

Министерство науки и высшего образования РФ  
Филиал федерального государственного бюджетного  
образовательного учреждения высшего образования  
«Воронежский государственный технический университет»  
в г. Борисоглебске

Борисоглебский филиал

## **МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА И ТЕРМОДИНАМИКА**

**МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ**  
к выполнению лабораторных работ  
по дисциплине «Физика»  
для студентов технических направлений  
очной и заочной форм обучения

Воронеж 2021

УДК 378(075.8):53

ББК 22.21я73

**Составители:** Т. В. Зульфикарова, Л. И. Матвеева

**Молекулярная физика и термодинамика:** методические указания к выполнению лабораторных работ по дисциплине «Физика» для студентов технических направлений очной и заочной форм обучения / Т. В. Зульфикарова, Л. И. Матвеева; Борисоглебск: Филиал ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», сост.: Т. В. Зульфикарова, Л. И. Матвеева. - Воронеж: Изд-во ВГТУ, 2021. - 29 с.

Методические указания предназначены для лабораторных работ по дисциплине «Физика» для бакалавров машиностроительных и других технических направлений и содержат описания пяти лабораторных работ по разделу «Молекулярная физика и термодинамика».

Предназначены для студентов технических направлений очной и заочной форм обучения.

Методические указания подготовлены в электронном виде и содержатся в файле МУ ЛР\_ Молекулярная физика и термодинамика. pdf.

Библиогр.: 7 назв.

**УДК 378(075.8):53**

**ББК 22.21я73**

**Рецензент** - Б. Р. Кодиров, д-р пед. наук, профессор кафедры естественно научных дисциплин филиала ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет» в городе Борисоглебске

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

## Оглавление

Введение .....	4
Лабораторная работа №1. Определение отношения удельных теплоемкостей ( $c_p/c_v$ ) для воздуха методом адиабатного расширения и сжатия .....	4
Лабораторная работа №2. Определение коэффициента внутреннего трения жидкости методом Стокса .....	9
Лабораторная работа №3. Определение абсолютной и относительной влажности воздуха .....	13
Лабораторная работа №4. Определение удельной скрытой теплоты испарения жидкости .....	18
Лабораторная работа №5. Определение коэффициента теплового расширения тел .....	21
<b>Библиографический список.....</b>	<b>26</b>
Приложения .....	27

## Введение

Данные методические указания представляют собой руководство к лабораторным занятиям по физике для студентов машиностроительных и других технических направлений очной и заочной форм обучения. В него включены пять лабораторных работ по разделу «Молекулярная физика и термодинамика» общего курса физики.

В описаниях лабораторных работ содержится краткий теоретический материал для подготовки к работе, излагается методика проведения эксперимента, приводятся схемы приборов и экспериментальных установок, а также даются рекомендации по оценке погрешностей результатов эксперимента. Описание каждой работы практикума содержит вопросы, которые должны быть изучены при подготовке к работе, формы отчетных таблиц и контрольные вопросы. В приложения включены необходимые для расчетов справочные данные.

### Лабораторная работа №1

#### Определение отношения удельных теплоемкостей ( $c_p/c_v$ ) для воздуха методом адиабатного расширения и сжатия

**Цель работы:** знакомство с одним из экспериментальных методов определения  $c_p/c_v$ ; сравнение полученных результатов с теорией.

**Приборы и принадлежности:** сосуд ёмкостью 25-30 литров, снабжённый жидкостным манометром, ручной насос.

#### Вопросы для подготовки к работе

1. Теплоёмкости газов при постоянном давлении, объёме.
2. Адиабатический процесс, уравнение Пуассона, показатель адиабаты.
3. Сущность метода определения  $c_p/c_v$ . Расчётная формула и способ измерения величин, входящих в неё.

#### Краткая теория

Количество теплоты, необходимое для изменения температуры газа на величину  $dT$ , зависит от того, совершается ли при этом работа, то есть, изменяется ли при этом объём газа.

Если нагреваемый газ массой  $m$  заключён в закрытый сосуд, объём которого не может изменяться ( $dV = 0$ ), то подводимое к нему тепло  $dQ_v = c_v m dT$  затрачивается исключительно на изменение внутренней энергии газа.

$$dQ_v = dU = \frac{im}{2\mu} R dT, \quad (1)$$

где  $i$  – число степеней свободы молекулы газа,  $\mu$  – молярная масса,  $R$  – газовая постоянная. Отсюда получим

$$c_v = \frac{i R}{2 \mu}, \quad (2)$$

где  $c_v$  – удельная теплоёмкость газа при постоянном объёме, измеряемая в Дж/(кг·К).

*Удельной теплоёмкостью*  $c$  называется количество теплоты, которое нужно сообщить телу массой 1 кг, чтобы изменить его температуру на 1К.

Давление газа при изохорном нагревании будет расти пропорционально абсолютной температуре. Если же газ находится в сосуде, закрытом подвижным поршнем, то в процессе теплопередачи газ будет расширяться, совершая работу, при этом давление газа будет оставаться постоянным и равным внешнему давлению:

$$dQ_p = dU + pdV, \quad (3)$$

где

$$dQ_p = c_p m dT, \quad (4)$$

$dU$  определяется из (2). Из уравнения Менделеева - Клапейрона получим

$$pdV = \frac{m}{\mu} R dT. \quad (5)$$

Подстановка (1), (4), (5) в (3) даёт

$$c_p = \left( \frac{i}{2} + 1 \right) \frac{R}{\mu}, \quad (6)$$

где  $c_p$  – удельная теплоёмкость газа при постоянном давлении.

Разность удельных теплоёмкостей равна

$$c_p - c_v = \frac{R}{\mu},$$

а их отношение

$$\gamma = \frac{c_p}{c_v} = \frac{2}{i} + 1. \quad (7)$$

Теплоёмкость, отнесённая к одному молю вещества, называется *молярной теплоёмкостью*. Между удельной теплоёмкостью ( $c$ ) и молярной – ( $C$ ) существует очевидное соотношение

$$C = c\mu,$$

Следовательно,

$$C_v = \frac{i}{2} R,$$

$$C_p = \left(\frac{i}{2} + 1\right)R \quad (9)$$

Из формул (9) видно, что теплоёмкость  $C_p$  превосходит теплоёмкость  $C_v$  на величину  $R$ :

$$C_p = C_v + R \quad (\text{формула Майера}).$$

Следовательно, *газовая постоянная*  $R$  численно равна работе, которую 1 моль идеального газа совершает, расширяясь при нагревании на 1 К.

