

Министерство образования и науки Российской Федерации
Государственное образовательное учреждение высшего
профессионального образования

РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

Кафедра физики

**ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВИРТУАЛЬНЫХ СТЕНДОВ**

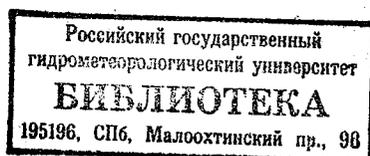
по дисциплине
«ФИЗИКА»

Раздел
«Молекулярная физика и термодинамика»

Для направлений: Гидрометеорология
Экология и природопользование
Физика



Санкт-Петербург
2010



*Одобрено методической комиссией факультета
Экологии и физики природной среды РГГМУ*

УДК 53

Лабораторный практикум с использованием виртуальных стендов по дисциплине «Физика». Раздел «Молекулярная физика и термодинамика». – СПб.: изд. РГГМУ, 2010. – 64 с.

Авторы: В.В. Косцов, ст. преп., Е.Н. Станкова, канд. физ.-мат. наук, доцент, каф. физики РГГМУ.

Ответственный редактор: А.П. Бобровский, канд. физ.-мат. наук, зав. каф. физики РГГМУ.

Лабораторный практикум предназначен для студентов первого курса очной и заочной форм обучения по направлениям: гидрометеорология, экология и природопользование, физика. Содержит 8 лабораторных работ с использованием виртуальных стендов по разделу курса физики “Молекулярная физика и термодинамика”.

© Авторы, 2010

© Российский государственный гидрометеорологический университет (РГГМУ), 2010

ПРЕДИСЛОВИЕ

Настоящее учебное пособие содержит описания 8 лабораторных работ по разделу «Молекулярная физика и термодинамика» курса физики. Нумерация работ обусловлена особенностями программного обеспечения.

Нумерация работ обусловлена особенностями программного обеспечения.

Студент допускается к выполнению лабораторной работы после самостоятельного домашнего изучения необходимых сведений из теории, ознакомлением с существом и порядком выполнения основных операций и только при наличии должным образом оформленного рабочего журнала, который должен содержать разделы в следующем порядке: номер и наименование лабораторной работы, задачи работы, рабочие формулы (с расшифровкой величин), таблицу используемых приборов, таблицу измерений, формулы расчета погрешностей прямых и косвенных измерений. Более подробно об оформлении рабочего журнала и отчета см. «Обработку результатов измерений физических величин» под редакцией С.А. Фокина [8].

Со своего рабочего места (компьютера) преподаватель назначает студенту лабораторную работу (записывает на съемный носитель памяти). Затем студент выполняет работу на своем рабочем месте (удаленном компьютере).

Перед выполнением задания студенту необходимо внимательно ознакомиться с управлением программой виртуальных стендов.

В левом верхнем углу окна программы расположена панель управления (Рис.1).



Рис.1. Панель управления.

Чтобы открыть лабораторную работу необходимо выполнить следующие действия: нажать левой клавишей мыши «файл», затем «открыть». В появившемся окошке выделить назначенную работу и нажать «открыть». В результате появится лабораторный стенд.

Цифры, появляющиеся в крайнем левом окошке панели управления, показывают время выполнения работы; далее располагаются кнопки **ПУСК**, **ПАУЗА**, **СТОП**, **ПРЫЖОК**. В крайнем правом окошке можно выбрать временной шаг прыжка (1 мин., 5 мин., 10 мин., 15 мин., 20 мин.)

Запуск работы производится нажатием кнопки **ПУСК**. Для этого подведите курсор мыши к этой кнопке и щелкните левой клавишей мыши. В дальнейшем все действия, связанные с включением/выключением приборов, открытию /закрытию кранов, установлением различных параметров и т.д. следует производить таким же способом (подвести курсор мыши и щелкнуть левой клавишей).

Кнопка **ПАУЗА** временно приостанавливает выполнение работы. Для продолжения работы нужно повторно нажать кнопку **ПУСК**.

Кнопка **СТОП** приводит к полному прекращению выполнения работы.

Нажатие на кнопку **ПРЫЖОК** позволяет ускорить выполнение работы за счет сокращения времени ожидания установления какого-либо процесса.

При наведении курсора на любой элемент установки рядом отображается всплывающая подсказка, содержащая название данного элемента и изображение внутреннего устройства элемента.

Выполнив измерения и произведя необходимые расчеты, студент оформляет отчет, который представляет преподавателю. При этом студент должен показать понимание физического содержания проведенных измерений и дать оценку их достоверности.

Лабораторный практикум предназначен для студентов первого курса очной и заочной форм обучения по направлениям: гидрометеорология, экология и природопользование, физика.

Лабораторная работа № 4

ОПРЕДЕЛЕНИЕ «ТОЧКИ РОСЫ» ПРИ РАЗЛИЧНОЙ АБСОЛЮТНОЙ ВЛАЖНОСТИ

1. Задача работы

1.1. Определение «точки росы» влажного воздуха.

2. Предварительные сведения

Понятие «точка росы» тесно связано с вопросом количественного определения содержания водяного пара в атмосферном воздухе. Как известно, последний представляет собой смесь сухого воздуха и водяного пара. Существуют разные способы описания количества водяного пара, содержащегося в воздухе.

а) Давление пара e - парциальное давление водяного пара в воздухе, или упругость водяного пара.

б) Плотность пара ρ_n , называемая также абсолютной влажностью, определяется следующими соотношениями:

$$\rho_n = \frac{m_n}{V}, \quad (1 \text{ а})$$

$$e = \rho_n R_n T, \quad (1 \text{ б})$$

где m_n - масса водяного пара в объеме V , R_n - газовая постоянная для водяного пара (461 Дж/(кг К)), T - температура пара в градусах Кельвина.

в) Отношение смеси ω - масса водяного пара, приходящаяся на единицу массы сухого воздуха:

$$\omega = \frac{M_n}{M_c} = \frac{\rho_n}{\rho_c}, \quad (2)$$

где M_n, ρ_n - масса и плотность водяного пара, соответственно; M_c, ρ_c - соответственно масса и плотность сухого воздуха.

Из уравнения состояния: $\rho_n = \frac{e}{R_n T}$ и $\rho_c = \frac{(p-e)}{R' T}$, где p, R' - давление атмосферного воздуха (водяной пар + сухой воздух) и удельная газовая постоянная сухого воздуха, соответственно, следует:

$$\omega = \varepsilon \frac{e}{p-e} \approx \varepsilon \frac{e}{p}, \quad \text{так как } e \ll p, \quad (3)$$

где $\varepsilon = \frac{R'}{R_n} = 0,622$.

г) Удельная влажность q - масса водяного пара, приходящаяся на единицу массы влажного воздуха ρ :

$$q = \frac{\rho_n}{\rho} = \frac{\rho_n}{\rho_n + \rho_c} = \varepsilon \frac{e}{p - (1 - \varepsilon)e} \approx \varepsilon \frac{e}{p}. \quad (4)$$

д) Относительная влажность f - отношение отношения смеси водяного пара к своему насыщающему значению, выражаемое в процентах:

$$f = 100 \frac{\omega}{\omega_{nn}} = 100 \frac{\rho_n}{\rho_{nn}} = 100 \frac{e}{e_{nn}} \left(\frac{p - e_{nn}}{p - e} \right) \approx 100 \frac{e}{e_{nn}} \approx 100 \frac{q}{q_{nn}}, \quad (5)$$

где $e_{nn}, \omega_{nn}, q_{nn}$ - значение упругости, отношения смеси и удельной влажности насыщенного пара, соответственно.

Иначе, относительную влажность можно определить как процентное отношение фактической упругости водяного пара в атмосфере к упругости насыщенного водяного пара при данной температуре, или как отношение фактической абсолютной или удельной влажности к абсолютной или удельной влажности для состояния насыщения при той же температуре.

Рассмотрим подробнее, что такое насыщенный пар, а также что означают понятия упругость и плотность насыщенного пара, насыщающее отношение смеси и насыщающая удельная влажность.

Рассмотрим замкнутый и термически изолированный сосуд, частично заполненный водой. Молекулы воды находятся в непрерывном движении, и те из них, что подходят близко к поверхности, могут отрываться от воды и переходить в воздух. С другой стороны, часть молекул пара из воздуха сталкивается с поверхностью воды и остается на ней. Таким образом, одновременно происходит и конденсация, и испарение. В конечном счете, достигается равновесное состояние при заданной температуре, при котором оба процесса протекают с одной и той же скоростью. При этом температура воздуха и пара равна температуре воды, и в суммарном итоге отсутствует переход молекул воды из одной фазы в другую. В этом случае говорят, что пространство над водой насыщено водяным паром. Парциальное же давление водяного пара в воздухе называется при этом давлением или упругостью насыщенного пара - e_{nn} . Часто для краткости говорят насыщающее или равновесное давление (или упругость). Установлено, что насыщающее давление пара зависит только от температуры.

Абсолютная влажность при данной температуре не может превышать своего насыщающего значения:

$$\rho_{нп} = \frac{e_{нп}}{R_n T} \quad (6)$$

Насыщающее отношение смеси и насыщающая удельная влажность, обозначаемые через $\omega_{нп}$, $q_{нп}$ соответственно, находятся с помощью (3) и (4) формальной заменой e на $e_{нп}$. Т.к. $e_{нп} = e_{нп}(T)$, то и $\omega_{нп}$ и $q_{нп}$, есть функции только температуры и давления и не зависят от содержания водяного пара в воздухе.

е) Точкой росы $T_{мп}$ называется температура, при которой воздух достигает состояния насыщения (по отношению к воде) при данном содержании водяного пара и неизменном давлении (неизменные значения ω и p). При относительной влажности меньше 100% точка росы всегда ниже фактической температуры воздуха; разность этих температур тем больше, чем меньше относительная влажность; поэтому, чтобы довести температуру воздуха до точки росы, воздух нужно охладить. При насыщении, т.е. при относительной влажности $f = 100\%$, фактическая температура воздуха совпадает с точкой росы.

Зная температуру точки росы можно легко определить влажность воздуха. Действительно: упругость водяного пара при фактической температуре воздуха будет равна упругости насыщенного пара при температуре точки росы, т.е. $e_{н.п.}(T_{мп}) = e(T_{факт}) = e$. Насыщающее значение упругости пара определяют по фактической температуре $e_{н.п.} = e_{н.п.}(T_{факт.})$. Их отношение, выраженное в процентах, и будет, согласно (5) относительной влажностью воздуха.

Значения точки росы используют для нанесения на метеорологические термодинамические диаграммы, как наиболее удобный способ отображения величины влажности воздуха.

3. Метод исследования и описание установки

Точка росы на практике определяется путем измерения температуры охлаждаемой поверхности, когда на ней начинает образовываться конденсат (капельки воды). В данной работе точку росы находят, определяя начало процесса конденсации воды в замкнутом объеме, содержащем влажный воздух.

Экспериментальная установка изображена на рис. 1.

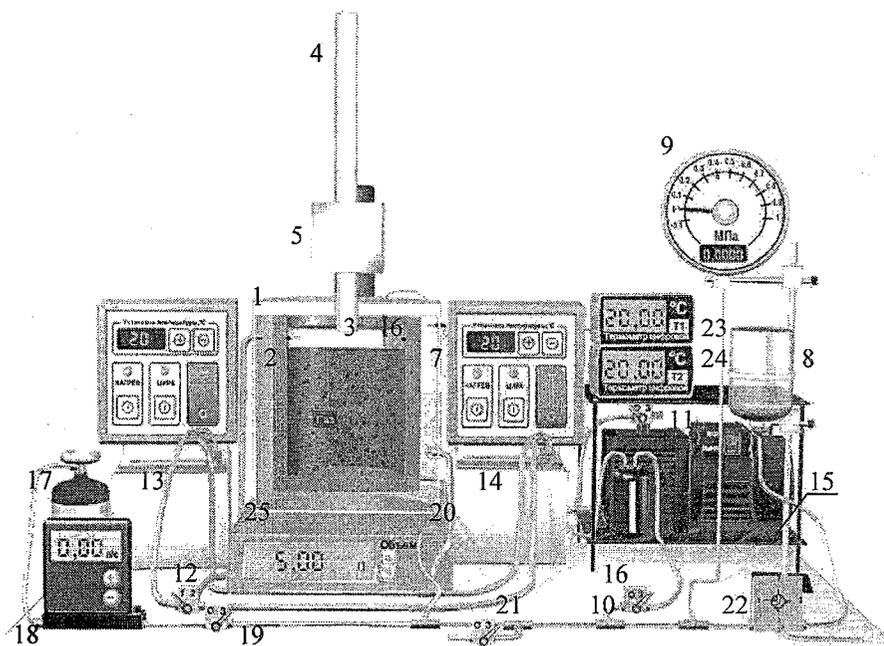


Рис.1. Схема установки.

Назначение и характеристика основных элементов установки.

а) **Термостатированный резервуар (1)** с заключенным в нем цилиндром (2) с поршнем (3). Посредством штока (4) и реверсивного шагового привода (5) поршень может перемещаться в цилиндре. Управляется шаговый привод пультом (25), отображающим текущий объем под поршнем. Минимальный объем цилиндра равен нулю, максимальный – 5 л.

б) **Термостаты.** Термостатирование объема осуществляется прокачиваемой водой, температура которой поддерживается термостатами (13) и (14), настроенными на поддержание низкой и высокой температуры. Выбор термостата, вода из которого в данный момент подается в объем (1), осуществляется краном (12). Каждый термостат имеет собственный пульт управления, расположенный над ним. Термостаты расположены ниже уровня цилиндра и при отключении циркуляционного насоса вода из рубашки цилиндра стекает в соответствующий термостат. Термостат может находиться в трех состояниях:

«**ВЫКЛ**» – переключатели [нагрев] и [цирк.] в положении [выключено], если в этом состоянии термостат подключен к системе краном (12), то в него стекает вода из рубашки цилиндра;

«**ВКЛ**» – переключатели [нагрев] и [цирк.] в положении [выключено], при этом на выходе термостата температура равна заданной регулятором [Установка температуры] независимо от величины температуры на входе;

«**ЦИРК.**» – переключатель [нагрев] в положении [выключено], переключатель [цирк.] в положении [выключено], при этом температура на выходе термостата равна температуре на входе. Допускается любое состояние термостата при любом положении крана (12).

в) Система заполнения цилиндра. Для заполнения или вентиляции объема цилиндра служат краны:

(21) – соединяет внутренний объем цилиндра с атмосферой;

(19) – подключает к магистрали баллон (17), содержащий углекислый газ. Давление подаваемого газа задается редуктором, который управляется с пульта (18);

(22) – кран-дозатор для подачи воды во внутренний объем цилиндра заданного количества жидкости (вода). Объем канала крана-дозатора (22) - 0,05 мл.

