamma} .$$

Перемещение  $W$  свободного конца трубки до определенного предела пропорционально давлению, т.е.

$$W = kP .$$

При дальнейшем повышении давления линейная зависимость нарушается – деформация начинает расти быстрее увеличения давления. Предельное давление, при котором сохраняется линейная зависимость между перемещением трубки и давлением, называется *пределом пропорциональности трубки*.

Возможность использования некруглой трубки для измерения давления была случайно обнаружена французским механиком Е. Бурдоном в 1846 г. При гидравлических испытаниях змеевиков Бурдон обнаружил, что концы дефектных змеевиков, имеющих трубки некруглого сечения, перемещаются при изменении давления, а у змеевиков с трубками круглого сечения этого не наблюдается. Это привело его к мысли создать манометры на базе трубок некруглого сечения, которые и теперь нередко называют манометрами Бурдона, а используемые в них трубки – трубками Бурдона.

### Описание лабораторной установки

На рис. 4 представлена схема экспериментальной установки для проведения работы.

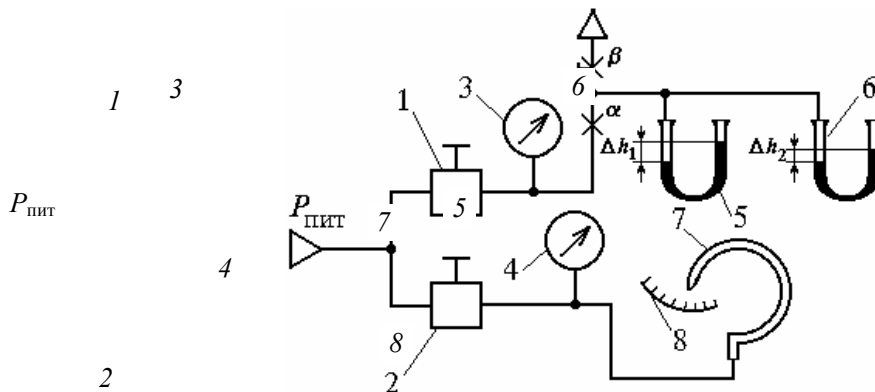


Рис. 4 Схема лабораторной установки



Давление питания  $P_{\text{пит}}$  от компрессора поступает на входы датчиков давления 1 и 2, которые изменяют давление в определенных диапазонах. С выходов датчиков давление, контролируемое по образцовым манометрам 3 и 4, поступает на входы измерительных преобразователей 5, 6 (U-образные трубки) и 7 (трубка Бурдона). Перемещение конца трубки 7 отсчитывается по шкале 8.

### Порядок выполнения работы

- 1 Собрать схему лабораторной установки.
- 2 Подать давление с датчика 1 на вход преобразователей 5, заполненных водой, и 6, заполненного водным раствором глицерина. Измерить и занести в табл. 2 высоту  $\Delta h_1$  и  $\Delta h_2$  столба уравнивающей жидкости.
- 3 Провести эту операцию для других давлений.
- 4 По экспериментальным данным рассчитать величину давления  $P$  в трубках 5 и 6 и плотность водного раствора глицерина. Результаты занести в табл. 2.
- 5 Подать давление с датчика 2 на вход преобразователя 7. Измерить и занести в табл. 3 величину этого давления и величину смещения  $W$  конца трубки 7.
- 6 Провести эту операцию для других давлений.
- 7 Рассчитать величину коэффициента пропорциональности  $k$ . Провести статистическую обработку результатов, определить абсолютную  $\Delta k$  и относительную  $\delta k$  погрешности. Результаты занести в табл. 3.

Таблица 2

### Результаты экспериментального исследования

#### U-образного манометра

№	$\Delta h_1,$ $10^{-3}$ м	$\Delta h_2,$ $10^{-3}$ м	$\rho_{\text{в}}^{\text{табл}},$ кг/м <sup>3</sup>	$P,$ Па	$\rho_{\text{Гл}}^{\text{табл}},$ кг/м <sup>3</sup>	$\rho_{\text{Гл}}^{\text{экс}},$ кг/м <sup>3</sup>
1			1000		1260	
2						
3						
4						
5						
6						
7						

Таблица 3

#### Результаты экспериментального исследования процессов, происходящих в одновитковой трубчатой пружине

№	$P,$ кгс/см <sup>2</sup>	$W,$ мм	$k_i,$ м <sup>3</sup> /Н	$\bar{k},$ м <sup>3</sup> /Н	$S$	$\Delta k,$ м <sup>3</sup> /Н	$\delta k, \text{ м}^3/\text{Н}$
1							
2							
3							
4							
5							

При  $n = 5, p = 0,95$  коэффициент Стьюдента  $t_s = 2,57$ .