Таким образом, отношение  $\gamma = c_p / c_v$  одинаково для газов, молекулы которых обладают одинаковым числом степеней свободы  $i$ . Величина  $\gamma$  играет значительную роль в адиабатических процессах. *Адиабатическим (адиабатным)* называется такой процесс, при котором термодинамическая система (газ) не участвует в теплообмене с окружающей средой ( $dQ = 0$ ). Реально такие процессы осуществляются либо при наличии у системы теплоизолирующей оболочки, либо при большой скорости протекания. Величина  $\gamma$  является показателем адиабаты в том смысле, что уравнение адиабаты может быть записано одним из следующих способов:

$$\begin{aligned} pV^\gamma &= \text{const}, \\ TV^{\gamma-1} &= \text{const}, \\ T^\gamma p^{1-\gamma} &= \text{const}. \end{aligned}$$

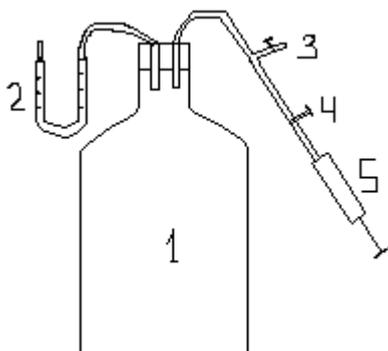
От величины  $\gamma$  зависит скорость  $v$  распространения звука в газах:

$$v = \sqrt{\gamma \frac{RT}{\mu}},$$

а также течение газов по трубам со звуковыми скоростями и достижение сверхзвуковых скоростей в расширяющихся трубах.

### Описание метода и приборов

Для экспериментального определения отношения  $c_p / c_v$  воспользуемся простым способом, основанном на адиабатическом расширении и сжатии воздуха. Экспериментальная установка содержит стеклянный сосуд 1 емкостью 25 л с жидкостным манометром 2. Сосуд снабжён двумя кранами, один из которых (3) соединяет его с атмосферой, а другой (4) – с ручным насосом 5.



Первоначально кран 3 открыт, поэтому давление воздуха в сосуде равно атмосферному  $P_0$ . Если закрыть кран 3 и с помощью насоса 5 (при откры-

том кране 4) накачать в сосуд небольшое количество воздуха, а затем закрыть кран 4, то давление и температура воздуха в сосуде повысятся, поскольку сжатие произведено быстро (адиабатически). Об увеличении давления воздуха в сосуде свидетельствуют показания манометра.

С течением времени в результате теплообмена температура воздуха в сосуде уменьшится до комнатной  $T_1$ , а давление станет равным

$$P_1 = P_0 + h_1, \quad (1)$$

где  $h_1$  – разность уровней жидкости в манометре;  $P_0$  – давление атмосферы;

$P_1$  – давление воздуха в сосуде (все величины измерены в миллиметрах водяного столба). Назовем это состояние газа первым, ему соответствуют давление  $P_1$  и температура  $T_1$ .

Откроем кран 3 и выпустим излишки воздуха из сосуда. В результате адиабатного расширения воздуха температура понизится до  $T_2$ , а давление станет  $P_0$ . Это второе состояние газа ( $T_2, P_0$ ).

Сразу же после адиабатного расширения закроем кран 3 и выждем некоторое время. В результате теплообмена температура воздуха в сосуде возрастет до комнатной, а давление станет равным

$$P_2 = P_0 + h_2, \quad (2)$$

$h_2$  – показание манометра. Газ перешел в третье состояние ( $T_1, P_2$ ).

Адиабатический процесс перехода газа из первого состояния во второе подчиняется закону Пуассона, который запишем в виде

$$\frac{P_1^{\gamma-1}}{T_1^\gamma} = \frac{P_0^{\gamma-1}}{T_2^\gamma}, \quad (3)$$

где

$$\gamma = \frac{c_p}{c_v}.$$

Переход из второго состояния в третье произошел изохорно и может быть описан уравнением

$$\frac{P_0}{T_2} = \frac{P_2}{T_1}, \quad (4)$$

Исключая из уравнений (3) и (4) температуру

$$\left(\frac{P_1}{P_0}\right)^{\gamma-1} = \left(\frac{T_1}{T_2}\right)^\gamma, \quad \frac{P_2}{P_0} = \frac{T_1}{T_2},$$

получим

$$\left(\frac{P_1}{P_0}\right)^{\gamma-1} = \left(\frac{P_2}{P_0}\right)^{\gamma}.$$

Учитывая (1) и (2), получим равенство:

$$\left(\frac{P_0 + h_1}{P_0}\right)^{\gamma-1} = \left(\frac{P_0 + h_2}{P_0}\right)^{\gamma} \quad \text{или} \quad \left(1 + \frac{h_1}{P_0}\right)^{\gamma-1} = \left(1 + \frac{h_2}{P_0}\right)^{\gamma} \quad (5)$$

Величины  $\frac{h_1}{P_0}$  и  $\frac{h_2}{P_0}$  малы по сравнению с единицей, что даёт возможность

воспользоваться для обеих частей уравнения (5) биномиальным разложением, ограничиваясь в нём слагаемыми первого порядка малости, в результате чего уравнение принимает вид

$$(\gamma - 1)h_1 = \gamma h_2.$$

Отсюда получим

$$\gamma = \frac{h_1}{h_1 - h_2}. \quad (6)$$

### Порядок выполнения работы

1. При закрытом кране 3 и открытом кране 4 сделайте 7-8 качаний ручным насосом так, чтобы вода не вылилась через открытый конец манометра.

2. Закройте кран 4 и подождите 3-4 минуты, пока давление воздуха в сосуде не установится.

3. По миллиметровой шкале, нанесенной на колена манометра, определите разность уровней жидкости  $h_1$ .

4. Откройте кран 3 на несколько секунд, пока уровни жидкости в манометре не выровняются, после чего сразу закройте.

5. Подождите 3-4 минуты, пока не произойдёт теплообмен, и повторно измерьте разность уровней жидкости в манометре  $h_2$ .

6. Опыт повторите 4-5 раз и результаты измерений занесите в таблицу. Для каждой пары значений  $h_1$  и  $h_2$  по формуле (5) определите  $\gamma$ .

7. Определите абсолютную погрешность  $\Delta\gamma$  по формуле

$$\Delta\gamma = \frac{\Delta h}{h_1 - h_2} \left(1 + \frac{2h_1}{h_1 - h_2}\right),$$

где  $\Delta h = \Delta h_1 + \Delta h_2$ ,  $\Delta h_1$  – погрешность шкалы манометра,  $\Delta h_2$  – среднее значение случайной погрешности измерений.

8. Результат запишите в виде  $\gamma = \gamma_{cp} \pm \Delta\gamma$ .

9. Сравните экспериментально полученное значение  $\gamma$  с теоретическим, рассчитанным по формуле (7).

10. Сделайте выводы.