г) Система откачки цилиндра. Узел откачки газа состоит из форвакуумного насоса (15), кранов (10) и (11). Включение насоса осуществляется кнопкой включения (15). Состояние кранов при выключенном насосе: кран (11) открыт, кран (10) закрыт. После включения насоса сначала закрывается кран (11), затем открывается кран (10). Перед выключением насоса сначала закрывается кран (10), затем открывается кран (11), после этого выключается насос. Если выключается насос при закрытом кране (11), то при давлении в магистрали меньше атмосферного происходит выброс масла их насоса в маслоотделитель (16), в этом случае необходимо при закрытых кранах (10) и (11) на некоторое время включить насос для закачки масла обратно.

д) Контроль давления. Для контроля давления служит мановакуумметр (9). Показания прибора – относительно атмосферного давления.

е) Измерение температуры внутри цилиндра осуществляется термопарой, индикация температуры – цифровой термометр (23). Индикация температуры воды осуществляется цифровым термометром (24).

4. Порядок выполнения работы

4.1. Запустите лабораторную работу.

4.2. Приготовление влажного воздуха.

В данной работе предполагается заполнение цилиндра абсолютно сухим воздухом. Для добавления воды служит кран-дозатор (22), позволяющий подавать в цилиндр воду порциями по 0,05 мл (0,05 г). Для перетекания воды из крана-дозатора в цилиндр необходимо, чтобы давление в цилиндре было меньше атмосферного. Для удаления из цилиндра влажного воздуха (от предыдущих опытов) необходимо не только уменьшить давление внутри цилиндра, но провести его полное вакуумирование.

4.2.1. Установите на левом термостате температуру 60°C , включите режим **ЦИРК** и **НАГРЕВ**, краном 12 подключите левый термостат к рубашке цилиндра.

4.2.2. Переведите поршень в верхнее положение.

4.2.3. Убедитесь, что краны (21) и (19) закрыты, кран-дозатор (22) в положении «1».

4.2.4. Включите форвакуумный насос, закройте кран (11), после этого откройте кран (10). Дождитесь, когда давление в системе перестанет понижаться (цифры на индикаторе мановакуумметра (9) перестанут изменяться). Для ускорения этого процесса нажмите на кнопку **ПРЫЖОК**. Чем больше будет шаг прыжка, тем быстрее пойдет процесс понижения давления. После установления давления закройте кран (10), откройте кран (11), выключите форвакуумный насос.

4.2.5. Переведя кран-дозатор (22) последовательно в положения «1»–«2»–«1» добавьте в цилиндр количество воды $m_n = 0,05$ г.

4.2.6. Откройте кран (21) на время, необходимое для уравнивания давления внутри цилиндра с атмосферным давлением. Для ускорения этого процесса также можно воспользоваться кнопкой **ПРЫЖОК**. После того, как давление выровняется, закройте кран (21).

4.3. Определение точки росы.

4.3.1. Уменьшайте температуру на левом термостате до тех пор, пока не начнется конденсация водяных паров (отображается белыми крупными каплями на изображении внутреннего объема цилиндра). Если при минимальной температуре конденсация не началась, то, оставив температуру минимально возможной, опускайте поршень вниз до начала конденсации.

На первом этапе температуру можно понижать сразу на $10\text{--}20^{\circ}\text{C}$, с дальнейшим уточнением.

Имейте в виду, что для того, чтобы температура внутри термостатированного объема (цилиндра) была равна температуре термостата, требуется время. Температуру внутри цилиндра отображают цифровые термометры (23) и (24). Дождитесь, пока они покажут ту же температуру, которая отображается на пульте управления термостатом (13). Для ускорения процесса установления температуры можно также воспользоваться кнопкой **ПРЫЖОК**.

4.3.2. После определения температуры начала конденсации, поднимите температуру на 1°C выше (чтобы исчез конденсат). и перемещением поршня установите в цилиндре атмосферное давление («0» на манометре, или минимально возможно отличающееся от нуля).

4.3.3. Если в процессе перемещения поршня в цилиндре возникает конденсат, то повторяйте действия п.п.4.3.2-4.3.3., пока в цилиндре не будет влажный воздух при атмосферном давлении без конденсата, но при понижении температуры на 1°C конденсат образуется. Эта температура и будет «точкой росы».

4.3.4. Занесите в таблицу следующие величины: количество воды m_n (определяемое дозатором), температура t (показания цифровых термометров (23) и (24), объем V (показания пульта управления (25)).

№ опыта	m_n г	m_n Кг	$t_{\text{тр}}^{\circ}\text{C}$	V л	$V_{\text{м}^3}$

4.3.5. Повторите п.п. 4.2.2.-4.3.4. для следующих количеств воды m_n : 0,1; 0,2; 0,4г . Для этого, выполняя п. 4.2.5., переводите кран-дозатор в положения «1»-«2»-«1», соответственно 2, 4 и 8 раз. Каждый раз заносите данные в таблицу.

5. Обработка результатов измерений

5.1. Погрешности прямых измерений. Систематические погрешности цифрового термометра, термометров на термостатах и мановакууметра приведены в “Приложении №1”.

5.2 Погрешности для величины массы воды, объема определяются как погрешности физических констант. Погрешность температуры точки росы совпадает с приборной погрешностью цифрового термометра.

5.3. Рассчитайте для каждого опыта абсолютную влажность воздуха при температуре точке росы, используя формулу (1а). Рассчитайте погрешность абсолютной влажности воздуха, как погрешность косвенного измерения.

5.4. Постройте график зависимости температуры точки росы от абсолютной влажности.

Контрольные вопросы

- 1.Что такое абсолютная влажность?
2. Что такое относительная влажность ?

3. Как зависит разность между фактической температурой воздуха и температурой точки росы от величины относительной влажности?

4. Какой знак имеет эта разность при относительной влажности $f < 100\%$

5. Что нужно сделать, чтобы довести температуру воздуха до температуры точки росы?

6. Чему равна температура точки росы при относительной влажности $f = 100\%$?

7. Как определить влажность воздуха, зная фактическую температуру воздуха и температуру точки росы?

8. Как определяют температуру точки росы на практике?

Лабораторная работа № 5

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕПЛОТЫ ИСПАРЕНИЯ ЖИДКОСТИ ПО ДАВЛЕНИЮ НАСЫЩЕННЫХ ПАРОВ

1. Задачи работы

- 1.1. Измерение давления паров жидкости при разной температуре.
- 1.2. Вычисление по полученным данным теплоты испарения с помощью уравнения Клаузиуса-Клапейрона.

2. Предварительные сведения

Рассмотрим замкнутый и термически изолированный сосуд, частично заполненный водой. Молекулы воды находятся в непрерывном движении, и те из них, что подходят близко к поверхности, могут отрываться от воды и перейти в воздух. Этот процесс называется испарением. С другой стороны, часть молекул пара из воздуха сталкивается с поверхностью воды и остается на ней. Такой процесс называется конденсацией. Таким образом, одновременно происходит и конденсация, и испарение. В конечном счете, достигается равновесное состояние при заданной температуре, при котором оба процесса протекают с одной и той же скоростью. При этом температура воздуха и пара равна температуре воды, и в суммарном итоге отсутствует переход молекул воды из одной фазы в другую. В этом случае говорят, что пространство над водой насыщено водяным паром. Парциальное же давление водяного пара в воздухе называется при этом давлением или упругостью насыщенного пара — $e_{\text{нп}}$. Часто для краткости говорят насыщающее или равновесное давление (или упругость). Установлено, что насыщающее давление пара зависит только от температуры.

При испарении для выхода из жидкости молекулы должны преодолеть силы молекулярного сцепления. Кроме того, при испарении совершается работа против внешнего давления P , поскольку объем жидкости меньше объема пара. Не все молекулы жидкости способны совершить эту работу, а только те из них, которые обладают достаточной кинетической энергией. Поэтому переход части молекул в пар приводит к обеднению жидкости быстрыми молекулами, т.е. к ее охлаждению. Чтобы испарение проходило без изменения температуры, к жидкости нужно подводить тепло. Количество теплоты (энергии), необходимое для превращения единицы массы воды в пар при постоянном давлении и температуре, называют удельной теплотой испарения (парообразования). Теплоту парообразования жидкостей можно измерить непосредственно при помощи калориметра. Такой метод, однако, не позволяет получить точных результатов из-за неконтролируемых потерь

ет получить точных результатов из-за неконтролируемых потерь тепла, которые трудно сделать малыми. В настоящей работе для определения теплоты испарения применен косвенный метод, основанный на уравнении Клаузиуса – Клапейрона:

$$\frac{de_{\text{нп}}}{dT} = \frac{L}{T(u_{\text{г}} - u_{\text{ж}})}, \quad (1)$$

где $e_{\text{нп}}$ – давление насыщенного пара жидкости при данной температуре, T – абсолютная температура жидкости и пара, L – удельная теплота испарения (конденсации), $u_{\text{г}}$, $u_{\text{ж}}$ – удельные объемы газообразной и жидкой фазы.

Полученный результат показывает, что упругость насыщенного пара зависит от температуры. Эта зависимость носит название закона Клаузиуса-Клапейрона. При обычных атмосферных условиях водяной пар ведет себя как идеальный газ и $u_{\text{ж}} \ll u_{\text{г}}$. Тогда, учитывая, что согласно уравнению состояния

$$u_{\text{ж}} = R_n T / e_{\text{нп}}, \quad (2)$$

где R_n – газовая постоянная для водяного пара ($R_n = 461$ Дж/(кг К)).

С учетом (2) перепишем (1):

$$\ln \frac{e_{\text{нп}}}{e_{\text{нп}0}} = \frac{L}{R_n} \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T} \right), \quad (3)$$

где $e_{\text{нп}0}$ – упругость насыщенного пара при температуре T_0 . Отсюда получаем выражение для вычисления удельной теплоты парообразования:

$$L = \frac{R_n \ln \frac{e_{\text{нп}}}{e_{\text{нп}0}}}{\left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T} \right)}. \quad (4)$$

Выражение (4) является рабочей формулой.

3. Метод исследования и описание установки

Экспериментальная установка изображена на рис. 1.

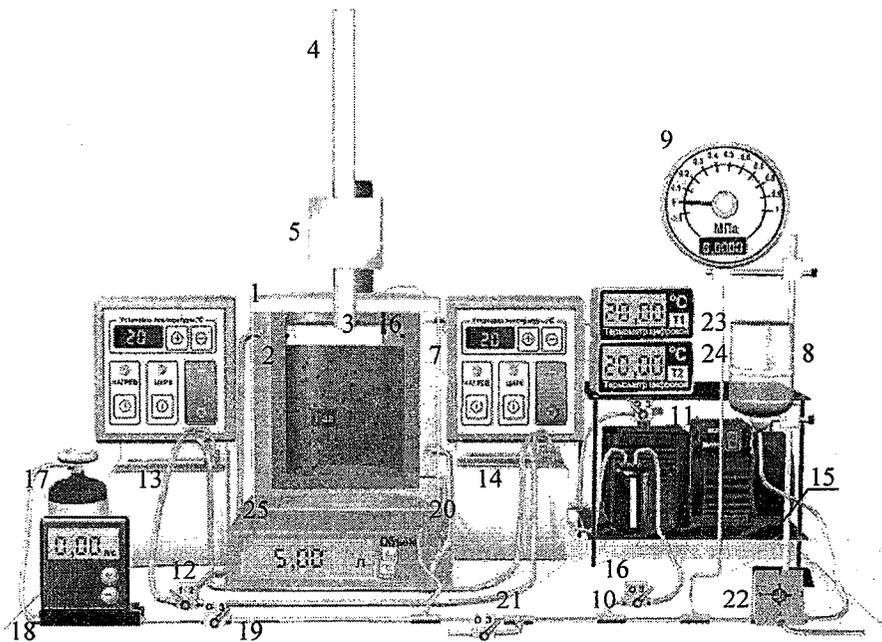


Рис.1 Схема экспериментальной установки.

Назначение и характеристика основных элементов установки.

а) **Термостатированный резервуар (1)** с заключенным в нем цилиндром (2) с поршнем (3). Посредством штока (4) и реверсивного шагового привода (5) поршень может перемещаться в цилиндре. Управляется шаговый привод пультом (25), отображающим текущий объем под поршнем. Минимальный объем цилиндра равен нулю, максимальный – 5 л.

б) **Термостаты.** Термостатирование объема осуществляется прокачиваемой водой, температура которой поддерживается термостатами (13) и (14), настроенными на поддержание низкой и высокой температуры. Выбор термостата, вода из которого в данный момент подается в объем (1), осуществляется краном (12). Каждый термостат имеет собственный пульт управления, расположенный над ним. Термостаты расположены ниже уровня цилиндра и при отключении циркуляционного насоса вода из рубашки цилиндра стекает в соответствующий термостат. Термостат может находиться в трех состояниях:

«**ВЫКЛ**» – переключатели [нагрев] и [цирк.] в положении [выключено], если в этом состоянии термостат подключен к системе краном 12, то в него стекает вода из рубашки цилиндра;

«**ВКЛ**» – переключатели [нагрев] и [цирк.] в положении [выключено], при этом на выходе термостата температура равна заданной регулятором [Установка температуры] независимо от величины температуры на входе;

«**ЦИРК.**» – переключатель [нагрев] в положении [выключено], переключатель [цирк.] в положении [выключено], при этом температура на выходе термостата равна температуре на входе. Допускается любое состояние термостата при любом положении крана (12).

в) Система заполнения цилиндра. Для заполнения или вентиляции объема цилиндра служат краны:

(21) – соединяет внутренний объем цилиндра с атмосферой;

(19) – подключает к магистрали баллон (17), содержащий углекислый газ. Давление подаваемого газа задается редуктором, который управляется с пульта (18);

(22) – кран-дозатор для подачи воды во внутренний объем цилиндра заданного количества жидкости (вода). Объем канала крана-дозатора (22) - 0,05 мл.

г) Система откачки цилиндра. Узел откачки газа состоит из форвакуумного насоса (15), кранов (10) и (11). Включение насоса осуществляется кнопкой включения (15). Состояние кранов при выключенном насосе: кран (11) открыт, кран (10) закрыт. После включения насоса сначала закрывается кран (11), затем открывается кран (10). Перед выключением насоса сначала закрывается кран (10), затем открывается кран (11), после этого выключается насос. Если выключается насос при закрытом кране (11), то при давлении в магистрали меньше атмосферного происходит выброс масла из насоса в маслоотделитель (16), в этом случае необходимо при закрытых кранах (10) и (11) на некоторое время включить насос для закачки масла обратно.