### Контрольные вопросы

- 1 Что называют давлением?
- 2 В чем состоит принцип измерения давления на основе гидростатического уравновешивания?
- 3 Каковы основные источники погрешности при измерении давления U-образными манометрами?
- 4 Поясните физические основы измерения давления с использованием упругой деформации.
- 5 Что называется пределом пропорциональности трубки?

### **Список литературы**

- 1 Кулаков М. В. Технологические измерения и приборы для химических производств. М.: Машиностроение, 1983. 462 с.
- 2 Фарзани Н. Г., Илясов Л. В., Азим-заде А. Ю. Технологические измерения и приборы: Учеб. пособие. М.: Высш. школа, 1989. 456 с.
- 3 Бородин И. Ф. Технические средства автоматики. М.: Колос, 1982. 303 с.

Лабораторная работа № 3

## **ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ИЗМЕРЕНИЯ**

### **ПЛОТНОСТИ СЫПУЧИХ МАТЕРИАЛОВ ПНЕВМОДИНАМИЧЕСКИМ МЕТОДОМ**

*Цель работы.* Выявление физических эффектов, возникающих при заполнении газом пневматической емкости и емкости, заполненной исследуемым материалом. Изучение конструкции и принципа действия пневмодинамического устройства для измерения плотности сыпучих материалов и тел неправильной формы.

### **Методические указания**

Одной из характеристик, широко используемых для оценки качества продукции и сырья в виде сыпучих материалов (СМ), является плотность  $\rho$ . Все методы измерения плотности являются абсолютными или косвенными. Абсолютные методы, путем прямых измерений объема и массы, наиболее предпочтительны для практического определения плотности сыпучих веществ и твердых тел сложной формы. Косвенные методы, основанные, например, на затухании радиоактивных, рентгеновских или ультразвуковых потоков, проходящих через анализируемое вещество (тело), более удобны для автоматизации, однако, их показания существенно зависят от толщины и формы изделий, физических и химических свойств вещества. Поэтому косвенные методы получили большее распространение для жидких и газообразных сред, которые легко занимают заданный объем в измерительной емкости. Измерение плотности сыпучих материалов и различных изделий сложной формы из твердых материалов не является однозначным и создает ряд дополнительных трудностей.

Сыпучие материалы характеризуются насыпной (объемной) плотностью и плотностью материала частиц, знание которых необходимо при проектировании различного оборудования, при расчетах сыпучести, веса хранящегося продукта и др.

Насыпная плотность представляет собой массу материала в единице занимаемого им объема. Она зависит от размера и материала частиц сыпучего материала, влажности, плотности укладки частиц. Плотность материала частиц определяется как отношение массы вещества к занимаемому им объему и разделяется на объемную, кажущуюся и истинную.

Под объемной плотностью частиц СМ понимают среднюю плотность частиц материала, объем которых включает в себя закрытые и открытые поры.

Часто частицы СМ, полученные в результате различных технологических процессов, имеют закрытые поры, из которых удалить газ не представляется возможным без использования процесса измельчения частиц. Плотность таких частиц соответствует кажущейся плотности. Таким образом, кажущаяся плотность частиц СМ – масса единицы объема частиц, включая и объем закрытых пор.

Если сыпучий материал получен путем измельчения монолита, кристаллизации, то плотность материала частиц совпадает с истинной плотностью, т.е. плотностью частиц без пустот.

Измерение объемов пористых и сыпучих веществ, не допускающих смачивания в какой-либо жидкости, является сложной экспериментальной задачей, поскольку обычные методы измерений объемов – метод гидростатического взвешивания и пикнометрический – неприменимы. В связи с этим, для определения объемов сыпучих материалов применяют методы, основанные на законе Бойля-Мариотта, при реализации которых используют камеры с известным объемом для сжатия воздуха и различные устройства для измерения давления воздуха в них. При изотермическом процессе изменения объема газа выражение для определения плотности будет иметь вид [1]

$$\rho = \frac{mP_2}{V(P_2 - P_1)},$$

где  $P_1, P_2$  – абсолютные давления газа в измерительной емкости до и после помещения в нее контролируемого материала.

Из уравнения видно, что для определения плотности необходимо предварительное измерение объема  $V$ , после чего находится масса  $m$ , по которым судят о плотности.

При реализации различных методов измерения плотности часто наиболее предпочтительным является использование времени как информативного параметра по той причине, что этот параметр может быть измерен, зафиксирован и преобразован простыми техническими средствами с более высокой точностью, чем сигналы другой природы, например давление или расход. Измерения, при проведении которых получают сигнал во временной форме, называют пневмодинамическими.