<i>№ опыта</i>	<i><math>h_1</math>, мм</i>	<i><math>h_2</math>, мм</i>	$\gamma$	$\Delta\gamma$
1.				
...				
5.				
<i>Ср.</i>				

### Контрольные вопросы

1. Объясните сущность метода и выведите расчётную формулу для  $\gamma$ .
2. Поясните физический смысл величины  $\gamma$ .
3. Выведите формулу для погрешности  $\Delta\gamma$ .
4. Какие еще существуют способы определения отношения  $c_p/c_v$ ?

### Лабораторная работа №2

#### Определение коэффициента внутреннего трения жидкости методом Стокса

**Цель работы:** освоение экспериментального метода определения коэффициента вязкого трения жидкости по скорости движения в ней тела.

**Приборы и принадлежности:** стеклянный цилиндрический сосуд высотой 100-120 см, заполненный исследуемой жидкостью, свинцовые шарики малого диаметра, микрометр, секундомер, пинцет, масштабная линейка, штангенциркуль, термометр.

#### Вопросы для подготовки к работе

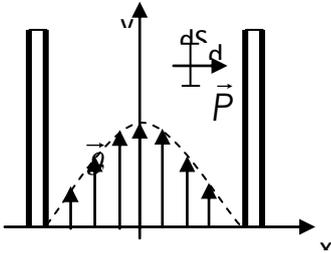
1. Уравнение вязкого трения. Коэффициент вязкости, его физический смысл и единицы измерения.
2. Сила вязкого трения (сила Стокса), действующая на движущееся в жидкости или газе тело.
3. Расчётная формула, измерение величин, входящих в неё.

#### Краткая теория

При стационарном течении газа или жидкости по трубе (вдоль оси  $y$ ) скорости различных слоёв неодинаковы. Наибольшая скорость ламинарного течения соответствует оси трубы, а слой, непосредственно прилегающий к стенкам трубы, покоится. При таком течении происходит перенос импульса от цен-

трального слоя к слоям, движущимся с меньшей скоростью (в направлении оси  $Ox$ ). Импульс, переносимый через элементарную площадку  $dS$  за время  $\Delta t$  будет определяться уравнением:

$$dP = -\eta \frac{dv}{dx} dS dt, \quad (1)$$



где  $\frac{dv}{dx}$  - градиент скорости вдоль оси  $Ox$ , характеризующий быстроту изменения скорости вдоль этой оси. Знак минус означает, что импульс переносится в направлении уменьшения скорости. Коэффициент  $\eta$

называется *коэффициентом внутреннего трения* или *коэффициентом вязкости* и зависит от свойств вещества.

Физический смысл коэффициента внутреннего трения заключается в том, что он численно равен импульсу, который переносится в единицу времени через единичную площадку при градиенте скорости, равном  $1\text{ м}/(\text{с м})=1\text{ с}^{-1}$ . В СИ коэффициент  $\eta$  измеряется в Па·с, в системе СГС – в пуазах

$$1 \text{ пуаз} = 1 \text{ г}/(\text{см} \cdot \text{с}) = 0,1 \text{ Па} \cdot \text{с}$$

Поскольку  $dF = \frac{dP}{dt}$ , уравнение (1) можно представить в виде

$$dF = -\eta \frac{dv}{dx} dS. \quad (2)$$

где  $dF$  – сила внутреннего трения, действующая на элементарную площадку  $dS$ , разделяющую два соседних слоя.

Следовательно, коэффициент внутреннего трения  $\eta$  численно равен силе внутреннего трения (вязкости), действующей на единичную площадку соприкасающихся слоёв жидкости или газа при градиенте скорости  $1\text{ с}^{-1}$ .

Именно внутреннее трение является причиной того, что для течения жидкости или газа по трубе требуется некоторая разность давлений.

### Описание метода и приборов

Для определения коэффициента вязкости жидкости воспользуемся методом Стокса. Пусть шарик малых размеров падает в жидкости. Слой жидкости, контактирующий с поверхностью шарика, прилипает к нему и движется со скоростью шарика  $v$ . Ближайшие смежные слои жидкости также вовлекаются в движение, однако приобретаемая ими скорость будет тем меньше, чем дальше они находятся от шарика. Таким образом, на шарик, падающий в жидкости, действуют три силы: сила тяжести  $\vec{F}_T$ , сила Архимеда  $\vec{F}_A$  и сила внутреннего

трения  $\vec{F}_C$ , возникающая между слоями жидкости и препятствующая движению шарика.

Дифференциальное уравнение движения шарика имеет вид:

$$m \frac{d\vec{v}}{dt} = \vec{F}_T + \vec{F}_A + \vec{F}_C. \quad (3)$$

Здесь

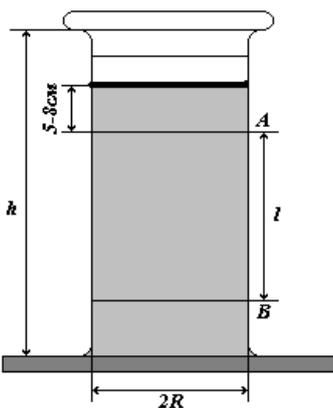
$$F_T = \frac{4}{3} \pi r^3 \rho g, \quad F_A = \frac{4}{3} \pi r^3 \rho_1 g,$$

где  $\rho$  – плотность вещества шарика;  $\rho_1$  – плотность жидкости;  $g$  – ускорение свободного падения.

Если скорость падения шарика  $v$  невелика, и размеры его достаточно малы, чтобы при движении не образовались турбулентные потоки, то течение вовлекаемых в движение слоёв жидкости можно считать ламинарным, а силу сопротивления определять по формуле Стокса

$$F_C = -6\pi\eta r v, \quad (4)$$

где  $r$  – радиус шарика.



Сила сопротивления  $\vec{F}_C$  направлена в сторону, противоположную движению, и возрастает с увеличением скорости падающего шарика до тех пор, пока ускорение движения шарика не станет равным нулю. Дальнейшее падение шарика будет равномерным со скоростью  $v_0$ , а уравнение движения примет вид  $\vec{F}_T + \vec{F}_A + \vec{F}_C = 0$  или в проекциях на вертикальную ось

$$\frac{4}{3} \pi r^3 \rho g - \frac{4}{3} \pi r^3 \rho_1 g - 6\pi\eta r v_0 = 0 \quad (5)$$

Решая уравнение (5), получаем

$$\eta = \frac{2}{9} \frac{\rho - \rho_1}{v_0} g r^2. \quad (6)$$

Равенство (6) соответствует случаю падения шарика в безграничной среде.

В условиях лабораторного эксперимента исследуемая жидкость заполняет стеклянный цилиндрический сосуд высотой 100 -120 см и радиусом внутренней поверхности  $R$ . С учётом размеров и формы сосуда формула для определения коэффициента внутреннего трения может быть уточнена:

$$\eta = \frac{2}{9} g r^2 \frac{\rho - \rho_1}{v_0 \left(1 + 2.4 \frac{r}{R}\right)}. \quad (7)$$



6. Переместить взгляд на уровень нижней метки В, и в момент прохождения шарика через эту метку остановить секундомер.