д) Контроль давления. Для контроля давления служит мановакуумметр (9). Показания прибора – относительно атмосферного давления (в мегапаскалях МПа).

е) Измерение температуры внутри цилиндра осуществляется термопарой, индикация температуры – цифровой термометр (23). Индикация температуры воды осуществляется цифровым термометром (24).

4. Порядок выполнения работы

4.1. Запустите лабораторную работу.

4.2. Определение давления насыщенных паров воды при различной температуре.

4.2.1. Установите на левом термостате температуру 10°C , включите режим **ЦИРК** и **НАГРЕВ**, краном 12 подключите левый термостат к рубашке цилиндра.

Имейте ввиду, что для того, чтобы температура внутри термостатированного объема (цилиндра) была равна температуре термостата, требуется время. Температуру внутри цилиндра отображают цифровые термометры (23) и (24). Дождитесь, пока они покажут ту же температуру, которая отображается на пульте управления термостатом (13). Для ускорения процесса установления температуры можно также воспользоваться кнопкой **ПРЫЖОК**.

4.2.2. Установите объем под поршнем 2,0 – 2,5 л. Убедитесь, что краны (21) и (19) закрыты, кран-дозатор (22) в положении «1».

4.2.3. Произведите вакуумирование рабочего объема цилиндра. Для этого включите форвакуумный насос, закройте кран (11), после этого откройте кран (10). Дождитесь, когда давление в системе перестанет понижаться (цифры на индикаторе мановакуумметра (9) перестанут изменяться). Для ускорения этого процесса нажмите на кнопку **ПРЫЖОК**. Чем больше будет шаг прыжка, тем быстрее пойдет процесс понижения давления. После установления давления закройте кран (10), откройте кран (11), выключите форвакуумный насос.

4.2.4. Откройте кран (21) на время, необходимое для уравнивания давления внутри цилиндра с атмосферным давлением. Для ускорения этого процесса также можно воспользоваться кнопкой **ПРЫЖОК**. После того, как давление выровняется, закройте кран 21.

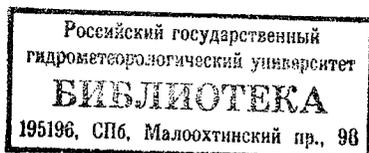
4.2.5. Переведя кран-дозатор (22) последовательно в положения «1»-«2»-«1» добавляйте порции воды в цилиндр, до тех пор, пока не наступит состояние насыщения, отображаемое крупными белыми каплями на изображении внутреннего объема цилиндра.

4.2.6. Занесите в таблицу следующие величины: давление насыщенного пара $e_{\text{нп}}$ (показания мановакуумметра (9)), температура t (показания цифровых термометров (23) и (24)).

№ опыта	$e_{\text{нп}}$, МПа (1МПа = 10^6 Па)	$e_{\text{нп}}$, Па	t , $^{\circ}\text{C}$	T, К

4.2.7. Увеличьте температуру термостата на 2°C .

4.2.8. Повторите действия 4.2.3. – 4.2.7., постепенно повышая температуру левого термостата до 22°C , каждый раз занося данные в таблицу.



5. Обработка результатов измерений

5.1. Систематические погрешности цифрового термометра, термометров на термостатах и мановакуумметра приведены в “Приложении №1”.

5.2. Постройте график зависимости $\ln \frac{e_{нт}}{e_{нт0}} = f\left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T}\right)$. В качестве $e_{нт0}$ и T_0 возьмите значения давления насыщенного пара и температуры (в градусах Кельвина), полученные в первом опыте. Обратите внимание, что в соответствии с формулой (3) зависимость должна быть линейной, типа $y = ax + b$.

5.3. Рассчитайте погрешности величин $\ln \frac{e_{нт}}{e_{нт0}}$ и $\left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T}\right)$ как погрешности косвенных измерений. Нанесите их на график.

5.4. По графику определите значение углового коэффициента прямой a и его погрешность.

5.5. Удельная теплота парообразования L определяется через угловой коэффициент a из формулы:

$$L = a \cdot R_n. \quad (5)$$

Определите погрешность L как погрешность косвенного измерения с помощью формулы (5)

5.6. По формуле (4) вычислите значение L на каждом температурном интервале.

5.7. Используя данные, полученные в п.5.6. вычислите среднее значение удельной теплоты парообразования L .

5.8. Найдите погрешность L , как погрешность прямых измерений. Систематическую погрешность определите как погрешность косвенных измерений, используя погрешности величин $\ln \frac{e_{нт}}{e_{нт0}}$ и $\left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T}\right)$, полученные в

п. 5.3. Погрешность R_n определите как погрешность физических констант.

5.9. Сравните значения L , полученные графическим способом и в результате вычислений по формуле (4).

Контрольные вопросы

1. Какой процесс называется испарением?
2. Какой процесс называется конденсацией?
3. Что происходит с температурой жидкости при испарении?
4. Какой пар называется насыщенным?

5. Что называют удельной теплотой испарения (парообразования)?
6. Какие величины связывает между собой уравнение Клаузиуса – Клапейрона ?
7. Как вычислить удельную теплоту парообразования ?

Лабораторная работа № 6

ОПРЕДЕЛЕНИЕ УДЕЛЬНОЙ ТЕПЛОЕМКОСТИ ТВЕРДОГО ТЕЛА

1. Задача работы

1.1. Определить полную и удельную теплоемкости исследуемого образца.

2. Предварительные сведения

В твердых телах атомы (молекулы) вещества образуют кристаллическую решетку, а силы, связывающие их, могут быть валентными, кулоновскими и т.д. При больших расстояниях между атомами преобладают силы притяжения, быстро убывающие с ростом расстояния между центрами соседних атомов. При сближении атомов вплотную друг к другу начинает преобладать взаимное отталкивание электронных оболочек.

При абсолютном нуле температуры атомы твердого тела должны располагаться в определенных положениях равновесия, а с ростом температуры, вследствие теплового движения, колебаться около этих положений равновесия. При этом происходит непрерывный переход кинетической энергии колебательного движения в потенциальную и обратно.

На одну колебательную степень свободы приходится средняя энергия теплового движения, равная:

$$\varepsilon = \varepsilon_{\text{кин}} + \varepsilon_{\text{пот}} = \frac{1}{2} kT + \frac{1}{2} kT = kT ,$$

где $\varepsilon_{\text{кин}}$ – кинетическая энергия колебательного движения;

$\varepsilon_{\text{пот}}$ – потенциальная энергия;

k – постоянная Больцмана ($k = 1,38 \cdot 10^{-23} \frac{\text{Дж}}{\text{К}}$);

T – абсолютная температура.

Колеблющийся атом в твердом теле обладает тремя степенями свободы перемещения в пространстве, т. е. может участвовать одновременно в колебательных движениях по трем независимым направлениям. (Число степеней свободы – это число независимых координат, определяющих положение атома или молекулы в пространстве.) Тогда для одного атома средняя энергия теплового движения:

$$\varepsilon = 3kT .$$

Поскольку все атомы кристалла взаимосвязаны, то движение одного из них вызовет движение и соседних. В результате в колебательном движении будут принимать участие все атомы решетки, и, при не слишком низкой температуре, все степени свободы будут возбуждены одинаково.

В одном моле любого вещества содержится одинаковое число атомов (молекул), которое называется числом Авогадро и равно $N_o = 6,02 \cdot 10^{23} \frac{1}{\text{моль}}$. Тогда энергия теплового движения молекул одного моля вещества составит:

$$E = 3N_o kT = 3RT,$$

где R – универсальная газовая постоянная ($R = 8,31 \frac{\text{Дж}}{\text{мольК}}$).

Для увеличения этой энергии, соответствующей увеличению температуры тела на один градус, необходимо дать телу соответствующую теплоту dQ .

Молярной теплоемкостью вещества C_μ называется величина, равная количеству теплоты, которую необходимо сообщить одному молю вещества для увеличения температуры на один градус:

$$C_\mu = \frac{dQ}{dT} = 3R \approx 25 \frac{\text{кДж}}{\text{мольК}}.$$

Это соотношение было установлено на опыте и носит название закона Дюлонга и Пти. В таком виде оно справедливо для одноатомных кристаллических решеток. Для более сложных решеток следует учитывать возможность колебаний и даже вращательных движений всех элементов решетки и внутренних движений в этих элементах.

Удельная теплоемкость связана с молярной соотношением:

$$C_\mu = C_{уд}\mu,$$

и определяет количество теплоты, необходимой для нагревания одного килограмма вещества на один градус.

Полная теплоемкость вещества C определяет количество теплоты, необходимое для нагревания тела массой m на один градус:

$$C = \frac{\delta Q}{dT}. \quad (1)$$

3. Метод исследования и описание установки

Определение теплоемкости тел обычно производится путем регистрации количества тепла δQ , полученного телом, и соответствующего изменения температуры этого тела dT .

Надежность измерения определяется в основном качеством калориметра. Необходимо, чтобы количество тепла, затрачиваемое на нагревание исследуемого тела, было существенно больше тепла, расходуемого на нагревание калориметра, и на потери, связанные с утечкой тепла из установки. При измерении теплоемкости твердых тел стараются или обеспечить как можно более полную теплоизоляцию тела от окружающей среды, или наоборот, не принимая специальных мер к теплоизоляции, учитывают при расчете потери тепла в окружающее пространство.

При использовании электрических нагревателей количество теплоты, выделяющееся в них и затем переданное телам, можно рассчитать по закону Джоуля - Ленца:

$$Q = RI^2t, \quad (2)$$

где R – сопротивление проводника (нагревателя); I – сила тока; t – время. Используя закон Ома для участка цепи:

$$I = \frac{U}{R},$$

преобразуем формулу (2):

$$Q = UIt, \quad (3)$$

где U – напряжение.

Мощность электрического тока:

$$P = UI. \quad (4)$$

Данная работа проводится на стандартном лабораторном оборудовании и предполагает при расчетах учет потерь тепла. Рассмотрим тепловой баланс установки при нагреве. В любой момент времени количество теплоты, поступившее от электронагревателя $Q_{нагр}$, идет на нагрев установки $C \cdot \Delta T$ и на излучение в окружающую среду $Q_{потерь}$:

$$Q_{нагр} = C\Delta T + Q_{потерь}. \quad (5)$$

Прямое определение величин в уравнении (5) в начальный момент времени невозможно, но подлежит косвенному вычислению. Для этого преобразуем (5), используя выражение (3) и (4):

$$P\tau = C\Delta T + Q_{потерь},$$

где τ – интервал времени;

$$P = \frac{C\Delta T}{\tau} + \frac{Q_{\text{потерь}}}{\tau};$$

$$UI = \frac{C\Delta T}{\tau} + \frac{Q_{\text{потерь}}}{\tau}.$$

Величина $Q_{\text{потерь}}$ пропорциональна разнице температур между печью и окружающим воздухом, и тогда $\frac{Q_{\text{потерь}}}{\tau}$ может быть принята равной нулю в начальный момент времени. В этом случае полная теплоемкость:

$$C = \frac{UI}{\Delta T}.$$

Обозначив отношение $\frac{\Delta T}{\tau}$ за y , получим рабочую формулу для определения полной теплоемкости:

$$C = \frac{UI}{y}. \quad (6)$$

Величину y в начальный момент времени можно определить по графику линейной зависимости $\ln y = f(\tau)$.

Для того, чтобы найти теплоемкость исследуемого тела C , необходимо определить собственную теплоемкость печи $C_{\text{п}}$ и суммарную теплоемкость печи и тела C^l . Тогда:

$$C = C^l - C_{\text{п}}. \quad (7)$$

Удельная теплоемкость:

$$C_{\text{уд}} = \frac{C}{m}, \quad (8)$$

где m – масса образца.

Схема установки изображена на рис. 1, где: 1 – муфельная печь; 2 – электронагреватель; 3 – вентилятор обдува; 4 – термопара; 5 – цифровой термометр; 9 – регулируемый источник питания; 7 – выключатель нагрева; 6 – таймер.

Вентилятор обдува (3) предназначен для равномерного распределения тепла внутри печи. Электронагреватель (2) подключен к регулируемому источнику питания постоянного тока (9), контроль напряжения и тока осуществляется вольтметром и амперметром, входящими в источник питания. Для измерения температуры воздуха служит термопара (4), подключенная к цифровому термометру (5).

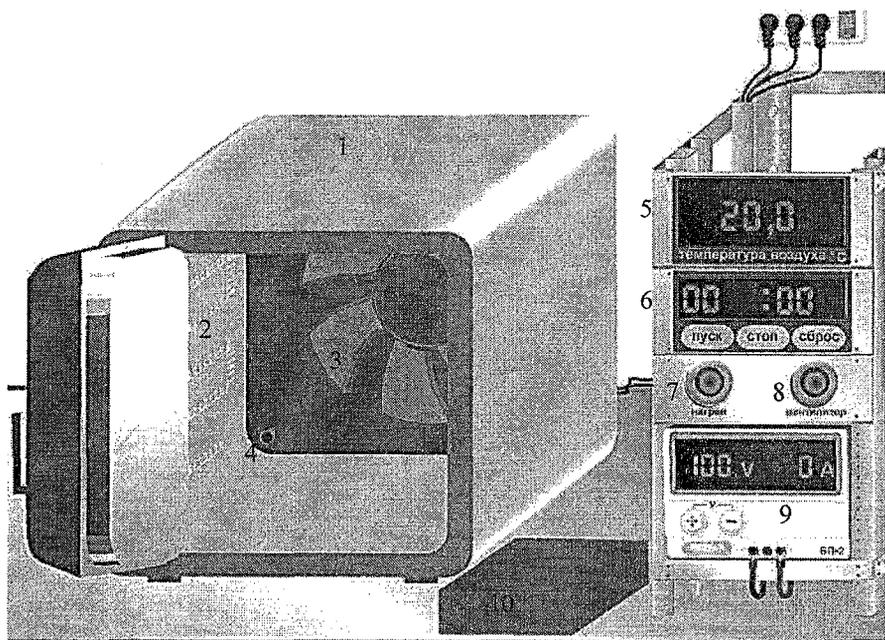


Рис. 1. Схема установки

4. Порядок выполнения работы

4.1. Запишите в рабочую тетрадь характеристики (масса и материал) полученного образца. Запустите лабораторную работу. Включите питание лабораторного стенда (верхняя правая клавиша).

4.2. Включите источник питания (9) (кнопка **power**). Установите напряжение 100 В, нажимая левой клавишей мыши на + или –.