Метод измерения кажущейся плотности частиц СМ, как совокупность приемов сравнения измеряемой физической величины с ее единицей в соответствии с реализованным принципом измерения, состоит в следующем.

Газ через дроссели с проводимостями  $\alpha$  (рис. 5) под действием постоянного перепада давления, равного  $\Delta P_{\text{вх}} = k_1 m_{\text{в}}$ , поступает в емкость 1 с объемом  $V_1$ , заполненную контролируемым веществом, объем частиц которого равен  $V_{\text{в}}$ , и в пустую емкость 2 с объемом  $V_2 = V_1$ . При поступлении газа в емкости 1 и 2 происходит изменение давления в них. Время изменения давления, регистрируемое устройством 3, от значения  $P_1$  до  $P_2$  будет различным, так,

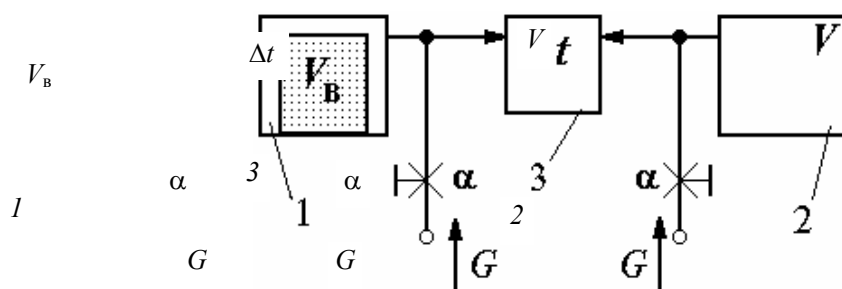


Рис. 5 Схема устройства для реализации метода измерения плотности частиц СМ

для емкости 1 
$$t'_{12} = \frac{(V_1 - V_B)}{m_B} \frac{(P_2 - P_1)}{R\theta k_1 \alpha},$$

для емкости 2 
$$t''_{12} = \frac{V_1}{m_B} \frac{(P_2 - P_1)}{R\theta k_1 \alpha}.$$

Время  $t''_{12} > t'_{12}$ , причем их разность определяет кажущуюся плотность частиц контролируемого вещества, т.е.

$$\Delta t = \frac{V_B}{m_B} \frac{(P_2 - P_1)}{R\theta k_1 \alpha} = \frac{A}{\rho_B},$$

где  $A = \frac{(P_2 - P_1)}{R\theta k_1 \alpha} = \text{const}$  при условии постоянства температуры  $\theta$  и проводимости дросселя  $\alpha$ ;  $R = 287 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$  –

универсальная газовая постоянная.

Использование в качестве дросселя линейного пневматического пульсирующего сопротивления позволяет исключить влияние температуры и изменения проводимости на результат измерения, а также получить выходной сигнал в числоимпульсной форме.

### Описание лабораторной установки

На рис. 6 представлена схема экспериментальной установки для проведения работы.

Давление питания  $P_{\text{пит}}$  от компрессора поступает на вход редукторов 1 и 2. С выхода редуктора 1 давление, контролируемое по манометру 3, поступает на вход пневмотумблера 4 и, далее, в сопло питания  $C_1$  пятимембранного элемента сравнения 5. Давление, регулируемое редуктором 2 и контролируемое по манометру 6, поступает в камеру Д элемента сравнения 5. С выхода элемента сравнения давление поступает на вход дросселя 7, выход которого подключен к измерительной емкости 8, заполненной контролируемым веществом 9. Изменение давления в емкости 8 контролируется по манометру 10.