7. По формуле (8) определить скорость падения шарика в жидкости.

8. По формуле (7) определить коэффициент внутреннего трения жидкости.

9. Опыт повторить 3-5 раз. Все измеренные и вычисленные данные внести в таблицу.

10. Определить погрешности по формулам:

относительная погрешность –

$$\varepsilon_{\eta} = \frac{\Delta\eta}{\eta} = 2 \frac{\Delta r}{r} + \frac{\Delta l}{l} + \frac{\Delta t}{t} + \frac{2.4(\Delta r R + r \Delta R)}{(R^2 + 2.4rR)},$$

абсолютная погрешность –

$$\Delta\eta = \varepsilon_{\eta} \eta_{cp}.$$

Полученное с учётом погрешностей значение коэффициента  $\eta = \eta_{cp} \pm \Delta\eta$  сравнить с табличным значением. Температуру  $T$  жидкости считать равной температуре воздуха.

### Контрольные вопросы

1. Объясните сущность изученного метода определения коэффициента внутреннего трения, сделайте вывод расчётной формулы.

2. Сравните полученное значение с табличным и объясните, чем вызвана погрешность.

3. Какова зависимость коэффициента внутреннего трения жидкости от температуры?

## Лабораторная работа №3 Определение абсолютной и относительной влажности воздуха

**Цели работы:** ознакомление с экспериментальными методами определения влажности воздуха; приобретение навыков работы с гигрометром и психрометром.

**Приборы и материалы:** гигрометр Ламбрехта, термометр, каучуковая груша, серный эфир, стандартный аспирационный психрометр, дистиллированная вода.

### Вопросы для подготовки к работе

1. Насыщенные и ненасыщенные пары, абсолютная и относительная влажность воздуха.

2. Расчётные формулы для абсолютной и относительной влажности воздуха, физический смысл входящих в них величин и методы их измерения.

#### Краткая теория

В атмосферном воздухе всегда содержится некоторое количество водяного пара. Содержание водяного пара в воздухе может меняться как по абсолютной величине, так и по степени насыщения, что характеризуется абсолютной и относительной влажностью. Влажность играет роль в атмосферных процессах, т.к. от неё зависит интенсивность испарения влаги, конденсация водяного пара, приводящая к образованию облаков и выпадению осадков.

Интенсивность испарения воды зависит от того, насколько близко давление пара воды к давлению насыщенного пара при данной температуре.

Насыщающим или насыщенным называется пар, находящийся в динамическом равновесии со своей жидкостью. Чем ближе водяной пар к состоянию насыщения, тем меньше интенсивность испарения.

Степень насыщения воздуха водяным паром характеризуется относительной влажностью. *Относительной влажностью* называется отношение давления (упругости)  $p$  водяного пара, содержащегося в воздухе при данной температуре, к давлению (упругости)  $p_{i.i.}$  насыщенного пара при той же температуре, выраженное в процентах:

$$W = \frac{p}{p_{i.i.}} 100\% \quad (1)$$

При атмосферном давлении даже пар, находящийся в насыщенном состоянии, является идеальным газом, для которого справедливо уравнение Менделеева – Клапейрона

$$p = \rho \frac{RT}{M} \quad (2)$$

С учетом линейной зависимости между давлением и плотностью (2) водяного пара в атмосферном воздухе, относительная влажность может быть определена по формуле

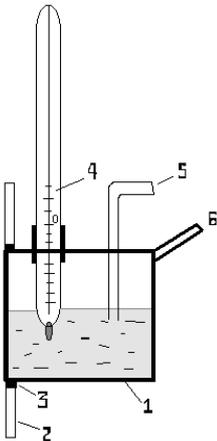
$$W = \frac{\rho}{\rho_{i.i.}} 100\%, \quad (3)$$

где  $\rho$  – плотность водяного пара, находящегося в воздухе;  $\rho_{i.i.}$  плотность насыщенного пара при температуре воздуха.

*Абсолютной влажностью* называется количество (масса) водяного пара, содержащегося в  $1\text{ м}^3$  воздуха. Абсолютная влажность, таким образом, равна плотности водяного пара  $\rho$  в атмосферном воздухе, выраженной в  $\text{г}/\text{м}^3$ .

В метеорологии абсолютную влажность измеряют давлением (упругостью) водяного пара  $p$ , выраженным в миллиметрах ртутного столба. Это объясняется тем, что в диапазоне атмосферных температур (от  $-20^{\circ}\text{C}$  до  $+30^{\circ}\text{C}$ ) плотность водяного пара  $\rho$  (в  $\text{г}/\text{м}^3$ ) и давление (упругость) водяного пара  $p$  (в *мм.рт.ст.*) близки по своим значениям, а при  $t=15^{\circ}\text{C}$  равны, что видно из следующей таблицы.

$t, ^{\circ}\text{C}$	-20	0	15	30	40	60	80	100
$\rho, \text{г}/\text{м}^3$	0,9	4,8	12,8	30,3	51,2	130,5	293,8	598
$p, \text{мм.рт.ст.}$	0,8	4,6	12,8	31,8	55,3	149,4	355,1	760



Простейшим прибором для определения влажности воздуха может служить стакан с водой и термометр. Если бросать кусочки льда в воду и помешивать её термометром, то по мере охлаждения воды на поверхности стакана выпадет роса. По температуре воды, при которой на поверхности стакана появляется конденсат, судят о влажности воздуха. Температура, при которой пар, находящийся в воздухе, становится насыщенным и начинает конденсироваться, называется *точкой росы* ( $t_p$ ).

Более точно влажность воздуха можно определить при помощи гигрометра Ламбрехта. Прибор состоит из металлического сосуда 1, укрепленного на подставке. Один торец сосуда отполирован и окружен отполированным кольцом 2, отделенным от сосуда теплоизолирующей прослойкой 3. Через верхнее отверстие в сосуд наливают серный эфир и закрывают отверстие пробкой с термометром 4. К воздуходувной трубке 5 прибора прикрепляют резиновый шланг с грушей для продувания воздуха через эфир. Воздух с парами эфира, отводимый через патрубок 6, следует пропустить через воду во избежание попадания паров эфира в помещение. При продувании воздуха эфир испаряется, температура его понижается, – сосуд охлаждается. На отполированной поверхности прибора появляется роса. По температуре росы  $t_p$  из таблицы “Давление и плотность насыщающего водяного пара при различных температурах” определяют значение абсолютной влажности воздуха  $\rho$  в  $\text{г}/\text{м}^3$ , а по величине комнатной температуры  $t$  – плотность насыщенного пара  $\rho_{\text{нп}}$ . Зная эти величины, определяют относительную влажность  $W$  по формуле (3).