4.3. Включите вентилятор обдува (кнопка **вентилятор**).

4.4. Не помещая исследуемый образец в печь, закройте дверцу. Для закрывания/открывания дверцы надо нажать на нее левой кнопкой мыши. Начальная температура принимается равной $T_0 = 20^\circ\text{C}$. Включите нагрев и сразу запустите секундомер. Нагрев печи включается кнопкой **нагрев**, запуск секундомера – кнопкой **пуск** на пульте (6).

4.5. Через каждые 30 секунд записывайте в таблицу 1 значения температуры T с точностью до 0,1 °С (пульс 5). Запишите значения напряжения U и силы тока I .

Таблица 1

Без исследуемого тела						
№	τ , мин	τ , с	T , (°С)	$T_n - T_m$	y	$\ln y$
	—	—	20	—	—	—
1.	30 с	30				
2.	1м 00с	60				
3.	1м 30с	90				
4.	2м 00с	120				
5.	2м 30с	150				
6.	3м 00с	180				

4.6. Выключите нагрев (нажатие левой клавишей мыши на кнопку **нагрев**) и откройте дверцу печи (для ускорения остывания). Для ускорения процесса можно нажать “скачок по времени”. Дождитесь остывания печи до температуры 20 (°С). Обнулите таймер (кнопка **сброс**).

4.7. Поместите исследуемый образец в печь. Для внесения/убирания образца надо нажать на него левой кнопкой мыши при открытой дверце печи.

4.8. Повторите измерения по п.п. 4.2. – 4.4. (Рекомендуемые напряжения – 200 В для кирпича и 150 В для металлов). Занесите показания в таблицу 2.

Таблица 2

С исследуемым телом						
№	τ , мин	τ , с	T , (°С)	$T_n - T_m$	y	$\ln y$
	—	—	20	—	—	—
1.	30 с	30				
2.	1м 00с	60				
3.	1м 30с	90				
4.	2м 00с	120				
5.	2м 30с	150				
6.	3м 00с	180				

5. Обработка результатов измерений

5.1. Рассчитайте погрешности прямых измерений. Систематические погрешности вольтметра, амперметра, секундомера и термометра приведены в “Приложении №1”.

5.2. По результатам измерений для каждого интервала времени τ (30 с) рассчитайте соответствующее изменение температуры $T_n - T_m$ ($T_1 - T_0, T_2 - T_1$, и т.д.); значения $y = \frac{T_n - T_m}{\tau}$; $\ln y$ и впишите их в таблицу 1.

5.3. Постройте график зависимости $\ln y = f(\tau)$. (Значения τ должны быть отложены в секундах). Значения $\ln y$ надо располагать посередине временного интервала измерения (то есть, если измерения проводились через 30 с, то значение $\ln y$, посчитанное на интервале $0 \div 30$ с соответствует времени 15 с, на интервале $30 \div 60$ с – 45 с и т. д.).

5.4. Продолжите прямую до ее пересечения с осью ординат и определите значение $b = \ln y_0$ при $\tau = 0$. Вычислите значение y_0 по формуле:

$$y_0 = e^b.$$

5.5. Рассчитайте собственную теплоемкость печи $C_{\text{П}}$ по формуле (6).

5.6. Повторите вычисления по п.п. 5.2. – 5.5. с исследуемым телом, получив в итоге суммарную теплоемкость печи и образца C^I .

5.7. Рассчитайте полную и удельную теплоемкости исследуемого образца по формулам (7) и (8). Найдите их погрешности как результат косвенного измерения. Сравните полученные значения с табличными данными.

Контрольные вопросы

1. Дайте определение полной и удельной теплоемкости. В каких единицах СИ они измеряются?
2. Чему равна средняя кинетическая энергия одного атома?
3. Как определяется число степеней свободы?
4. Что показывает число Авогадро?
5. Запишите закон Дюлонга и Пти.
6. Для каких кристаллов справедлив закон Дюлонга – Пти?
7. Каким образом можно рассчитать собственную теплоемкость печи?

Лабораторная работа № 7

ОПРЕДЕЛЕНИЕ УДЕЛЬНОЙ ТЕПЛОЕМКОСТИ ГАЗА ПРИ ПОСТОЯННОМ ДАВЛЕНИИ МЕТОДОМ ПРОТОЧНОГО НАГРЕВА

1. Задачи работы

1.1. Измерение повышения температуры газа в результате подвода тепла при стационарном течении через нагревательный элемент.

1.2. Вычисление по результатам измерений удельной теплоемкости газа при постоянном давлении.

2. Предварительные сведения

Полная теплоемкость вещества C определяет количество теплоты, необходимое для нагревания тела массой m на один градус:

$$C = \frac{\delta Q}{dT}.$$

Удельной теплоемкостью вещества $C_{уд}$ называется величина, равная количеству теплоты, которую необходимо сообщить одному килограмму вещества для увеличения ее температуры на один градус:

$$C_{уд} = \frac{\delta Q}{m\Delta T}. \quad (1)$$

Молярная теплоемкость C показывает количество теплоты, которую надо сообщить одному молю газа для его нагревания на один градус:

$$C_{\mu} = \frac{\delta Q}{\Delta T}, \quad (2)$$

где $\nu = \frac{m}{\mu}$ – количество вещества, m – масса газа, μ – его молярная масса.

Молярная и удельная теплоемкости связаны соотношением:

$$C = C_{уд}\mu, \quad (3)$$

Согласно первому началу термодинамики количество теплоты δQ , подводимое к газу, может расходоваться на увеличение внутренней энергии газа ΔU и на совершение работы при расширении газа δA :

$$\delta Q = \Delta U + \delta A. \quad (4)$$

Увеличение внутренней энергии ΔU идеального газа в случае изменения его температуры на ΔT рассчитывается по формуле:

$$\Delta U = \frac{i}{2} \nu R \Delta T, \quad (5)$$

где: R – универсальная газовая постоянная; $R = 8,31$ Дж/(моль·К); i – число степеней свободы.

Число степеней свободы i – это число независимых координат, определяющих положение молекулы в пространстве: $i = 3$ – для одноатомной; $i = 5$ – для двухатомной; $i = 6$ – для трех- и многоатомной молекулы.

При расширении газа система выполняет работу:

$$\delta A = p dV.$$

Величина теплоемкости зависит от того, при каких условиях нагревался газ. Рассмотрим процесс нагревания газа при различных условиях.

1. Изотермический процесс, протекающий при постоянной температуре системы ($T = \text{const}$, $\Delta T = 0$, $pV = \text{const}$). Сообщенное газу количество теплоты пойдет только на совершение газом работы. Молярная теплоемкость при постоянной температуре:

$$C_T = \frac{\delta Q}{\Delta T} = \infty.$$

2. Адиабатный процесс, протекающий без теплообмена системы с окружающей средой, $\delta Q = 0$. В этом случае молярная теплоемкость:

$$C_Q = \frac{\delta Q}{\Delta T} = 0.$$

На практике и в природе адиабатными процессами являются процессы, которые протекают очень быстро и теплообмен с окружающей средой не успевает произойти.

3. Изохорный процесс, протекающий при постоянном объеме системы $V = \text{const}$. В этом случае работа по расширению газа отсутствует ($\delta A = p dV = 0$) и $\delta Q = \Delta U$. Молярная теплоемкость газа при постоянном объеме C_V :

$$C_V = \frac{\delta Q}{\Delta T} = \frac{\Delta U}{\Delta T} = \frac{i}{2} R. \quad (6)$$

4. Изобарный процесс, протекающий при постоянном давлении системы $P = \text{const}$. Если поддерживать постоянное давление, то сообщенное газу количество теплоты будет тратиться на увеличение внутренней энергии и на совершение работы:

$$\delta Q = \Delta U + \delta A,$$

тогда молярная теплоемкость газа при постоянном давлении C_P :

$$C_P = \frac{\delta Q}{\Delta T} = \frac{\Delta U}{\Delta T} + \frac{\delta A}{\Delta T}. \quad (7)$$

Для изобарного процесса работа газа:

$$\delta A = p \Delta V. \quad (8)$$

Используя уравнение состояния идеального газа (уравнение Менделеева – Клапейрона) $pV = \nu RT$, преобразуем выражение (8):

$$\delta A = pV_2 - pV_1 = \nu RT_2 - \nu RT_1 = \nu R \Delta T.$$

Тогда отношение $\frac{\delta A}{\Delta T}$ в уравнении (7) равно R . Таким образом, работа расширения 1 моля любого идеального газа при нагревании его на 1 К при постоянном давлении одинакова и равна *универсальной газовой постоянной* R . В этом заключается физический смысл этой постоянной.

Исходя из того, что отношение $\frac{\Delta U}{\Delta T}$ в уравнении (6) равно C_V , окончательно можно записать:

$$C_p = C_V + R.$$

Это уравнение называется законом Майера.

Учитывая, что $C_V = \frac{i}{2} R$, и, разделив C_p на C_V , получим

$$\gamma = \frac{C_p}{C_V} = \frac{i+2}{2} R. \quad (9)$$

Величина γ называется показателем адиабаты или коэффициентом Пуассона. Как видно, γ для любого газа зависит только от числа степеней свободы его молекул.

3. Метод исследования и описание установки

Определение теплоемкости тел обычно производится путем регистрации количества тепла δQ , полученного телом, и соответствующего изменения температуры этого тела dT .

Надежность измерения определяется в основном качеством калориметра. Необходимо, чтобы количество тепла, затрачиваемое на нагревание исследуемого тела, было существенно больше тепла, расходуемого на нагревание калориметра, и на потери, связанные с утечкой тепла из установки. При измерении теплоемкости газа эти требования выполнить очень трудно, так как масса газа, заключенного в калориметре, и, следовательно, количество тепла, идущее на его нагревание, очень малы. Чтобы увеличить количество газа при неизменных размерах установки, необходимо продувать газ сквозь калориметр (теплоизолированную трубку), внутри которого установлен нагреватель. При этом можно измерить количество тепла, отдаваемое

нагревателем, количество протекающего воздуха и изменение его температуры.

Сразу после включения нагревателя, значительная часть его мощности расходуется на нагревание калориметра. Через некоторое время распределение температур устанавливается, и мощность затрачивается только на нагревание газа и на потери, связанные главным образом с теплопроводностью стенок.

При определенных скоростях протекания газа можно пренебречь перепадом давления по длине трубки, т.е. считается, что газ равномерно распределен по всему объему. Тогда можно принять, что все тепло Q , выделяемое нагревателем, идет на изменение температуры газа T^l (перепад температур) и на тепловой поток через стенки калориметра Δq :

$$Q = C_p \cdot m \cdot T^l + \Delta q,$$

где C_p – удельная теплоемкость при постоянном давлении; m – масса газа.

При использовании электрических нагревателей количество теплоты, выделяющееся в них и затем переданное телам, можно рассчитать по закону Джоуля - Ленца:

$$Q = RI^2 \Delta t,$$

где R – сопротивление проводника (нагревателя); I – сила тока; Δt – время.

Используя закон Ома для участка цепи:

$$I = \frac{U}{R},$$

получаем:

$$Q = UI \Delta t = P \Delta t,$$

где U – напряжение. P – мощность электрического тока (электронагревателя).

Тогда:

$$P = c_p \cdot m \frac{T^l}{\Delta t} + \frac{\Delta q}{\Delta t}. \quad (10)$$

Масса газа, прошедшего через калориметр за время Δt , определяется по формуле:

$$m = \frac{u \cdot \Delta t \cdot \mu}{22.4}, \quad (11)$$

а за 1 секунду:

$$m = \frac{u \cdot \mu}{22.4}, \quad (12)$$

где: u – расход газа; μ – молярная масса газа.

Подставив формулу (11) в формулу (10), и учитывая (12), окончательно получаем:

$$P = C_p \cdot m \cdot T' + \Delta q.$$

Это выражение является линейной зависимостью мощности P от произведения $m \cdot T'$ с угловым коэффициентом C_p .

Схема установки изображена на рис. 1.

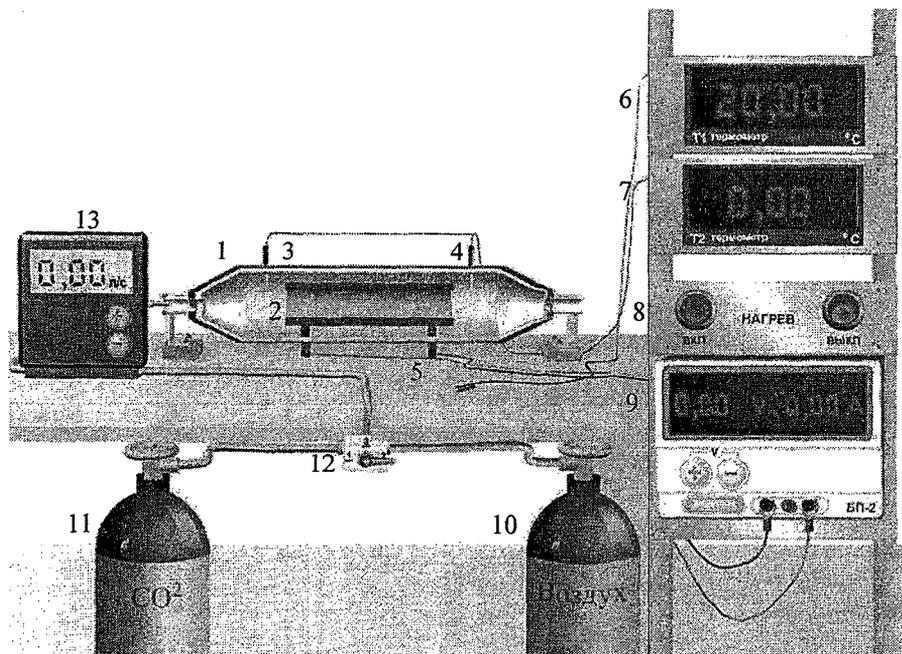


Рис. 1.

1 – теплоизолированная трубка; 2 – электронагреватель; 3 и 4 – термопары; 5 – термопара для измерения температуры воздуха; 6 – цифровой термометр; 7 – термометр – индикатор перепада температуры газа; 8 – пульт подачи напряжения на нагреватель; 9 – источник питания постоянного тока; 10 и 11 – газовые баллоны (воздух и углекислый газ); 12 – кран подачи газа; 13 – электронный регулятор расхода газа.

В процессе работы электронагреватель (2) обдувается проходящим через трубку газом и равномерно нагревает его. Длина трубки составляет

20 см, ее внутренний диаметр 3 см. Электронагреватель (2) подключен к регулируемому источнику питания постоянного тока (9). В цепь нагревателя включены амперметр и вольтметр. В качестве нагревателя используется остеклованный резистор ПЭВ – 25 сопротивлением 10 Ом при 20 °С. Температурный коэффициент сопротивления $2 \cdot 10^{-4}$ Ом/град.