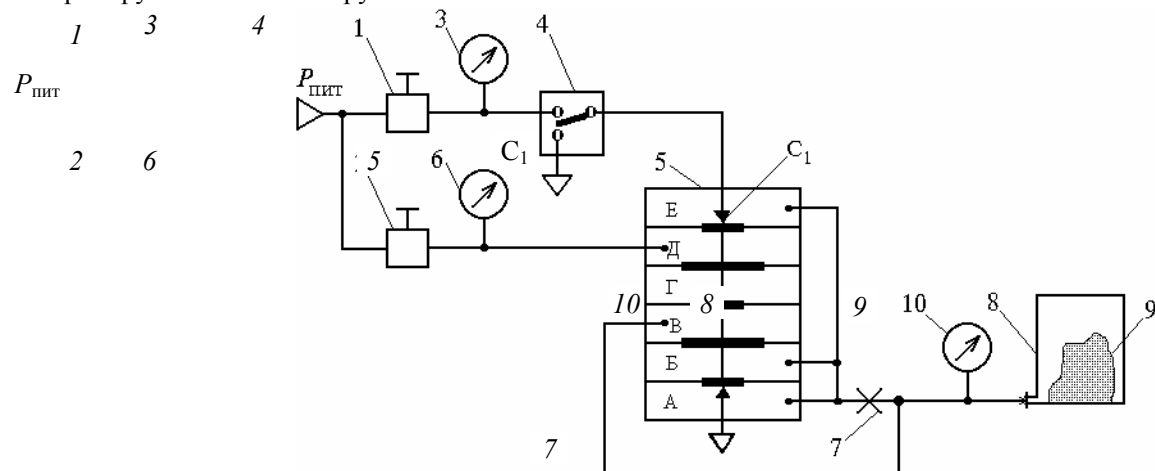


Рис. 6 Схема лабораторной установки

### Порядок выполнения работы

- 1 Собрать схему лабораторной установки.
- 2 По манометру 6 с помощью редуктора 2 установить рабочее давление  $P_D = 0,4 \cdot 10^5$  Па ( $0,4$  кгс/см<sup>2</sup>).
- 3 Переключением тумблера 4 подать в пустую емкость 8 давление.
- 4 По секундомеру измерить время  $t_0$  достижения заданной величины ( $0,4$  кгс/см<sup>2</sup>) давления в емкости. Результаты измерений занести в табл. 4.
- 5 Повторить п. 3 и 4 при последовательном помещении в емкость 8 навесок сыпучих материалов ( $m = 0,490$  кг) эталонных образцов. Результаты измерений  $t$  занести в табл. 4.

6 Рассчитать разность времен заполнения  $\Delta t = t_0 - t$  и плотность сыпучих материалов. Определить абсолютную и относительную погрешности  $\Delta\rho$  и  $\delta\rho$ .

7 Сделать выводы по работе.

Таблица 4

**Результаты экспериментальных исследований  
пневмодинамического измерительного преобразователя**

№	Материал	$\rho_{\text{табл}}, \text{кг/м}^3$	$t_0, \text{с}$	$t, \text{с}$	$\Delta t, \text{с}$	$\rho_{\text{эксп}}, \text{кг/м}^3$	$\Delta\rho, \text{кг/м}^3$	$\delta\rho, \%$
1	Дробь свинцовая	11 400						
2	Шарики стеклянные	2800						
3	Гранулы полистирола	1230						

$$\Delta\rho = |\rho_{\text{табл}} - \rho_{\text{эксп}}|; \delta\rho = (\Delta\rho/\rho_{\text{табл}}) \cdot 100\%; \rho_{\text{эксп}} = A/\Delta t, \text{ где } A = 23\,000 \text{ кг}\cdot\text{с}/\text{м}^3$$

### **Контрольные вопросы**

- 1 Какие физические эффекты происходят при заполнении емкости постоянного объема газом?
- 2 Поясните понятие насыпной плотности и плотности частиц СМ.
- 3 Как измеряют объем пористых и сыпучих веществ, не допускающих смачивания?
- 4 Какие методы называют пневмодинамическими?
- 5 Поясните порядок выполнения работы.

### **Список литературы**

- 1 Кивилис С. С. Плотномеры. М.: Энергия, 1980. 279 с.
- 2 Мордасов М. М., Мордасов Д. М., Трофимов А. В. Технические средства пневмоавтоматики в устройствах контроля веществ. М.: Машиностроение, 2000. 64 с.

Лабораторная работа № 4

## **ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ**

### **АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ИЗМЕРЕНИЯ**

### **ПОВЕРХНОСТНОГО НАТЯЖЕНИЯ ЖИДКИХ СРЕД**

*Цель работы.* Выявление физических эффектов, возникающих при вертикальном воздействии газовой струей на поверхность жидкости. Изучение влияния поверхностного натяжения жидкости на состояние струйно-гидравлической системы.

## **МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ**

Между молекулами всякого тела существует взаимное притяжение (сцепление), причем действие сил, вызывающих это явление, проявляется на очень малых расстояниях. Каждая молекула притягивает к себе все окружающие ее молекулы, расположенные внутри сферы молекулярного действия; эта сфера описывается радиусом, равным наибольшему расстоянию, на котором еще обнаруживаются силы сцепления. Радиус молекулярного действия в жидкости равен примерно 0,001 мкм.

Взаимное притяжение молекул не только обуславливает давление поверхностного слоя на остальную жидкость, но стремится также уменьшить поверхность жидкости, т.е. вызывает силу, направленную вдоль поверхности. Эта сила называется силой поверхностного натяжения. Равновесие жидкости устанавливается при таком расположении молекул, когда на поверхности находится наименьшее возможное число их, т.е. когда свободная поверхность жидкости имеет наименьшую площадь и создает силу натяжения вдоль поверхности.