На метеорологических станциях для измерения влажности воздуха используют психрометры. Стандартный аспирационный психрометр состоит из двух термометров и вентилятора. При включении вентилятора термометры находятся в одинаковых потоках воздуха, поэтому показания их одинаковы. Если ртутный баллончик одного из термометров обмотать батистом и смочить, то показания термометров окажутся различными. Чем меньше влажность окружающего воздуха, тем интенсивнее будет испарение воды с батиста, тем больше окажется разность между показаниями сухого  $t$  и влажного  $t_1$  термометров.

При установившемся режиме испарения ( $t - t_1 = const$ ), приток тепла  $Q_1$  к баллончику мокрого термометра равен расходу тепла  $Q_2$  на испарение воды, т.е.  $Q_1 = Q_2$ .

Приток тепла в единицу времени, согласно закону Ньютона, равен

$$Q_1 = a(t - t_1)S, \quad (4)$$

где  $S$  – поверхность баллончика мокрого термометра,  $a$  – коэффициент пропорциональности.

Количество тепла  $Q_1$ , расходуемого на испарение воды, равно

$$Q_2 = Mr, \quad (5)$$

где  $r$  – удельная теплота испарения воды,  $M$  – масса испарившейся в единицу времени воды, которая по закону Дальтона равна

$$M = \frac{kS(p_{н1} - p)}{H}. \quad (6)$$

Здесь  $p_{н1}$  – упругость насыщенного водяного пара при температуре испаряющейся жидкости  $t_1$ ,  $p$  – упругость водяного пара, находящегося в воздухе,  $H$  – давление воздуха,  $k$  – коэффициент пропорциональности.

Приравнявая (4) и (5), получаем

$$p = p_{н1} - A(t - t_1)H, \quad (7)$$

где  $A = \frac{a}{kr}$  – постоянная величина, зависящая от конструкции психрометра.

### Порядок выполнения работы

Определение влажности воздуха психрометром.

1. Установите штатив с психрометром так, чтобы столбики ртути термометров были хорошо видны.

2. Аккуратно сняв прибор, смочите дистиллированной водой батист, охватывающий баллончик влажного термометра. Смачивание выполняйте при помощи пипетки небольшими порциями воды. Следите, чтобы при смачивании вода не попала на другой термометр.

3. Ключом, расположенным в верхней части прибора, заведите вентилятор, сделав 3-4 оборота ключа, и следите за показаниями термометров.

4. Через 2-3 минуты, когда показания установятся, запишите температуру сухого  $t$  и влажного  $t_1$  термометров.

5. По таблице “Давление и плотность насыщающего водяного пара при различных температурах” определите давление насыщенного пара  $p_{н1}$ , соответствующее температуре  $t_1$  и давление насыщенного пара  $p_n$ , соответствующее температуре  $t$ .

6. При помощи барометра измерьте атмосферное давление  $H$  в мм.рт.ст.

7. Упругость водяного пара, находящегося в воздухе, определите по формуле (7). Постоянная прибора, согласно паспортным данным, составляет  $A=0,000662$  гПа/(К·мм.рт.ст.).

8. По формуле (1) определите относительную влажность  $W$  воздуха.

9. Измерения повторите не менее 3 раз.

Таблица 2.

$N_2$ $n/n$	$t$ $^{\circ}C$	$t_1$ $^{\circ}C$	$\Delta t$ $^{\circ}C$	$p_{i1}$ Па	$\Delta p_{i1}$ гПа	$p_i$ гПа	$\Delta p_i$ гПа	$H$ , мм рт.ст.	$\Delta H$ , мм рт.ст.	$P$ , гПа	$\Delta P$ , гПа	$W$ , %	$\Delta W$ , %
1													
2													
3													
Ср.													

10. Погрешности абсолютной и относительной влажности определите по формулам

$$\Delta p = \Delta p_{н1} + 2A\Delta tH + A(t - t_1)\Delta H,$$

$$\Delta W = \frac{\Delta p p_n + p \Delta p_n}{p_n^2} 100\%.$$

11. Сравните абсолютную и относительную влажность с полученными ранее значениями.

12. Результат представьте в виде  $W = W_{cp} \pm \Delta W$ .

### Контрольные вопросы

1. Методы измерения влажности воздуха. Принципы работы и устройство гигрометра и психрометра.

2. Вывод расчётных формул и определение погрешностей.

## Лабораторная работа №4

### Определение удельной скрытой теплоты испарения жидкости

**Цель работы:** знакомство с экспериментальным методом определения удельной скрытой теплоты парообразования воды.

**Приборы и принадлежности:** прибор для определения теплоты парообразования, источник питания В-24, технические весы с разновесами, часы.

#### Вопросы для подготовки к работе

1. Процесс испарения жидкости. Удельная теплота парообразования, единицы её измерения.
2. Устройство приборов для определения теплоты парообразования.
3. Расчетная формула, измерение величин, входящих в неё.

#### Краткая теория

Рассмотрим процесс перехода вещества из жидкой фазы в газообразную – процесс *испарения*. Для выхода из жидкости испаряющиеся молекулы должны преодолеть силы притяжения со стороны других молекул, т. е. совершить работу против этих сил. Очевидно, эта работа может быть совершена только за счёт кинетической энергии теплового движения молекул, причём часть этой энергии пойдёт на совершение работы против внешнего давления уже образовавшегося пара ( $p\Delta V$ , где  $\Delta V = V_i - V_{ж}$  – изменение объёма молекул при переходе из жидкого состояния в газообразное).

Такую работу могут совершить не все молекулы, а только те, которые обладают достаточной для этого скоростью, а значит наиболее «нагретые» молекулы. Поэтому в процессе *парообразования* (испарения) средняя энергия оставшихся молекул уменьшается, и жидкость охлаждается. Следствием этого эффекта является ощущение сильного охлаждения кожи, смоченной быстро испаряющейся жидкостью (эфиром).

Одновременно с испарением происходит и противоположный процесс – *конденсация*. Оба процесса – процесс испарения и процесс конденсации – протекают непрерывно. Однако, если испарение более интенсивно, чем конденсация, то жидкость переходит в газообразную фазу.

*Теплота парообразования* складывается из двух частей. Первая часть – это теплота  $Q_1$ , которая тратится на работу расширения пара, образовавшегося из жидкости. Если над поверхностью жидкости существует только её насыщенный пар, то теплота  $Q_1$ , необходимая для испарения 1 моля жидкости, равна

$$Q_1 = p(V_n - V_{ж}), \quad (1)$$

где  $p$  – давление насыщенных паров,  $V_n$  и  $V_{ж}$  – молярные объемы пара и жидкости.