Значение коэффициента теплоотдачи нагревателя (количество теплоты, передаваемое через стенку трубки на единицу площади за единицу времени) задается преподавателем при назначении работы и может принимать значения от 0,01 (потерь практически нет) до 2 Вт/м² (при такой теплопередаче нагреватель меняет температуру газа примерно на 5 °С при максимальной мощности и максимальной скорости потока).

Для измерения перепада температуры газа до и после нагревателя служат термодпары (3) и (4). Результат измерения отображается на табло цифрового термометра (7). Для измерения температуры воздуха используется термодпара (5), для индикации температуры – цифровой термометр (6). Диапазон индикации температуры составляет 0 ÷ 200 °С.

Пульт подачи напряжения на нагреватель (8) позволяет подключать/отключать ток в цепи, не выключая источник питания. Индикацией включения нагрева является окрашивание в красный цвет изображения нагревателя внутри калориметра.

Блок питания (9) позволяет регулировать напряжение, подаваемое на нагреватель, в пределах от 0 до 20 В и обеспечивает силу тока до 2,0 А. Шаг установки напряжения – 0,05 В.

Система подачи газа состоит из баллонов с газом (10) и (11), крана (12) и электронного регулятора расхода (13). Объем газа, прошедшего через нагреватель, измеряется электронным регулятором расхода (13), который регулирует подачу газа. Максимальный объем подаваемого газа составляет 2 л/с (шаг – 0,1 л/с). Краном (12) выбирается тип подаваемого в систему газа (СО₂ или воздух). Газ поступает в трубку (1) при температуре окружающего воздуха и атмосферном давлении.

4. Порядок выполнения работы

4.1. Запустите лабораторную работу. Все действия с приборами осуществляются нажатием левой клавишей мыши.

4.2. Подключите к калориметру газовый баллон с газом, указанным преподавателем. Для переключения крана подачи газа (12) следует щелкнуть по нему мышью. Положение «1» – баллон с углекислым газом, положение «2» – баллон с воздухом.

4.3. На электронном регуляторе (13) установите минимальный расход газа 0,1 л/с. Увеличение и уменьшение расхода осуществляется кнопками «+» и «-».

4.4. Включите источник питания (9) (кнопка **POWER**). Установите значение напряжения $7 \div 11$ В по своему усмотрению (кнопки «+» и «-»).

4.5. Включите нагрев кнопкой **ВКЛ** на пульте (8). Дождитесь установления постоянного перепада температуры на пульте (7). Для ускорения процесса воспользуйтесь "скачком по времени" на панели управления.

4.6. Запишите значения расхода газа, напряжения, силы тока и перепада температуры в таблицу.

4.7. Увеличьте напряжение на 1 В. Затем, изменяя расход газа, добейтесь такого перепада температуры, чтобы разброс показаний термометра не превышал $0,2 \text{ }^\circ\text{C}$ по сравнению с первым измерением. Если разброс превышает это значение, добейтесь нужного результата изменением напряжения. Запишите полученные значения в таблицу.

4.8. Повторите измерения по п. 4.7. несколько раз. Всего надо выполнить 6 измерений.

Таблица

№	$U, \text{ В}$	$I, \text{ А}$	$u, \text{ л/с}$	$T', \text{ }^\circ\text{C}$	$m, \text{ кг}$	$P, \text{ Вт}$	X
1.							
2.							
...							

5. Обработка результатов измерений

5.1. Рассчитайте погрешности прямых измерений. Систематические погрешности вольтметра, амперметра и термометра приведены в "Приложении №1".

5.2. По формуле (12) вычислите массу газа, протекающего через калориметр за одну секунду, для каждого расхода газа u и перепада температур T .

(Молярная масса воздуха $\mu = 29 \cdot 10^{-3}$ кг/моль, $\text{CO}_2 - \mu = 44 \cdot 10^{-3}$ кг/моль).

5.3. Рассчитайте произведения массы на перепад температур:

$$X = m \cdot T'$$

5.4. Вычислите мощности нагревателя по формуле $P = UI$.

5.5. Постройте график зависимости $P = f(X)$. Определите угловой коэффициент a и его абсолютную погрешность Δa . Учитывая, что $a = C_p$, запишите окончательный результат.

Контрольные вопросы

1. Сформулируйте первое начало термодинамики.
2. Что такое C_p и C_v ?
3. Что больше C_p и C_v ?
4. От чего зависят C_p и C_v ?
5. Сформулируйте теорему Майера.
6. Дайте определение полной и удельной теплоемкости. В каких единицах СИ они измеряются?
7. Запишите закон Джоуля – Ленца и закон Ома для участка цепи.
8. Напишите формулу расчета массы газа, прошедшего через калориметр за время Δt .
9. Каким образом можно обеспечить надежность измерения теплоемкости?

Лабораторная работа № 8

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЯ АДИАБАТЫ ПРИ АДИАБАТИЧЕСКОМ РАСШИРЕНИИ ГАЗА

1. Задачи работы

1.1. Определение показателя адиабаты γ – отношения молярной теплоемкости воздуха при постоянном давлении C_p к молярной теплоемкости при постоянном объеме C_v .

2. Предварительные сведения

См. соответствующий раздел в работе № 7.

3. Метод исследования и описание установки

Метод определения показателя адиабаты основывается на изучении параметров некоторой массы газа, переходящей из одного состояния в другое двумя последовательными процессами – адиабатным и изохорным. Эти процессы на диаграмме $P - V$ (Рис. 1) изображены кривыми, соответственно, 1 – 2 и 2 – 3.

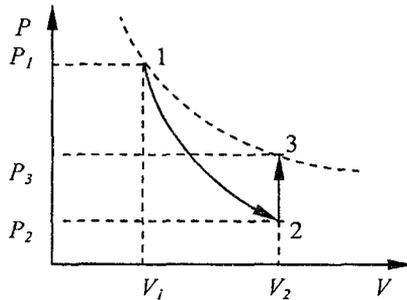


Рис. 1.

Если в баллон, соединенный с открытым водяным манометром, накачать воздух и подождать до установления теплового равновесия с окружающей средой, то в этом начальном состоянии 1 газ имеет параметры P_1, V_1, T_1 ,

причем температура газа в баллоне равна температуре окружающей среды $T_1 = T_0$, а давление $P_1 = P_0 + P'$ немного больше атмосферного.

Если теперь на короткое время соединить баллон с атмосферой, то произойдет адиабатное расширение воздуха. При этом воздух в баллоне перейдет в состояние 2, его давление понизится до атмосферного $P_2 = P_0$. Масса воздуха, оставшегося в баллоне, которая в состоянии 1 занимала часть объема баллона, расширяясь, займет весь объем V_2 . При этом температура воздуха, оставшегося в баллоне, понизится до T_2 . Поскольку процесс 1 - 2 - адиабатный, к нему можно применить уравнение Пуассона:

$$P_1 V_1^\gamma = P_2 V_2^\gamma, \quad \text{или} \quad \frac{T_1^\gamma}{P_1^{\gamma-1}} = \frac{T_2^\gamma}{P_2^{\gamma-1}}.$$

Отсюда:

$$\left(\frac{P_0 + P'}{P_0} \right)^{\gamma-1} = \left(\frac{T_0}{T_2} \right)^\gamma. \quad (1)$$

После кратковременного соединения баллона с атмосферой охлажденный из-за адиабатного расширения воздух в баллоне будет нагреваться (процесс 2 - 3) до температуры окружающей среды $T_3 = T_0$ при постоянном объеме $V_3 = V_2$. При этом давление в баллоне поднимется до $P_3 = P_2 + P$. Поскольку процесс 2 - 3 - изохорный, к нему можно применить закон Шарля:

$$\frac{P_2}{T_2} = \frac{P_3}{T_3},$$

отсюда:

$$\frac{P_0 + P''}{P_0} = \frac{T_0}{T_2}. \quad (2)$$

Из уравнений (1) и (2) получим:

$$\left(\frac{P_0 + P'}{P_0} \right)^{\gamma-1} = \left(\frac{P_0 + P''}{P_0} \right)^\gamma.$$

Прологарифмируем:

$$(\gamma-1) \ln \left(1 + \frac{P'}{P_0} \right) = \gamma \ln \left(1 + \frac{P''}{P_0} \right).$$

Поскольку избыточные давления P' и P'' очень малы по сравнению с атмосферным давлением P_0 и, учитывая, что для натуральных логарифмов $\ln(1+x) \approx x$ при $x \ll 1$, будем иметь:

$$(\gamma - 1)P' = \gamma P'' ,$$

откуда:

$$\gamma = \frac{P'}{P' + P''} . \quad (3)$$

Избыточные давления P' и P'' измеряют с помощью U-образного манометра по разности уровней жидкости с плотностью ρ :

$$P' = \rho g H ; \quad P'' = \rho g h . \quad (4)$$

Из (3) и (4) получим расчетную формулу для определения показателя адиабаты γ :

$$\gamma = \frac{H}{H - h} . \quad (5)$$

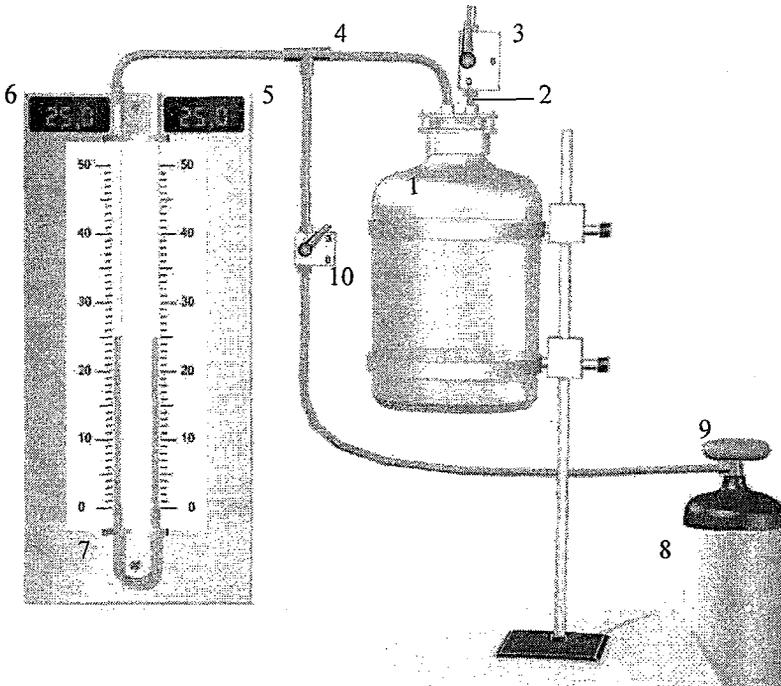


Рис. 2. Экспериментальная установка

Экспериментальная установка показана на рис. 2. Она состоит из толстостенного сосуда (1), манометра (7) и баллона со сжатым воздухом (8). Через пробку сосуда (1) проходят две трубки. Первая (2) снабжена краном (3). Вторая (4), соединяет внутренний объем сосуда с манометром и краном (10), через который из баллона (8) в систему может подаваться сжатый газ. Кран (3) соединяет внутренний объем сосуда с атмосферой, и по умолчанию находится в закрытом состоянии (положение «3»). Высота левого и правого колена манометра составляет 50 см. Для считывания показаний высота жидкости в коленах манометра отображается на цифровых табло (5) и (6). Баллон (8) содержит сжатый воздух и подключен к системе через редуктор (9), настроенный на давление 0,03 бар (относительно атмосферного давления). Кран (10) подключает баллон (8) к системе и имеет два положения: «0» – открыт, «3» – закрыт.

4. Порядок выполнения работы

4.1. Запустите лабораторную работу.

4.2. Откройте кран (10). Открытие и закрытие крана осуществляется нажатием левой клавишей мыши. При достижении максимального уровня жидкости в правом колене манометра закройте кран.

4.3. Дождитесь в течение нескольких минут установления уровней жидкостей в манометре. Запишите в таблицу разность уровней H в правом и левом колене манометра по показаниям цифровых датчиков (5) и (6).

4.4. Откройте на короткое время кран (3). Для переключения крана (3) следует нажать на него один раз левой клавишей мыши. Тогда кран на короткое время откроется и снова перейдет в закрытое состояние, противоположное предыдущему. Выждите несколько минут, пока уровни жидкости в манометре не перестанут изменяться. Запишите в таблицу разность уровней h в манометре.

4.5. Несколько раз откройте кран (3), чтобы выпустить излишки воздуха из сосуда.

4.6. Повторите измерения по пунктам 4.2 – 4.5 не менее 5 раз при различных значениях величины H и занесите их в таблицу.

Таблица

№ опыта	H , см	h , см	γ

5. Обработка результатов измерений

5.1. Произведите расчет абсолютных погрешностей величин H и h , как погрешности прямых измерений. Предел погрешности линейки 1 мм.

5.2. Для каждого измеренного значения H и h вычислите значение показателя адиабаты γ по формуле (5).

5.3. Рассчитайте среднее значение γ . Погрешность γ найдите по методике получения погрешностей результатов косвенного наблюдения для значения γ , наиболее близкого к среднему.

Контрольные вопросы

1. Сформулируйте первый закон термодинамики. Как применяется этот закон для изобарного, изохорного, изотермического и адиабатного процессов.

2. Дайте определение удельной и молярной теплоемкости. В каких единицах СИ они измеряются?

3. Запишите закон Майера. Объясните, почему молярная теплоемкость при постоянном давлении отличается от молярной теплоемкости при постоянном объеме.

4. Каков физический смысл универсальной газовой постоянной?

5. Что является числом степеней свободы? Чему оно равно для одно-, двух- и трехатомного идеальных газов?

6. Как на практике осуществить адиабатный процесс?

7. Чему равна молярная теплоемкость при адиабатическом процессе?

Лабораторная работа № 9

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЯ АДИАБАТЫ ПО СКОРОСТИ ЗВУКА В ГАЗЕ

1. Задачи работы

1.1. Измерение частоты колебаний и длины волны при резонансе звуковых колебаний в газе, заполняющем трубу.

1.2. Определение показателя адиабаты с помощью уравнения состояния идеального газа.

2. Предварительные сведения

2.1. Скорость распространения звуковой волны в газах.

Рассмотрим случай, когда какой-либо точке вещества (твёрдого тела, жидкости, газа) сообщено периодическое движение. Это можно представить себе следующим образом.