Сила поверхностного натяжения, действующая в данной точке линии, взятой на поверхности жидкости, расположена в плоскости, касательной к поверхности в этой точке, и перпендикулярна указанной линии. Силу, приложенную к единице длины произвольной линии, проведенной на свободной поверхности жидкости, называют коэффициентом поверхностного натяжения, или поверхностным натяжением данной жидкости.

Поверхностное натяжение принято обозначать буквой  $\sigma$ . Оно выражается в Н/м и показывает, какую работу необходимо затратить, чтобы увеличить поверхность жидкости на  $1 \text{ м}^2$ , насколько при этом возрастает общая свободная поверхностная энергия системы.

Струйные или аэродинамические методы контроля поверхностного натяжения основаны на воздействии струи газа на жидкость и определении размеров деформации поверхности жидкости или силовой характеристики газовой струи, вызывающей заданную величину деформации как функцию контролируемого параметра. При измерении  $\sigma_{\text{ж}}$  используют два режима взаимодействия газовой струи с жидкостью:

- устойчивый, когда поверхность, образованная струей в жидкости, не подвержена заметным изменениям;
- критический, при котором происходит переход поверхности жидкости в месте контакта со струей от устойчивого к колебательному состоянию.

Метод устойчивого взаимодействия струи газа с жидкостью основан на том, что под действием струи, вытекающей из сопла или капиллярной трубки, на поверхности жидкости образуется углубление с высотой  $h_y$ . В зависимости от того, по какому параметру судят о  $\sigma_{\text{ж}}$ , возможны две модификации метода.

При заданных размерах капиллярной трубки, расстоянии  $l_2$  от ее среза до невозмущенной поверхности жидкости и определенном входном давлении, высота  $h_y$  образованного под действием струи углубления (рис. 7) является функцией поверхностного натяжения.

По экспериментальным данным получена зависимость

$$\sigma_{\text{ж}} = C_{\sigma} \frac{1}{\sqrt{h_y}},$$

где  $C_{\sigma}$  – постоянный коэффициент.

Если принять  $h_y = \text{const}$ , то контролируемая величина будет определяться скоростью истечения  $W$  газа из капиллярной трубки, которая может быть найдена из выражения

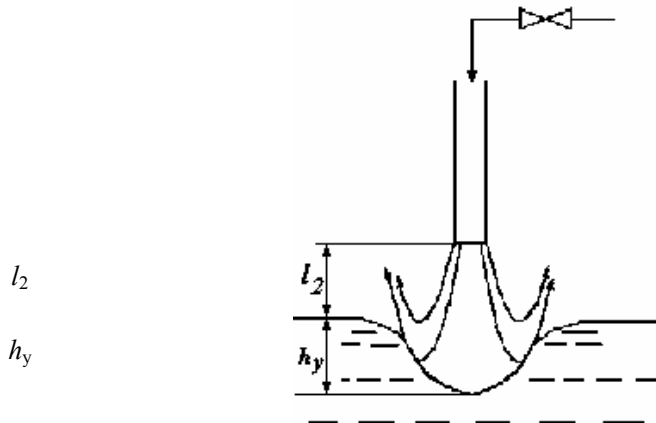


Рис. 7 Реализация бесконтактного метода измерения поверхностного натяжения жидкостей

$$W = \sqrt{\frac{1}{\frac{4}{3}K_{\Pi}\pi r_k^2 \rho_{\Gamma}} \left( \frac{\Delta A}{h_y} \sigma_{ж} + (\rho_{ж} + \rho_{\Gamma})g \frac{l_2}{h_y} V_{в} \right)}$$
 или

$$\sigma_{ж} = \frac{4}{3}K_{\Pi}\pi W^2 r_k^2 \rho_{\Gamma} \frac{h_y}{\Delta A} - (\rho_{ж} + \rho_{\Gamma})g \frac{l_2}{\Delta A} V_{в},$$

где  $r_k$  – радиус капиллярной трубки;  $V_{в}$  – объем взаимодействия;  $K_{\Pi}$  – коэффициент формы, учитывающий полное поперечное сечение потока;  $\Delta A = A_{пг} - A_{пн}$  – разность между поверхностью углубления и поверхностью невозмущенной жидкости.

С ростом скорости газа  $W$  в струе, процесс образования углубления на поверхности жидкости при некотором критическом значении скорости  $W_{кр}$ , зависящем от  $\sigma_{ж}$ , становится неустойчивым, происходят колебания поверхности. Такая закономерность используется в методах контроля  $\sigma_{ж}$  по значениям параметров двухфазной системы при критическом режиме взаимодействия струи газа с жидкостью.

### Описание лабораторной установки

На рис. 8 представлена схема экспериментальной установки для проведения работы.