Другая часть теплоты парообразования  $Q_2$  расходуется на преодоление сил межмолекулярного притяжения и равна разности внутренних энергий 1 моля пара и жидкости

$$Q_2 = U_n - U_{ж} = \left( c_v T_n - \frac{a}{V_n} \right) - \left( c_v T_{ж} - \frac{a}{V_{ж}} \right). \quad (2)$$

где  $a$  – постоянная уравнения Ван-дер-Ваальса,  $T_e$  и  $T_i$  – температуры жидкости и пара.

Полная теплота парообразования 1 моля жидкости равна

$$Q = Q_1 + Q_2.$$

Чтобы процесс испарения жидкости протекал изотермически, к ней необходимо подводить такое же количество тепла, какое расходуется при её испарении. Для 1 моля эта величина равна

$$L = Q = a \left( \frac{1}{V_{ж}} - \frac{1}{V_n} \right) + p(V_n - V_{ж}). \quad (3)$$

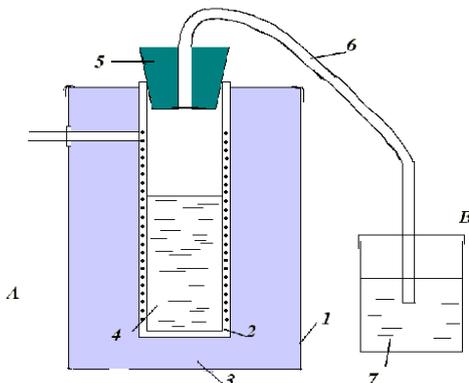
Если температура изотермического испарения много меньше критической ( $T \ll T_{кр}$ ), то и  $V_{ж} \ll V_n$ . В этом случае выражение (3) примет вид

$$L = Q \cong \frac{a}{V_{ж}} + p(V_n - V_{ж}), [L] = 1 \frac{\text{Дж}}{\text{моль}}. \quad (4)$$

Величина  $L$  называется *молярной скрытой теплотой испарения* жидкости. Она равна количеству теплоты, которое необходимо передать жидкости для изотермического испарения 1 моля её при давлении, равном упругости насыщенного пара.

Удельная скрытая теплота испарения жидкости получается делением молярной скрытой теплоты испарения на молярную массу вещества  $\mu$ :

$$\lambda = \frac{L}{\mu}, [\lambda] = 1 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}.$$



### Описание метода и приборов

Прибор для определения скрытой теплоты парообразования состоит из двух частей: термостата А, внутри которого протекает процесс парообразования, и съёмной части В, которая служит для отвода образовавшегося пара и его последующей конденсации. Термостат А представляет собой ме-

таллический корпус 1, внутрь которого вмонтирован керамический резистор 2. Пространство между корпусом и резистором заполнено теплоизолирующим материалом, для исключения потерь тепла. Исследуемая жидкость 4 заливается в полость керамического резистора, подключаемого к источнику питания В-24, и нагревается до температуры кипения.

В дальнейшем процесс испарения жидкости протекает изотермически при температуре кипения. Керамический резистор 2 сверху плотно закрывают пробкой 5 съёмной части В прибора. По трубке 6, один конец которой проходит сквозь пробку 5, а другой опущен в холодную воду 7, пар отводится к месту его конденсации.

О количестве испарившейся за время  $t$  жидкости судят по изменению массы съёмной части В прибора.

Количество тепла, затраченное на испарение массы  $m$  жидкости, равно

$$Q_1 = \lambda m. \quad (5)$$

Количество тепла, полученное жидкостью от резистора за время испарения  $t$ , равно

$$Q_2 = UIt, \quad (6)$$

где  $U$  – электрическое напряжение,  $I$  – ток в цепи резистора.

Пренебрегая тепловыми потерями, запишем уравнение теплового баланса в виде  $\lambda m = UIt$ , откуда  $\lambda = \frac{UIt}{m}$ . (7)

### Порядок выполнения работы

1. Определите массу  $m_1$  съёмной части В прибора вместе с находящейся в ней водой 7 взвешиванием на технических весах.

2. В полость керамического резистора 2 налейте воды так, чтобы она занимала половину объёма.

3. Подключите прибор к источнику питания В-24 и, установив напряжение  $\sim 30$  В, доведите воду до кипения.

4. Уменьшите напряжение в цепи резистора до  $\sim 20$  В и установите съёмную часть В в рабочее положение, как это показано на рис.1. Проследите, чтобы второй конец пароотводной трубки был погружён в холодную воду.

5. Наблюдайте процесс испарения воды в термостате и конденсации пара в стаканчике съёмной части в течение 10-20 мин. Снимите как можно точнее показания амперметра и вольтметра.

6. По окончании опыта взвесьте повторно съёмную часть прибора и определите его массу  $m_2$ . Повторите опыт 3 раза.

7. Результаты измерений занесите в таблицу.

№ n/n	U, В	I, А	t, с	m <sub>1</sub> , кг	m <sub>2</sub> , кг	m=m <sub>2</sub> -m <sub>1</sub> , кг	λ, Дж/кг	ε <sub>λ</sub>	Δλ, Дж/кг
1									
2									
3									
Ср.									

8. Рассчитайте погрешности по формулам

$$\varepsilon_{\lambda} = \frac{\Delta U}{U} + \frac{\Delta I}{I} + \frac{\Delta t}{t} + \frac{\Delta m}{m}$$

$$\Delta \lambda = \varepsilon_{\lambda} \lambda_{cp}.$$

9. Сравните полученное значение  $\lambda$  с табличным. Сделайте выводы.

### Контрольные вопросы

1. Первое начало термодинамики. Уравнение теплового баланса.
2. Фазовые переходы первого рода.
3. Зависимость между температурой и давлением фазового перехода, уравнение Клапейрона-Клаузиуса.

## Лабораторная работа №5

### Определение коэффициента теплового расширения тел

**Цель работы:** знакомство с экспериментальным методом определения коэффициентов теплового расширения твердых тел.

**Приборы и принадлежности:** установка для изучения теплового расширения тел, поставляемая фирмой 3В *Scientific* (г. Санкт-Петербург).

### Вопросы для подготовки к работе

1. Причины расширения тел при нагревании. Коэффициенты линейного и объемного расширения, единицы измерения.
2. Устройство прибора для определения коэффициента теплового расширения тел.
3. Расчетная формула, измерение величин, входящих в нее.

### Краткая теория

Для инженеров тепловое расширение — чрезвычайно важное явление. Оно учитывается при конструировании всех установок, приборов и машин, а

также строительных объектов, работающих в переменных температурных условиях. Приведем лишь несколько примеров.

С тепловым расширением материалов приходится считаться при конструировании стыков рельсов, опор мостов, при создании армированных материалов. Железо и бетон имеют одинаковые коэффициенты теплового расширения, поэтому железобетон является одним из самых долговечных строительных материалов. При проектировании линий электропередач необходимо учитывать удлинение электрических проводов не только под действием тока, но и в результате суточных перепадов температуры воздуха.