Пусть возмущающее внешнее воздействие на некоторую точку вещества имеет характер одинаковых коротких импульсов, повторяющихся через равные промежутки времени. Каждый импульс будет распространяться в веществе с некоторой скоростью, определяемой свойствами вещества. В результате каждая точка вещества будет совершать движения, определяемые последовательностью распространяющихся в веществе импульсов. Эти движения будут повторяться через одинаковые промежутки времени, равные промежуткам между действием возмущающих импульсов. После достаточно длительного действия такого периодического возмущения все точки вещества станут совершать периодические движения с частотой, равной частоте возмущающего воздействия. Такие движения принадлежат к типу продольных, упругих волн. (Продольной волной называется волна, направление движения которой совпадает с направлением колебаний, вызывающее возникновение этой волны).

Одним из типов упругих волн являются звуковые волны. Принято считать, что звуковые волны – это волны, которые человеческое ухо воспринимает в виде звуковых ощущений. Колебания источника, создающие эти волны (и как следствие колебания среды), лежат в пределах примерно от 20 до 20000 Гц.

Звуковая волна представляет собой последовательные сжатия и разрежения газа, распространяющиеся со скоростью, зависящей от свойств газа.

При быстром сжатии газа в каких-то его областях происходит повышение давления (следовательно, и температуры) в областях, где распространяется импульс сжатия. Выделяющееся при этом тепло не успевает распространиться в соседние объемы. Сжатие газа без отвода тепла носит название *адиабатического сжатия*, при котором связь между объемом и давлением дается соотношением, называемое уравнением Пуассона:

$$pV^\gamma = \text{const},$$

где p – давление газа, V – его объем, γ – показатель адиабаты (более подробно см. раздел “Предварительные сведения” лабораторной работы № 7).

При выводе формулы скорости распространения звука в газах используется так же уравнение состояния идеального состояния газа (уравнение Менделеева-Клапейрона):

$$pV = \frac{m}{\mu} RT,$$

где m – масса газа, R – универсальная газовая постоянная, μ – молярная масса, T – абсолютная температура.

Теория волновых процессов дает следующую зависимость скорости распространения звуковой волны u от параметров газа:

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

откуда показатель адиабаты:

$$\gamma = \frac{\mu \cdot u^2}{RT}. \quad (1)$$

2.2. Стоячая волна. Условия резонанса в трубе с газом.

Если возбудить звуковые колебания газа в трубе, то на границе газа с торцом произойдет отражение падающей волны. Падающая и отраженная волна будут налагаться друг на друга. С учетом того, что отражения волн от торцов многократны, результирующие звуковые колебания очень сложны. Однако картина наложений волн упрощается, если длина трубы L равна целому числу полуволи:

$$L = \frac{\lambda}{2} k, \quad (2)$$

где λ – длина волны (длиной волны называется расстояние, на которое распространяется волна за время, равное периоду колебаний),

$$k = 0, 1, 2, 3 \dots$$

В этом случае волна, отраженная от торца трубы, совпадает по фазе с падающей. Совпадающие по фазе волны усиливают друг друга, возникает

стоячая волна. Амплитуда звуковых колебаний при этом резко возрастает – наступает резонанс. Стоячей волной является волна, образующаяся в результате наложения двух волн, которые распространяются навстречу друг другу, и имеют одинаковые частоты и амплитуды.

Графически возникновение стоячей волны показано на рис. 1.

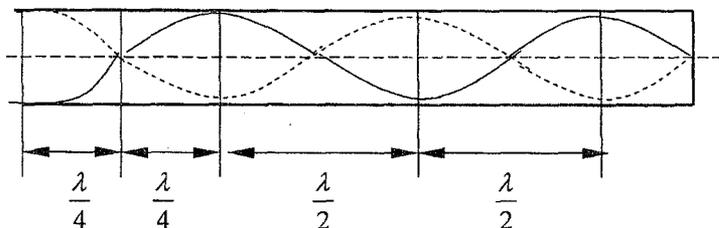


Рис. 1.

— — — — — прямая волна; - - - - - отраженная волна.

Во всех точках, для которых расстояние от источника волн равно целому числу полуволин (четному числу четвертей длины волны), амплитуда колебаний достигает максимума. Эти точки называются пучностями стоячей волны.

Напротив, во всех точках, для которых расстояние от источника равно нечетному числу четвертей длины волны, амплитуда колебаний падает до нуля. Эти точки называются узлами стоячей волны.

3. Метод исследования и описание установки

Подбор условий, при которых возникает резонанс, можно осуществить изменением частоты звуковых колебаний при постоянной длине трубы.

Собственные частоты колебаний связаны с длиной волны:

$$\nu_k = \frac{u}{\lambda_k},$$

или, используя формулу (2):

$$\nu_k = \frac{u}{2L} k. \quad (3)$$

При возбуждении звуковых колебаний столба газа на некоторых частотах в эксперименте слышно довольно сильное звучание. Если несколько увеличить или уменьшить частоту, то звучание ослабнет. Очевидно, что наиболее громкое звучание воздушного столба наступает, когда частота колебаний совпадает с одной из собственных частот колебаний, задаваемых форму-

лой (3).

Зависимость резонансной частоты от номера резонанса $\nu_k = f(k)$ является линейной с угловым коэффициентом:

$$a = \frac{u}{2L},$$

отсюда скорость звука в газе:

$$u = 2L \cdot a. \quad (4)$$

Экспериментальная установка изображена на рис. 2.

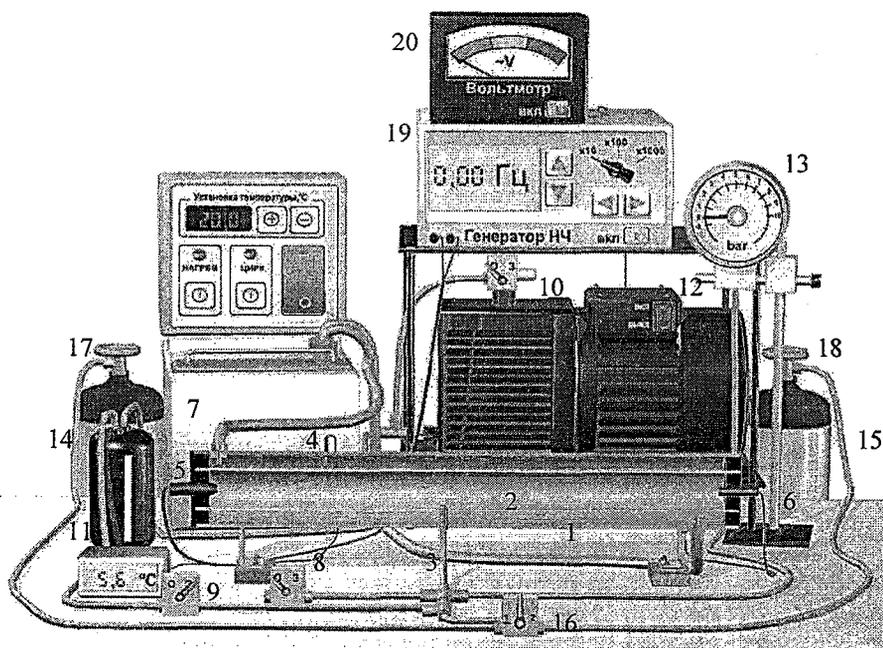


Рис. 2.

1 – герметичная трубка; 2 – водяная рубашка трубы; 3 – магистраль; 4 – термопара; 5 – телефон; 6 – микрофон; 7 – термостат; 8 – кран для уравнивания внутреннего давления с атмосферным; 9, 10 – краны для подключения системы откачки к магистрали; 11 – ресивер-маслоотделитель; 12 – форвакуумный насос; 13 – мановакуумметр; 14, 15 – баллоны с углекислым газом и воздухом; 16 – кран для подачи газа во внутренний объем сосуда; 17, 18 – редукторы; 19 – генератор звуковой частоты; 20 – вольтметр переменного тока.

Теплоизолированная труба (1) содержит водяную рубашку (2), по которой циркулирует вода, поддерживая температуру, заданную термостатом (7). В торцах трубы (1) находятся излучающий капсюль (телефон) (5) и микрофон (6). Для заполнения внутреннего объема трубы воздухом или углекислым газом служит тонкая трубка (3), соединяющая трубу с манометром (13), заправочными баллонами (14) и (15) через кран (16), форвакуумным насосом (12). Через кран (8) внутренний объем трубы может быть соединен с атмосферой.

Термостат управляется пультом (7), который содержит датчик температуры (в °С), переключатели **НАГРЕВ** и **ЦИРК**. Переключатель **НАГРЕВ** включает режим поддержания температуры воды внутри термостата равной заданной. При выключенном переключателе **НАГРЕВ** температура воды устанавливается равной комнатной. Переключатель **ЦИРК** включает или выключает циркуляцию воды через водяную рубашку трубы (1). Диапазон задаваемых температур от 10 до 98 °С, объем циркулирующей воды 5 л.

Генератор звуковой частоты (генератор НЧ) (19) содержит клавишу включения **ВКЛ** и датчик частоты, состоящий из переключателя диапазонов ("x10", "x100", "x1000") и переключателя значений (шкала от 0 до 10 с шагом 0,02). Частота (в Гц) вычисляется как произведение значения на диапазон (например $3.05 \times 100 = 305$ Гц).

Вольтметр переменного тока (20) включается клавишей **ВКЛ** и содержит стрелочный индикатор, позволяющий зафиксировать максимальную амплитуду звуковых колебаний в трубе.

Баллоны (14) и (15) содержат сжатый углекислый газ и воздух соответственно. Они присоединяются к магистрали (3) через кран (16), имеющий три положения: 1 ("CO₂") – "закрыт" – 2 ("воздух"). Газовые редукторы (17) и (18) настроены на избыточное давление 0,03 бар.

Для очищения внутреннего объема трубы перед сменой газа используется система откачки. Узел откачки состоит из форвакуумного насоса (12), ресивера – маслоотделителя (11), кранов (10) и (9). Включение насоса осуществляется кнопкой **Вкл/Выкл** на корпусе насоса. Состояние кранов при выключенном насосе: кран (10) открыт, кран (9) закрыт. Порядок работы с ФВ насосом следующий: кран (9) открывать только при включенном насосе и закрывать его до выключения насоса; закрывать кран (10) можно только при включенном насосе, выключать насос можно только после открывания крана (10). В противном случае возможен выброс масла из насоса в защитный ресивер (11). Если это произошло, то надо при закрытых кранах (9) и (10) включить ФВ насос, после откачки масла из ресивера выключить насос в правильной последовательности: закрыть кран (9) – открыть кран (10) – выключить насос. Включать насос желательно по схеме: включить насос – закрыть кран (10) – открыть кран (9). Откачка газа из системы происходит за

две минуты работы насоса. Контроль давления при откачке осуществляется мановакуумметром (13).

4. Порядок выполнения работы

4.1. Запустите лабораторную работу.

4.2. Включите звуковой генератор, вольтметр и термостат. Включение/выключение этих приборов осуществляется нажатием левой клавишей мыши на кнопках **ВКЛ**.

4.3. На термостате установите температуру, указанную преподавателем. Для увеличения температуры следует левой клавишей мыши нажать и удерживать нажатой кнопку «+», для уменьшения кнопку «-». Включите нагрев и циркуляцию (кнопки **НАГРЕВ** и **ЦИРК**). Значение температуры запишите в таблицу.

4.4. На генераторе установите значение звуковой частоты "0.00" и диапазон "x100". Для увеличения или уменьшения значений частоты следует нажать и удерживать кнопки \wedge (увеличить) или \vee (уменьшить), для установки диапазона – кнопки $>$ или $<$.

4.5. Закройте кран (8). Положение крана – «3». Для переключения кранов надо щелкнуть по крану левой клавишей мыши.

4.6. Откачайте газ из системы. Перед откачкой убедитесь, что кран (10) открыт, а кран (9) закрыт. Включите насос, закройте кран (10), откройте кран (9). Подождите две минуты. Закройте кран (9), откройте кран (10), выключите насос.

4.7. Заполните трубу газом, указанным преподавателем. Для этого надо открыть на 10÷15 с кран (16) и закрыть его. При положении 1 труба заполняется углекислым газом, при положении 2 – воздухом. После заполнения трубы газом уравняйте давление внутри трубы с атмосферным. Для этого на 0,5÷1 с откройте и закройте кран (8).

4.8. Увеличивайте звуковую частоту, до наблюдения первого резонанса (по максимальному отклонению стрелки вольтметра). Чтобы зафиксировать максимум, можно уменьшить частоту, а потом опять увеличить. Запишите частоту резонанса в таблицу.

4.9. Продолжая увеличивать частоты, получите 8 значений частот резонанса. При необходимости можно установить диапазон "x1000". Запишите полученные значения в таблицу.

Таблица

№	$t, (^{\circ}C)$	$\nu, Гц$
1.		
2.		
3...		

5. Обработка результатов измерений

5.1. Рассчитайте погрешности прямых измерений. При расчете систематических погрешностей термометра и звукового генератора используйте пределы погрешностей приборов, приведенные в “Приложении №1”.

5.2. Постройте график зависимости частоты резонанса от его номера: $\nu = f(k)$. Рассчитайте угловой коэффициент a и его абсолютную погрешность Δa .

5.3. Рассчитайте скорость звука в газе по формуле (4). Длина трубы $L = (1,00 \pm 0,01)$ м.

5.4. Вычислите показатель адиабаты γ по формуле (1).

Молярная масса воздуха $\mu = (29,0 \pm 0,5) \cdot 10^{-3}$ кг/моль, углекислого газа

$\mu = (44,0 \pm 0,5) \cdot 10^{-3}$ кг/моль; универсальная газовая постоянная

$R = (8,310 \pm 0,005)$ Дж/моль К.

Контрольные вопросы

1. Объясните механизм возникновения упругих волн.
2. Что такое продольная волна?
3. Дайте определение звуковым волнам.
4. Напишите уравнение Менделеева-Клапейрона.
5. Запишите уравнение Пуассона.
6. Какой процесс называется адиабатическим?
7. Как образуется стоячая волна?
8. Что такое пучность и узел стоячей волны?
9. В чем заключается явление резонанса?

Лабораторная работа № 17

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ГАЗОВ МЕТОДОМ НАГРЕТОЙ НИТИ

1. Задача работы

1.1. Определение теплопроводности воздуха при атмосферном давлении и разных температурах по теплоотдаче нагреваемой током нити в цилиндрическом сосуде.