Давление питания  $P_{пит}$  от датчика давления, контролируемое манометром 1, поступает на вход регулятора расхода воздуха 2, с выхода которого, через ротаметр 3, воздух с заданными параметрами поступает на вход струйной трубки 4, закрепленной на штативе 5. Выход струйной трубки размещен над кюветой 6, заполненной контролируемой жидкостью 7. Расстояние от выхода трубки 4 до поверхности жидкости 7 измеряется по шкале 8.

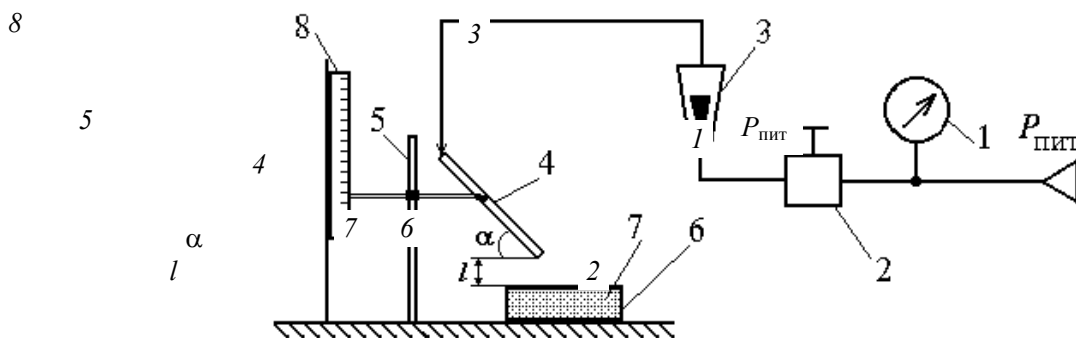


Рис. 8 Схема лабораторной установки

### Порядок выполнения работы

- 1 Собрать схему лабораторной установки.
- 2 Установить струйную трубку на заданном расстоянии  $l$  от поверхности жидкости и под углом  $\alpha$  к ней.
- 3 На вход струйной трубки подать расход питания.
- 4 Измерить и занести в табл. 5 значения расхода  $Q_{кр}$ , соответствующего началу автоколебательного режима.
- 5 Повторить п. 3 и 4 для жидкостей, выданных преподавателем.
- 6 По данным табл. 5 построить экспериментальную статическую характеристику метода измерения поверхностного натяжения.

Таблица 5

### Результаты экспериментальных исследований метода измерения поверхностного натяжения жидкостей

№	Жидкость	$\sigma_{ж}/\rho_{ж}, 10^{-6} \text{ М}^3/\text{с}^2$	$Q_{кр}, \text{ М}^3/\text{с}$
---	----------	---	--------------------------------

1	Глицерин	47,1	
2	Масло ТАП-15	38,1	
3	Масло М-8	37,0	

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

- 1 Что называют поверхностным натяжением жидкости?
- 2 Какие физические эффекты происходят при нормальном падении газовой струи на поверхность жидкости?
- 3 Назовите модификации аэродинамических методов контроля поверхностного натяжения.
- 4 Поясните порядок выполнения работы.

## Список литературы

Мордасов М. М., Мищенко С. В., Мордасов Д. М. Физические основы измерения плотности и поверхностного натяжения пневматическими методами: Учеб. пособие. Тамбов: Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 1999. 76 с.

Лабораторная работа № 5

## ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ИЗМЕРЕНИЯ

### ВЯЗКОСТИ ЖИДКИХ ВЕЩЕСТВ КАПИЛЛЯРНЫМ МЕТОДОМ (МЕТОДОМ ИСТЕЧЕНИЯ)

*Цель работы.* Выявление физических эффектов, возникающих при движении жидкости через капилляр. Изучение влияния вязкости жидкости на частоту возникающих автоколебаний.

## Методические указания

*Вискозиметрия* (лат. *viscous* – клейкий и греч. *metre* – мерю) – раздел физики, занимающийся методами измерения вязкости (внутреннего трения). Вязкость это свойство жидкостей или газов оказывать сопротивление перемещению или сдвигу одной их части относительно другой.

При сдвиге двух слоев жидкости при установившемся течении возникает тангенциальная сила, которая согласно закону Ньютона определяется соотношением

$$F = \eta S \frac{dW}{dn},$$

где  $F$  – сила сдвига;  $\eta$  – динамическая вязкость или просто вязкость;  $S$  – площадь внутреннего трения (площадь сдвига);  $dW/dn$  – градиент скорости движения по толщине движущегося слоя (скорость сдвига);  $W$  – скорость движущегося слоя;  $n$  – толщина движущегося слоя.

Если  $\eta$  не зависит от  $dW/dn$ , то жидкости называются ньютоновскими; все остальные жидкости называются неньютоновскими.