В настоящее время тепловое расширение, изменение размеров тела (твёрдого, жидкого или газообразного) в процессе его нагревания, характеризуется изобарным коэффициентом объёмного расширения  $\beta = \frac{1}{V} \left( \frac{dV}{dT} \right)_p$ . Давление вещества при этом обычно соответствует атмосферному давлению. Для характеристики теплового расширения твёрдых тел дополнительно вводят коэффициент линейного теплового расширения  $\alpha = \frac{1}{L} \left( \frac{dL}{dT} \right)_p$ .

Из определения следует, что абсолютное удлинение стержня при нагревании можно рассчитать по формуле:  $\Delta L = L - L_0 = L_0 \alpha \Delta T$ . Отсюда длина стержня после нагревания  $L = L_0 (1 + \alpha \Delta T)$ , где  $L_0$  – начальная длина стержня,  $\Delta T$  – изменение температуры в процессе нагревания,  $\alpha$  – коэффициент линейного расширения. В диапазоне атмосферных температур, в качестве начальной температуры обычно принимают  $0^\circ \text{C}$ , тогда  $\Delta T = t$ , а

$$L = L_0 (1 + \alpha t) \quad (1)$$

Между коэффициентами  $\alpha$  и  $\beta$  существует зависимость, которая для наиболее простого случая (изотропного тела) может быть установлена следующим образом.

Рассмотрим расширение кубика из изотропного материала

$$\Delta V = V - V_0 = L^3 - L_0^3.$$

Рассчитаем объём кубика при заданной температуре  $t$

$$L^3 = L_0^3 (1 + \alpha t)^3 = L_0^3 (1 + 3\alpha t + 3\alpha^2 t^2 + \alpha^3 t^3)$$

Так как коэффициент  $\alpha$  очень мал, то величинами  $\alpha^2$  и  $\alpha^3$  можно пренебречь, тогда  $\Delta V = 3L_0^3 \alpha t$ , а объём кубика

$$V = L_0^3(1 + 3\alpha t) = V_0(1 + \beta t). \quad (2)$$

Отсюда следует, что объемный коэффициент расширения равен утроенному значению коэффициента линейного расширения ( $\beta = 3\alpha$ ). Аналогично рассуждая, можно вывести формулу изменения площади изотропной пластины при нагревании

$$S = L_0^2(1 + 2\alpha t) = S_0(1 + 2\alpha t). \quad (3)$$

### Описание метода и устройства прибора

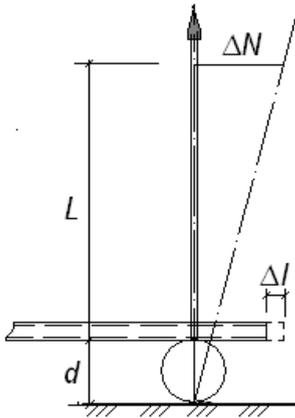
Для экспериментального изучения теплового расширения тел используется установка, поставляемая фирмой *3B Scientific* (г. Санкт-Петербург). В настоящее время такая установка приобретена в лабораторию молекулярной физики и термодинамики ФБОУ ВПО «БГПИ».

Установка содержит лабораторную скамью, на которой укреплены трубки из исследуемых материалов: латуни, алюминия и стекла. Из сосуда с водой, установленного на плитке с регулируемым режимом нагрева, горячий пар (с температурой  $100^\circ\text{C}$ ) подается в трубки.

Измерение удлинения трубок под действием нагрева осуществляется стрелками особой конструкции. В нижней части каждая стрелка снабжена цилиндрическим валиком диаметром  $d$ , который устанавливают между неподвижной скамьей и испытуемой трубкой. При температурном удлинении трубки на величину  $\Delta L$  валик поворачивается и отклоняет закрепленную на нем стрелку от начального нулевого положения. Длина стрелки  $L$  почти в 60 раз больше диаметра валика, что придает высокую точность измерениям по шкале. В свою очередь шкала имеет зеркальную полоску. Совмещение стрелки с ее отражением в зеркальце шкалы позволяет более точно снимать отсчеты.



Обсудим вывод рабочей формулы. Для этого рассмотрим схему измерительной части прибора.



Пусть в результате нагрева трубки паром от комнатной температуры  $t_1$  до температуры  $t_2 = 100^\circ \text{C}$  она изменила свою длину с  $L_1$  до  $L_2 = L_1[1 + \alpha(t_2 - t_1)]$ , следовательно, удлинение трубки составило

$$\Delta L = L_2 - L_1 = L_1 \alpha (t_2 - t_1). \quad (4)$$

Тогда в результате действия силы трения валик со стрелкой повернется на малый угол  $\varphi$ , причем

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{\Delta L}{d} = \frac{N}{L + d}.$$

Удлинение, полученное трубкой, таким образом, можно определить с помощью показаний шкалы прибора ( $N$ )

$$\Delta L = \frac{N}{L + d} d. \quad (5)$$

Сравнивая правые части уравнений (4) и (5) получим формулу, удобную для расчета коэффициента линейного расширения:

$$L_1 \alpha (t_2 - t_1) = \frac{N}{L + d} d, \text{ откуда } \alpha = \frac{d}{L + d} \cdot \frac{N}{L_1 (t_2 - t_1)}$$

Из формулы следует, что при равных условиях эксперимента (параметрах установки  $L, d, L_1$  и температурных диапазонах  $(t_2 - t_1)$ ), значения коэффициентов теплового расширения разных материалов определяются только показаниями  $N$  шкалы. Следовательно, шкалу можно проградуировать в размерности коэффициента линейного расширения  $\alpha$  ( $\text{K}^{-1}$ ).

### Порядок выполнения работы

1. Соберите прибор в соответствии с указаниями, приведенными выше.
2. Измерьте микрометром диаметры  $d$  валиков, к которым прикрепляются стрелки измерительной части прибора.
3. Укрепите испытуемые трубки (из латуни, алюминия, стекла или др.) на лабораторной скамье прибора и установите валики измерительных стрелок так, чтобы их верхние концы указывали на ноль измерительной шкалы.
4. Измерьте линейкой длины трубок  $L_1$  и длины стрелок  $L$ .

5. Измерьте температуру трубок перед нагреванием и результат внесите в таблицу
6. Включите плитку и нагрейте воду, находящуюся в сосуде под пробковой крышкой до кипения ( $100^{\circ}\text{C}$ ).
7. Уменьшите мощность плитки так, чтобы процесс парообразования был не слишком интенсивным.
8. Соедините пароотводящую трубку нагревателя с устройством, распределяющим горячий пар по трубкам, выполненным из испытуемых материалов.
9. Наблюдайте процесс удлинения трубок при нагревании в течение 2-3 мин, пока показания стрелок не установятся. Отсчеты по шкале прибора внесите в таблицу.
10. Определите значения коэффициентов линейного расширения по формуле (6).