2. Предварительные сведения

Если внутри сосуда имеются области с разной температурой, то в газе возникают процессы, приводящие к выравниванию температуры. Выравнивание осуществляется тремя способами: тепловым излучением (перенос энергии электромагнитными волнами), конвекцией (перенос энергии за счет перемешивания слоев газа в пространстве из областей с более высокой температурой в области с низкой температурой) и теплопроводностью. Интенсивность переноса теплоты зависит от свойств вещества, разности температур и подчиняется экспериментально установленным законам природы.

В обычных условиях среди этих процессов наибольшую роль играет конвекция. Конвекция появляется из-за того, что легкий теплый газ поднимается вверх, а на его место опускаются более холодные массы газа. Конвекция не возникает, если температура газа повышается с высотой, если объем газа невелик или если он разбит на небольшие каналы или ячейки. В последнем случае возникновению конвекционных потоков мешает вязкость. При отсутствии конвекции процесс переноса тепла замедляется, но не прекращается. Он происходит благодаря теплопроводности газа, связанной с тепловым движением молекул. Теплопроводность – это процесс передачи теплоты от более нагретого слоя газа к менее нагретому за счет хаотического теплового движения молекул. Выравнивание температуры получается из-за непрерывного перемешивания «горячих» и «холодных» молекул, происходящего в процессе их теплового движения и не сопровождающегося макроскопическими перемещениями газа. При теплопроводности осуществляется непосредственная передача энергии от молекул с большей энергией к молекулам с меньшей энергией.

В любом теле, в частности в газе, предоставленном самому себе, теплопроводность приводит к выравниванию температур, и этот процесс, конечно, нестационарный. Но часто встречаются случаи, когда разность температур искусственно поддерживается постоянной.

Например, в электрической лампе накаливания газ, находящийся непосредственно около накаленной нити, имеет высокую температуру (равную температуре самой нити), тогда как газ, прилегающий к стеклянному баллону лампы, обладает значительно более низкой температурой. Через некоторое время после включения лампы устанавливается постоянная разность температур между нитью и стенками. Это постоянство обеспечивается, с одной стороны, электрической энергией, подводимой к нити из электрической сети, с другой стороны – отдачей тепла от стенок лампы к окружающему ее воздуху. При этих условиях в газе, находящемся в лампе, устанавливается стационарный, т.е. не изменяющийся со временем поток тепла. Установившаяся стационарная разность температур зависит от теплопроводности газа (для лампы накаливания надо иметь в виду, что кроме отвода тепла через газ в данном частном случае отвод тепла происходит главным образом в результате излучения).

В приведенном примере лампы расчет потока тепла представляет большие трудности, связанные со сложной формой нити и сосуда, вследствие чего распределение температуры в газе тоже оказывается весьма сложным.

Чтобы найти количественные закономерности, характеризующие процесс теплопроводности, рассмотрим более простую задачу.

Пусть вдоль какого-нибудь направления в газе, например, вдоль r , температура меняется от точки к точке, т.е. является функцией r , в то время как в плоскости, перпендикулярной этой оси, температура всюду одинакова (см. рис.1)

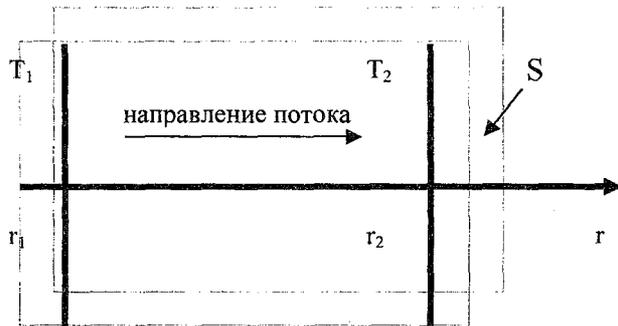


Рис. 1 Схема переноса тепла вдоль оси r

Изменение температуры вдоль оси r характеризуется градиентом температуры $\frac{\partial T}{\partial r}$ (если температура, как мы предположили, изменяется

только вдоль оси r , то вместо $\frac{\partial T}{\partial r}$ можно написать $\frac{dT}{dr}$. Смысл градиента температуры заключается в том, что он равен изменению температуры от одной точки к другой, отнесенному к единице расстояния между ними. Существование градиента теплопроводности и является необходимым условием для возникновения теплопроводности.

Направление потока тепла совпадает с направлением падения температуры. Если возрастанию x (т.е. $dr > 0$) соответствует падение температуры (т.е. $dT < 0$), то тепло течет в направлении возрастающего r : поток тепла течет так, чтобы уменьшить существующий градиент температуры, который его вызвал.

Опыт показывает, что количество теплоты Q , которое переносится вследствие теплопроводности за единицу время вдоль оси r через поверхность площадью S , перпендикулярную к направлению переноса энергии, пропорционально градиенту температуры (закон Фурье):

$$Q = -\chi \cdot \left(\frac{dT}{dr} \right) \cdot S, \quad (1)$$

где χ - коэффициент теплопроводности, который численно равен потоку тепла, при градиенте температуры, равном единице ($1 \frac{K}{cm}$). Легко видеть, что коэффициент теплопроводности воздуха в системе СИ выражается в единицах $\frac{Дж}{м \cdot с \cdot К}$ или $\frac{Вт}{м \cdot К}$.

3. Метод исследования и описание установки

Рассмотрим установку, состоящую из двух коаксиальных цилиндров, пространство между которыми заполнено воздухом. Внутренний цилиндр представляет собой проволоку. Если ее нагревать, а температуру наружного цилиндра поддерживать постоянной, ниже температуры проволоки, то в кольцевом слое воздуха возникает радиальный поток теплоты, направленный от проволоки к наружному цилиндру. При этом температура слоев воздуха, прилегающих к стенкам цилиндра и проволоки, равна температуре соответствующих стенок. Выделим в газе кольцевой слой радиусом r , толщиной dr , и длиной L . По закону Фурье количество теплоты, которая проходит через этот слой за одну секунду (тепловой поток), можно записать в виде:

$$Q = -\chi \left(\frac{dT}{dr} \right) S = -\chi \left(\frac{dT}{dr} \right) 2\pi r L. \quad (2)$$

Разделяя переменные, получим:

$$\frac{dr}{r} = -\frac{2\pi\chi L}{Q} dT.$$

Тогда:

$$\int_r^R \frac{dr}{r} = -\frac{2\pi\chi L}{Q} \int_{T_r}^{T_R} dT. \quad (3)$$

Из уравнения (3) получим формулу для определения коэффициента теплопроводности воздуха:

$$\chi = \frac{Q}{2\pi L(T_r - T_R)} \ln \frac{R}{r}, \quad (4)$$

где r – радиус проволоки, R – радиус цилиндра, L – высота цилиндра, Q – поток тепла, $T_r - T_R$ – разность температуры воздуха у поверхности проволоки и цилиндра, χ – коэффициент теплопроводности воздуха в цилиндре. Формула (4) может служить для определения χ и является рабочей формулой.

Проволока нагревается электрическим током. После того как установится стационарный режим, тепловой поток Q становится равным теплу, выделяемому при нагревании проволоки электрическим током, значение которого легко рассчитать, зная сопротивление проволоки и силу протекающего по ней тока. Наибольшую трудность вызывает определение температуры нагретой проволоки, которую невозможно измерить непосредственно.

Экспериментальная установка изображена на рис. 2

Назначение и характеристика основных элементов установки.

3.1. Цилиндр (1) с коаксиально расположенной тонкостенной медной трубкой (2). Трубка (2) изолирована от цилиндра (1) кольцевыми пробками (3), которые одновременно герметизируют внутреннее пространство между стенками. Через внутреннее пространство цилиндра (1) циркулирует вода из термостата (8), задающая температуру трубки (2), Между шайбами (4) внутри медной трубки натянута тонкая вольфрамовая проволока (5).

Параметры трубки и проволоки:

- диаметр проволоки (5):	0,1 мм
- длина проволоки (5):	0,5 м
- внутренний диаметр трубки (2):	8,0 мм
- материал проволоки	вольфрам
- коэффициент температурного сопротивления	$\alpha = 4,0 \cdot 10^{-3} \frac{1}{град}$

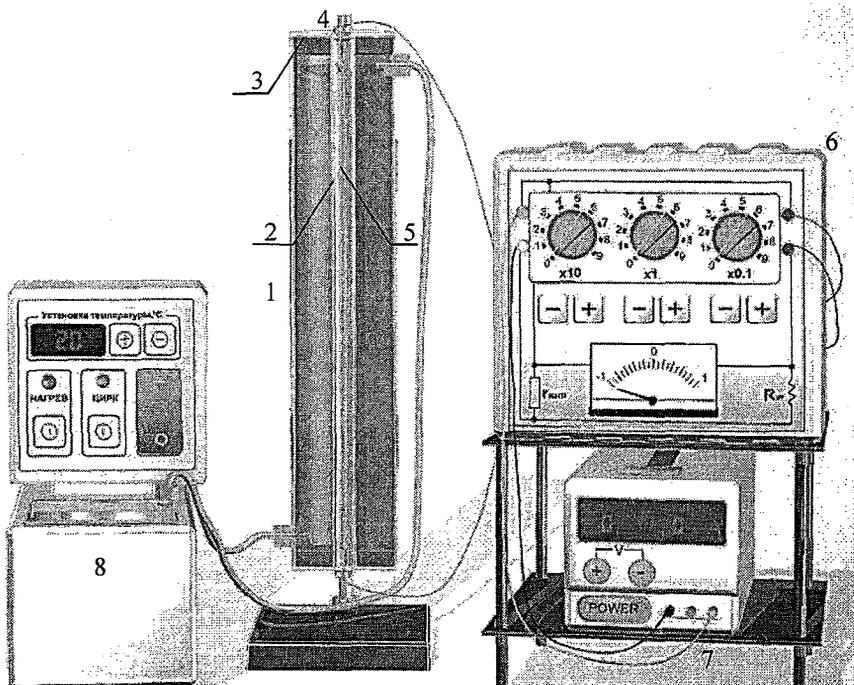


Рис. 2. Схема установки

3.2. Проволока (5) нагревается электрическим током, ее температура определяется по изменению электрического сопротивления. Проволока (5) включена в схему измерительного моста Уитстона (6), состоящего из магазина сопротивлений, нагрузочного r_n и эталонного $R_{эт}$ сопротивлений. Параметры моста подобраны таким образом, что при балансе моста сопротивление магазина сопротивлений в 10 раз больше сопротивления проволоки. Вся схема подключена к источнику питания (7).

Для установки необходимого значения сопротивления следует щелкнуть левой клавишей мыши кнопку «+» (Увеличить) или «-» (Уменьшить) под требуемым переключателем «10», «1» или «0,1» магазина сопротивлений.

Параметры моста Уитстона:

- величина $R_{эт} = 2$ Ом.
- величина $r_n = 20$ Ом.

3.3. Блок питания (7) обеспечивает питание схемы регулируемым постоянным напряжением. На табло блока питания отображается величина напряжения и сила тока.

Чтобы включить блок питания, следует нажать кнопку **Power**. Для регулировки напряжения служат кнопки «+» (**Увеличить**) или «-» (**Уменьшить**) на блоке питания. Для увеличения или уменьшения напряжения следует нажимать левой клавишей мыши по соответствующей кнопке до установки на табло требуемого значения напряжения. Шаг установки напряжения – 1В.

Характеристики блока питания:

- диапазон напряжений: 0-15 В
- шаг установки напряжения: 1,0 В
- максимальный ток: 1,5 А

3.4. Термостат (8) обеспечивает подачу на вход теплоприемника воды с температурой, заданной на блоке управления. При изменении установки термостата время релаксации – 5 минут.

Чтобы включить термостат, следует на пульте управления термостата нажать выключатель, щелкнув по нему левой клавишей мыши, После этого загорится индикатор температуры термостата.

Для увеличения температуры следует левой клавишей мыши нажать и удерживать нажатой кнопку «+», для уменьшения – кнопку «-». Шаг установки температуры – 1⁰С.

Для включения/выключения режимов **Нагрева** и **Циркуляции** следует нажать левой клавишей мыши кнопки **НАГРЕВ** и **ЦИРК**. При включении любого режима загорается соответствующий индикатор.

4. Порядок выполнения работы

4.1. Запустите лабораторную работу.

4.2. Определение сопротивления проволоки R_0 при комнатной температуре.

4.2.1. Включив термостат, установите на нем температуру $T_{окр.}$, которую укажет преподаватель (20⁰С, 40 ⁰С, 60⁰С или 80⁰С). Включите режим **ЦИРК** и **НАГРЕВ**. Для скорейшего термостатирования цилиндра с газом и расположенной внутри проволокой можно воспользоваться кнопкой **ПРЫЖОК**. Чем больше будет шаг прыжка, тем быстрее температура стенок трубки T_R будет равна температуре $T_{окр.}$, установленной на термостате.

4.2.2. Включите источник питания.

4.2.3. Убедитесь, что значения напряжения U и силы тока I равны нулю.

4.2.4 Произведите баланс моста Уитстона. Для этого с помощью переключателей магазина сопротивлений добейтесь того, чтобы гальванометр показывал нулевое значение тока.

4.2.5. Занесите в таблицу 1 значения температуры T_R , напряжения V , силы тока I и сопротивления моста R_M (суммируя показания переключателей моста: $R_M = X \cdot 10 + X \cdot 1 + X \cdot 0.1$).

Таблица 1

№ опыта	T_R °C	V B	I A	R_M Ом

4.3. Измерение зависимости сопротивления проволоки $R_{пров.}$ от протекающего через установку тока I при различных значениях напряжения.

4.3.1. Установите на источнике питания минимальное значение напряжения.

4.3.2. Повторите действия 4.2.4. – 4.2.5. при различных значениях напряжения, от минимального до максимального, увеличивая напряжение с шагом 2-3 вольта, каждый раз заноса данные в таблицу.

5. Обработка результатов измерений

5.1. Погрешности прямых измерений. Систематические погрешности амперметра, термометра и магазина сопротивлений приведены в “Приложении №1”.

5.2. Рассчитайте значение сопротивления проволоки $R_{пров.}$, которое должно быть в 10 раз меньше сопротивления магазина сопротивлений R_M .

5.3. Результаты измерений, проведенные согласно пунктам раздела 4.2. позволяют определить значение R_0 .

5.4. Найдите погрешность величины R_0 .

5.5. Для каждого набора значений T_R , R_M , $R_{пров.}$, I , полученных при выполнении пунктов 4.3.1-4.3.2. рассчитайте величины:

$$Q = R_{пров.} \cdot \left(\frac{10}{11} \cdot I \right)^2, \quad (5)$$

Формула (5) выведена для данной установки на основе эмпирических данных.

$$T_r = T_R + \frac{R_{пров.} - R_0}{R_0 \alpha}, \quad (6)$$

5.6. Найдите погрешности величин Q и T_r как погрешности косвенных измерений. Рассчитайте погрешность $R_{\text{пров.}}$ как погрешность косвенного измерения ($R_{\text{пров.}} = R_M / 10$). Считайте погрешности величин I , T_R , R_0 равными систематическим погрешностям. Погрешности величин α , R , r считайте пренебрежимо малыми величинами.