За единицу динамической вязкости в Международной системе единиц принимается вязкость потока жидкости, в которой линейная скорость под воздействием давления сдвига  $1 \text{ Н/м}^2$  имеет градиент  $1 \text{ м/с}$  на  $1 \text{ м}$  расстояния, перпендикулярного к плоскости сдвига. Эта единица динамической вязкости  $\eta$  имеет размерность  $\frac{\text{Н} \cdot \text{с}}{\text{м}^2} = \text{Па} \cdot \text{с}$ .

Существует большое количество методов измерения вязкости, в основу которых положены различные физические явления и процессы. К классическим методам измерения внутреннего сопротивления относятся капиллярный (метод истечения), ротационный и метод Стокса.

В основу метода истечения положены законы, регулирующие поток жидкости или газа в капилляре (трубке малого диаметра), выведенные из уравнений гидродинамики.

Рассмотрим поток в капиллярной цилиндрической трубке длиной  $L$  и радиусом  $R$  (рис. 9).

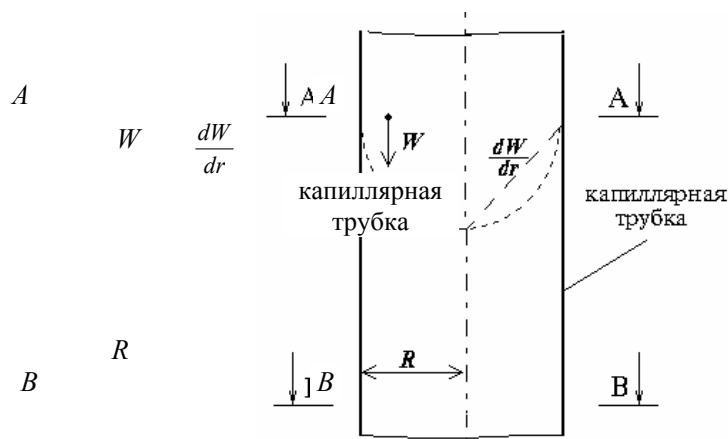


Рис. 9 Скорость и градиент скорости в капиллярной трубке

Разность давлений  $P$  заставляет жидкость течь сквозь трубку. Предположим, что поток ламинарный и каждая частица жидкости движется параллельно оси цилиндра с постоянной скоростью  $W$ . Вследствие симметрии скорость будет постоянна для всех точек, лежащих на одной окружности, так что мы можем считать, что жидкость состоит из цилиндрических слоев, скорость которых является функцией радиуса.

Сила, с которой давление  $P$  действует на цилиндр радиусом  $r$ , равна

$$F_P = \pi r^2 P,$$

в то же время  $F_V$ , сила сопротивления вокруг поверхности цилиндра, обусловленная вязкостью жидкости, выразится, в соответствии с законом Ньютона, через произведение площади, коэффициента вязкости  $\eta$  и градиента скорости  $dW/dr$ :

$$F_V = 2\pi r L \eta \frac{dW}{dr}.$$

Если предположить, что движение цилиндра не ускоряется, т.е.  $W$  остается постоянной, то силы  $F_P$  и  $F_V$ , действующие на цилиндр с внешней и с внутренней сторон, должны быть равны и противоположны:

$$F_P = -F_V,$$

поэтому

$$rP = -2L\eta \frac{dW}{dr},$$

тогда градиент скорости будет равен

$$\frac{dW}{dr} = -\frac{rP}{2L\eta}.$$

Интегрируя, находим, что

$$W = -\frac{r^2 P}{4L\eta} + C. \quad (6)$$

Остается определить константу интегрирования  $C$ , для чего необходимо выяснить пограничное условие. Обычное предположение заключается в том, что слой, соприкасающийся со стенкой трубки, прилипает к ней; тогда  $W = 0$  при  $r = R$ . Отсюда находим константу интегрирования в виде

$$C = \frac{R^2 P}{4L\eta}.$$

После подстановки  $C$  в (6) получаем определенное выражение для скорости:

$$W = \frac{P}{4L\eta}(R^2 - r^2). \quad (7)$$

Поскольку  $W$  есть расстояние, пройденное в единицу времени, частицы жидкости, находившиеся на площади  $AA$  в момент, соответствующий начальному (нулевому) времени, окажутся через единицу времени на поверхности параболоида, профиль которого определяется уравнением (7). Другими словами, объем этого параболоида равен объему жидкости  $V$ , протекающему по капиллярной трубке в единицу времени, т.е. объемному расходу  $Q$ . Объем этого тела вращения равен

$$Q = 2\pi \int_0^R W r dr.$$

Подставляя значение  $W$ , получаем

$$Q = \frac{2\pi P}{4L\eta} \int_0^R (R^2 - r^2) r dr = \frac{\pi P R^4}{8L\eta}. \quad (8)$$

Это выражение идентично с тем, которое было найдено Пуазейлем эмпирически. Приведенное элементарное решение задачи впервые было дано Гагенбахом. Формула (8) называется формулой Пуазейля.