Таблица

Материал образца	$L$ , мм	$L_1$ , мм	$d$ , мм	$t_1$ , град	$\alpha$ , $\text{K}^{-1}$	$\Delta\alpha$ , $\text{K}^{-1}$	$\Delta\alpha/\alpha$
латунь							
алюминий							
стекло							

11. Рассчитайте погрешности по формулам:

$$\varepsilon_{\alpha} = \frac{\Delta d}{d} + \frac{\Delta N}{N} + \frac{\Delta L + \Delta d}{L + d} + \frac{\Delta L_1}{L_1} + \frac{2\Delta t}{t_2 - t_1}; \quad \Delta\alpha = \varepsilon_{\alpha}\alpha$$

Сравните полученные значения с табличными данными. Сделайте **ВЫВОДЫ**.

### Контрольные вопросы

1. Коэффициент линейного и объемного расширений. Как зависят они друг от друга?
2. Объяснить устройство измерительной части прибора и вывести рабочую формулу для определения коэффициента линейного расширения.
3. Получить формулу для расчета погрешностей данного метода.

### Библиографический список

1. Савельев, И.В. Курс общей физики: Учебное пособие. В 3-х т. Т.1. Механика. Молекулярная физика [Текст] / И. В. Савельев. – М.: Наука, 1986. – 432 с.
2. Гершензон, Е. М. Механика: Учеб. пособие [Текст] / Е. М. Гершензон, Н.Н. Малов, А. Н. Мансуров. – М.: Издательский центр «Академия», 2001. – 384 с.
3. Поль, Р. В. Механика, акустика и учение о теплоте [Текст] / Р. В. Поль.- М.: Наука, 1971. – 480 с.
4. Гершензон, Е. М.. Курс общей физики: Молекулярная физика [Текст] / Е. М. Гершензон, Н. Н. Малов, А. Н. Мансуров, В. С. Эткин. – М.: Просвещение, 1982. – 207 с.
5. Кикоин, А. К. Молекулярная физика [Текст] /А. К. Кикоин, И. К. Кикоин. – М.: Наука, 1976. – 490 с.
6. Руководство к лабораторным занятиям по физике [Текст] / Под ред. Л. Л. Гольдина. – М.: Наука, 1973. – 688 с.
7. Физический практикум. Механика и молекулярная физика [Текст] / Под ред. В. И. Ивероновой. – М.: Наука, 1967. – 352 с.

## Приложение

### Таблица 1

#### Свойства некоторых твёрдых тел

Вещество	Плотность $\times 10^3$ , кг/м <sup>3</sup>	Температура плавления, °C	Удельная теплоёмкость, Дж/(кг·K)	Удельная теплота плавления, кДж/кг	Температурный коэффициент линейного расширения $\times 10^{-5}$ , K <sup>-1</sup>
Алюминий	2,6	659	896	322	2,3
Железо	7,9	1530	500	272	1,2
Латунь	8,4	900	386	–	1,9
Лёд	0,9	0	2100	335	–
Медь	8,6	1100	395	176	1,6
Олово	7,2	232	230	58,6	2,7
Платина	21,4	1770	117	113	0,89
Пробка	0,2	–	2050	–	–
Свинец	11,3	327	126	22,6	2,9
Серебро	10,5	960	234	88	1,9
Сталь	7,7	1300	460	–	1,06
Цинк	7,0	420	391	117	2,9

Таблица 2

#### Давление и плотность насыщенного пара воды

Темпе- ратура $t$ , °C	Давление $p$		Плот- ность $\rho_{\text{макс}}$ , г/м <sup>3</sup>	$t$ , °C	Давление $p$		Плот- ность $\rho_{\text{макс}}$ , г/м <sup>3</sup>
	кПа	мм рт.ст			кПа	мм рт.ст	
-5	0,401	3,01	3,25	12	1,401	10,51	10,61
-4	0,437	3,01	3,53	13	1,497	11,23	11,36
-3	0,463	3,47	3,83	14	1,597	11,98	12,08
-2	0,517	3,88	4,14	15	1,704	12,78	12,84
-1	0,563	4,22	4,49	16	1,817	13,63	13,65
0	0,611	4,58	4,85	17	1,937	14,53	14,50
1	0,656	4,92	5,20	18	2,062	15,47	15,39
2	0,705	5,59	5,57	19	2,196	16,47	16,32
3	0,757	5,68	5,95	20	2,337	17,53	17,32
4	0,813	6,10	6,37	21	2,486	18,65	18,35
5	0,872	6,54	6,80	22	2,642	19,82	19,44
6	0,935	7,01	7,27	23	2,809	21,07	20,60
7	1,005	7,54	7,79	24	2,984	22,38	21,81
8	1,072	8,04	8,28	25	3,168	23,76	23,07
9	1,148	8,61	8,83	26	3,361	25,21	24,40
10	1,227	9,20	9,41	27	3,565	26,74	25,79

11	1,312	9,84	10,02	28	3,780	28,35	27,26
----	-------	------	-------	----	-------	-------	-------

Таблица 3

**Психометрическая таблица**

Показания сухого термометра, $^{\circ}\text{C}$	Разность показаний сухого и влажного термометра, $^{\circ}\text{C}$										
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	Относительная влажность, %										
0	100	81	63	45	28	11	–	–	–	–	–
2	100	84	68	51	35	20	–	–	–	–	–
4	100	85	70	56	42	28	14	–	–	–	–
6	100	86	73	60	47	35	23	10	–	–	–
8	100	87	75	63	51	40	28	18	7	–	–
10	100	88	76	65	54	44	34	24	14	5	–
12	100	89	78	68	57	48	38	29	20	11	–
14	100	89	79	70	60	51	42	34	25	17	9
16	100	90	81	71	62	54	45	37	30	22	15
18	100	91	82	73	65	56	49	41	34	27	20
20	100	91	83	74	66	59	51	44	37	30	24
22	100	92	83	76	68	61	54	47	40	34	28
24	100	92	84	77	69	62	56	49	43	37	31
26	100	92	85	78	71	64	58	51	46	40	34
28	100	93	85	78	72	65	59	53	48	42	37
30	100	93	86	79	73	67	61	55	50	44	39

Таблица 4

**Удельная теплота парообразования воды при разных температурах**

$t,$ $^{\circ}\text{C}$	0	50	100	200
$r,$ $\text{МДж/кг}$	2,49	2,38	2,26	1,94

# **МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА И ТЕРМОДИНАМИКА**

**МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ**  
к выполнению лабораторных работ  
по дисциплине «Физика»  
для студентов технических направлений  
очной и заочной форм обучения

Составители:

**Зульфикарова** Татьяна Владимировна,  
**Матвеева** Людмила Иосифовна

Подписано к изданию 09.11.2021.

Уч.-изд. л. 1,8

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