Поскольку мы рассматриваем случай стационарного потока, объем жидкости  $V$ , истекающей за время  $t$ , равен

$$V = \frac{\pi P R^4}{8L\eta} t. \quad (9)$$

Как видно из (8) и (9), о вязкости  $\eta$  можно судить путем измерения соответствующих физических величин, входящих в уравнение Пуазейля, при этом

$$\begin{aligned} \eta = k_1 P, \quad \text{где } k_1 = \frac{8LQ}{\pi R^4} = \text{const}; & \quad \eta = k_2 Q, \quad \text{где } k_2 = \frac{8LP}{\pi R^4} = \text{const}; \\ \eta = k_3 t, \quad \text{где } k_3 = \frac{\pi R^4 P}{8LV} = \text{const}; & \quad \eta = k_4 \frac{1}{V}, \quad \text{где } k_4 = \frac{\pi R^4 P t}{8L} = \text{const}. \end{aligned}$$

Вязкость жидкостей обычно убывает с повышением температуры. Это естественно, так как при этом облегчается взаимное перемещение молекул. У маловязких жидкостей, например у воды, это падение, хотя и заметно, но не очень значительно.

### **Описание лабораторной установки**

На рис. 10 представлена схема экспериментальной установки для проведения работы.

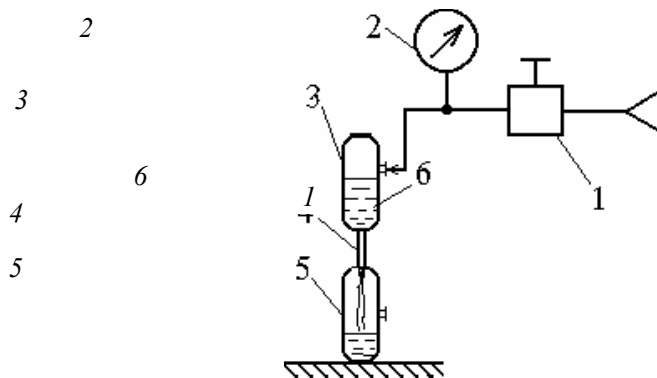


Рис. 10 Схема лабораторной установки

Давление, устанавливаемое редуктором 1 и контролируемое манометром 2, поступает в сосуд 3 с контролируемой жидкостью 6 (водный раствор глицерина). Под действием этого давления жидкость 6 через капиллярную трубку 4 перетекает в приемный сосуд 5. Объем жидкости  $V = 0,25 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$ ; диаметр и длина трубки  $d = 4 \cdot 10^{-3} \text{ м}$  и  $L = 11 \cdot 10^{-2} \text{ м}$ , соответственно.

### Порядок выполнения работы

- 1 Собрать схему лабораторной установки.
- 2 Подать в сосуд 3 заданное давление.
- 3 Измерить время, в течение которого жидкость перетечет из сосуда 3 в сосуд 5. Результат занести в табл. 6.
- 4 Рассчитать значение вязкости контролируемой жидкости (табличные значения вязкости водных растворов глицерина приведены в табл. 7).
- 5 Повторить п. 2, 3 и 4 при других величинах давления над поверхностью жидкости.
- 6 По данным табл. 6 сделать вывод.

Таблица 6

### Результаты экспериментальных исследований

#### капиллярного метода измерения вязкости жидкостей

№	$P$ , кПа	$t$ , с	$\eta$ , Па·с	$\bar{\eta}$ , Па·с
1	8,0			
2	9,6			
3	11,2			
4	12,8			
5	14,4			

Таблица 7

### Вязкость водных растворов глицерина

Процентное содержание глицерина, %	Вязкость, Па·с
100	1,495
99	1,194
98	0,971
97	0,802
96	0,659
95	0,543

80	0,062
50	0,006
0	0,001

#### Контрольные вопросы

- 1 Поясните смысл понятия "вязкость жидкости".
- 2 В каких единицах измеряется вязкость?
- 3 Какие физические эффекты происходят при движении жидкости через капиллярную трубку?
- 4 По каким величинам можно судить о вязкости при измерении ее капиллярным методом?
- 5 Поясните порядок выполнения работы.

#### *Список литературы*

- 1 Кулаков М. В. Технологические измерения и приборы для химических производств. М.: Машиностроение, 1983. 462 с.
- 2 Фарзани Н. Г., Илясов Л. В., Азим-заде А. Ю. Технологические измерения и приборы: Учеб. пособие. М.: Высш. школа, 1989. 456 с.