5.7. Используя результаты вычислений по формулам (2) и (3) рассчитать по формуле (4) коэффициент теплопроводности. для каждого значения напряжения.

5.8. Найдите среднее значение коэффициента теплопроводности.

5.9. Рассчитайте погрешность коэффициента теплопроводности.

Вычислите случайную погрешность, рассматривая данные, полученные при выполнении пункта 5.7. как данные прямых измерений.

Вычислите систематическую погрешность коэффициента теплопроводности, как погрешность косвенного измерения, используя данные, полученные при выполнении п.5.6.

5.10. Сравните полученное значение коэффициента теплопроводности с табличным значением.

Контрольные вопросы

1. Что такое градиент температуры ?
2. За счет каких процессов происходит выравнивание температуры в сосуде с газом, если внутри него существует градиент температуры?
3. Какой процесс называется конвекцией?
4. В каких случаях конвекция не возникает?
5. Как осуществляется процесс переноса тепла в газе при отсутствии конвекции?
6. Какой процесс называется теплопроводностью ?
7. Может ли осуществляться теплопроводность, если градиент температуры равен нулю ?
8. Какой физический смысл имеет коэффициент теплопроводности ?
9. Сформулируйте закон Фурье для теплопроводности.
10. Каким образом можно измерить поток тепла Q , значение которого используется в формуле (4) ?

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ТВЕРДОГО ТЕЛА (ПЛАСТИНЫ)

1. Задача работы

1.1. Определение теплопроводности твердых тел методом сравнения с теплопроводностью эталонного материала.

2. Предварительные сведения

Если в твердом теле существует разность температур между различными его частями, то подобно тому, как это происходит в газах и жидкостях (см. работу №17), тепло переносится от более нагретой к менее нагретой части.

В отличие от жидкостей и газов в твердом теле не может возникнуть конвекции, т.е. перемещения массы вместе с теплом. Поэтому перенос тепла в твердом теле осуществляется только теплопроводностью.

Механизм переноса тепла в твердом теле вытекает из характера тепловых движений в нем. Твердое тело представляет собой совокупность атомов, совершающих колебания. Но колебания эти не независимы друг от друга. Колебания могут передаваться (со скоростью звука) от одних атомов к другим. При этом образуется волна, которая и переносит энергию колебаний. Таким распространением колебаний и осуществляется перенос тепла.

Количественно перенос тепла в твердом теле описывается так же, как и в газе, т.е. законом Фурье (см. работу №17).

$$Q = -\chi \cdot \left(\frac{dT}{dx} \right) \cdot S$$

где Q - количество теплоты, которое переносится вследствие теплопроводности за единицу время вдоль оси x через поверхность площадью S ,

χ - коэффициент теплопроводности, $\frac{dT}{dx}$ - градиент температуры, характеризующий ее изменение вдоль направления x .

Из закона Фурье следует, что для определения коэффициента теплопроводности необходимо измерить количество тепла Q , а также градиент температуры вдоль тела. При проведении такого рода измерений встречаются значительные трудности, поскольку нужно одновременно измерять количество теплоты и изменение температуры. В обоих случаях подводимое коли-

чество теплоты может теряться, и, таким образом, не учитываться в изучаемом процессе. Поэтому при измерении коэффициента теплопроводности главное внимание нужно обращать на устранение погрешности, возникающей из-за того, что не все тепло передается через исследуемое тело путем теплопроводности, а частично может передаваться окружающей среде через боковые поверхности.

Простейшая установка для измерения коэффициента теплопроводности может представлять собой однородную пластину в форме тонкого диска, одна поверхность которой нагревается каким – либо источником тепла, а другая – поддерживается при постоянной температуре.

Если толщина однородной пластины равна d , площадь – S , а разность температур между двух параллельных поверхностях пластины равна ΔT , то количество теплоты Q , протекающее за единицу времени через эту пластину будет определяться следующим соотношением:

$$Q = \chi \cdot S \cdot \frac{\Delta T}{d} . \quad (1)$$

Значение коэффициента теплопроводности χ может быть определено непосредственно из формулы (1), если измерить на опыте величины Q , ΔT , d и S . Однако, точное определение Q практически невозможно, поэтому в настоящей работе производится сравнение теплопроводности исследуемого материала с теплопроводностью некоторого другого эталонного материала с хорошо известным значением коэффициента χ . При этом можно избежать измерения Q . Суть метода следующая. Две пластинки, изготовленные из материалов с коэффициентом теплопроводности χ_1 и χ_2 , зажимаются между стенками, разность температуры между которыми поддерживается постоянной во время опыта. Если толщины пластинок (d_1 и d_2) достаточно малы по сравнению с наименьшим линейным размером их поверхности, то можно пренебречь потерей тепла через боковые поверхности. Тогда можно считать, что тепловой поток протекает только от горячей стенки к холодной через пластины.

Пусть температура верхней стенки равна T_1 , температура на границе раздела пластинок – T_2 , а температура нижней стенки – T_3 . В этом случае:

$$Q = \chi_1 \cdot S \cdot \frac{(T_1 - T_2)}{d_1} \text{ и } Q = \chi_2 \cdot S \cdot \frac{(T_2 - T_3)}{d_2} . \quad (2)$$

Из (2) получаем окончательно:

$$\frac{\chi_1}{\chi_2} = \frac{d_1}{d_2} \cdot \frac{(T_2 - T_3)}{(T_1 - T_2)} \quad (3)$$

Зная теплопроводность материала одной из пластинок, используя формулу (3), легко определить на опыте теплопроводность другой пластинки:

$$\chi_2 = \chi_1 \frac{d_2}{d_1} \frac{(T_1 - T_2)}{(T_2 - T_3)} \quad (4)$$

Формула (4) является рабочей.

3. Метод исследования и описание установки

Экспериментальная установка изображена на рис. 1.

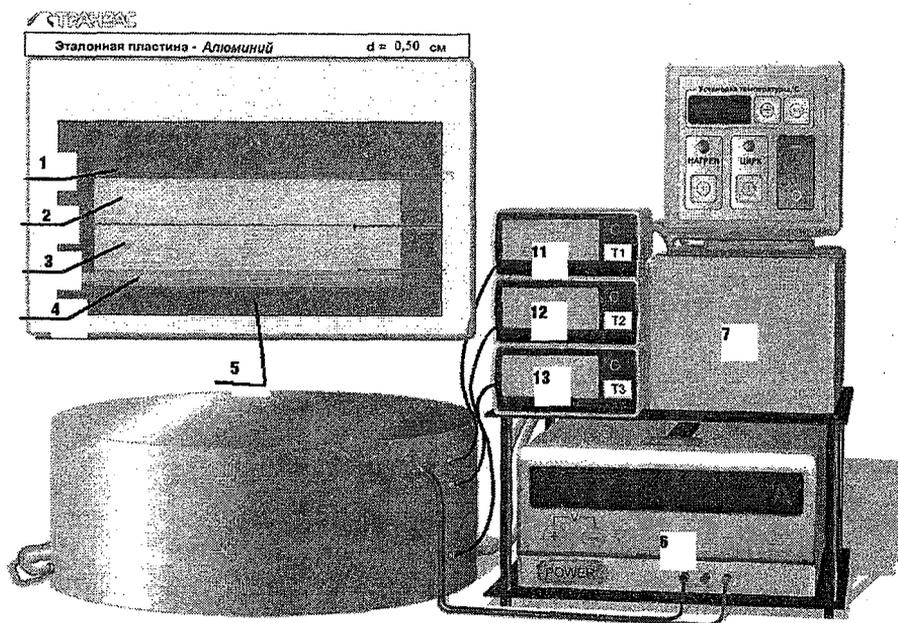


Рис.1 Схема установки

Назначение и характеристика основных элементов установки

3.1. Установка состоит из пластин (2) и (3), зажатых между нагревателем (1) и холодильником (4), которые помещены в теплоизоляционный кожух (5). Пластина (2) изготовлена из материала с известным коэффициентом теплопроводности, пластина (3) – из исследуемого материала. Форма пластин – диск, радиусом 20 см., причем толщина пластины более чем в 10 раз меньше диаметра. Между всеми соприкасающимися поверхностями проложена термopроводящая паста.

Примечание: Материал эталонной и исследуемой пластин, а также толщина пластин, задается преподавателем при назначении работы. Материал и толщина эталонной пластины отображается в рабочем окне работы. Толщина пластин задается в диапазоне 3-20 мм. Виды материалов пластин, коэффициент теплопроводности каждого материала представлены в таблицах 3 и 4.

Металлы

Таблица 3

№п/п	Материал	Кoeff. теплопроводности, Вт/(м град)	№п/п	Материал	Кoeff. теплопроводности, Вт/(м град)
1.	Алюминий	207	4	Медь	402
2	Железо	75	5	Лагунь	150
3	Сталь нерж.	50	6	Свинец	34,9

Теплоизоляторы.

Таблица 4

№п/п	Материал	Кoeff. теплопроводности, Вт/(м град)	№п/п	Материал	Кoeff. теплопроводности, Вт/(м град)
1	Асбест	0,25	6	Береза	0,15
2	Картон	0,14	7	Фарфор	1,05
3	Войлок	0,04	8	Стекло	1,0
4	Кожа	0,19	9	Эбонит	0,18
5	Полистирол	0,08			

3.2. Нагреватель (1) подключен к регулируемому источнику питания (6), управление которым осуществляется с пульта. Сопротивление спирали нагревателя – 800 Вт, для неметаллов – 50 Вт.

Чтобы включить блок питания, следует нажать кнопку **Power**. Для регулировки напряжения служат кнопки «+» (**Увеличить**) или «-» (**Уменьшить**) на блоке питания. Для увеличения или уменьшения напряжения следует на-

жимать левой клавишей мыши по соответствующей кнопке до установки на табло требуемого значения напряжения. Шаг установки напряжения – 1В.

3.3. Холодильник (4) представляет толстую медную пластину, в которой просверлены каналы, по которым циркулирует вода из термостата (7), заданной температуры. Температура холодильника принимается равной температуре воды, установленной на термостате (+20⁰С), которая не регулируется.

Пульт управления термостатом содержит следующие кнопки:

- выключатель термостата;
- кнопку включения/выключения режима **НАГРЕВ**;
- кнопку включения/выключения режима **ЦИРКУЛЯЦИЯ**;
- кнопки установки температуры.

Чтобы включить термостат, следует на пульте управления термостата нажать выключатель, щелкнув по нему левой клавишей мыши, После этого загорится индикатор температуры термостата.

Примечание: В данной работе термостат не позволяет регулировать температуру, по умолчанию, она всегда равна 20⁰С.

Для включения/выключения режимов Нагрева и Циркуляции следует нажать левой клавишей мыши кнопки **НАГРЕВ** и **ЦИРК**. При включении любого режима загорается соответствующий индикатор.

Внимание! Если при проведении работы режим **НАГРЕВ** включен, а режим **ЦИРКУЛЯЦИЯ** выключен, то при достижении эталонной пластиной температуры 100⁰С, работа будет аварийно остановлена по причине выхода установки из строя.

3.4. Температура поверхностей пластин измеряется термопарами (8), (9) и (10), зажатыми между пластинами. Индикация температуры – на табло (11), (12) и (13) соответственно.

4. Порядок выполнения работы

4.1. Запустите лабораторную работу.

4.2. Подводя курсор мыши к изображению элементов установки и читая всплывающие подсказки, внимательно ознакомьтесь с установкой и запомните расположение ее элементов.

4.3. Начните работу со стендом с нажатия кнопки ПУСК, расположенной в левом верхнем углу.

4.4. Запишите материал и толщину образцовой пластины в таблицу измерений:

№ опыта	материал эт. пластины	d_1 , см эт. пластины	d_2 , см исслед. пластины	V , В	T_1 , ⁰ С	T_2 , ⁰ С	T_3 , ⁰ С

- 4.5. Включите на термостате режимы **ЦИРК** и **НАГРЕВ**.
- 4.6. Включите источник питания.
- 4.7. Если проводится эксперимент с металлическими пластинами, то установите напряжение 25 В. Для прочих материалов установите напряжение 10 В.
- 4.8. Дождитесь установления теплового равновесия. Для ускорения процесса можно использовать функцию программы **ПРЫЖОК**. Для металлических пластин достаточно 10-15 мин., для неметаллов – 30-40 мин.
- 4.9. Запишите значение напряжения в таблицу измерений.
- 4.10. Запишите значения температуры T_1 , T_2 , T_3 , снимая данные с индикаторов температуры (11), (12), (13) соответственно.
- 4.11. Повторяйте п.п. 4.7 – 4.10. для напряжений:
 - металлические пластины 50 В, 100 В, 200 В.
 - прочие материалы: 20 В, 35 В, 50 В.

5. Обработка результатов измерений

- 5.1. Погрешности прямых измерений. Систематическая погрешность термометра термопар приведена в “Приложении №1”.
- 5.2. Рассчитайте разность температур между границами исследуемой пластины ($T_2 - T_3$) и эталонной пластины ($T_1 - T_2$). Найдите погрешность этих значений, как погрешности косвенных измерений, считая погрешности величин T_1 , T_2 , T_3 равными систематической погрешности термометра термопар.
- 5.3. Рассчитайте для каждого значения напряжения коэффициент теплопроводности исследуемой пластины χ_2 , используя формулу (4).
- 5.4. Найдите среднее значение коэффициента теплопроводности и его погрешность как погрешность прямых измерений.
Систематическую погрешность определите как погрешность косвенных измерений, используя формулу (4) и погрешности величин ($T_2 - T_3$) и ($T_1 - T_2$), полученные в п. 5.2. Погрешности χ_1 , d_1 , d_2 определите как погрешность физических констант.
- 5.5. По справочнику определите материал исследуемой пластины.

Контрольные вопросы

1. В чем отличие процесса переноса тепла в твердом теле и газе?
2. Опишите механизм переноса тепла в твердом теле.
3. Какую величину можно определить, используя закон Фурье?
4. В чем заключается главная трудность при измерении коэффициента теплопроводности ?

5. Может ли осуществляться процесс теплопроводности, если на обеих поверхностях пластины поддерживается одинаковая температура?
6. Дайте определение всем величинам, входящим в формулу (1).
7. Как определить коэффициент теплопроводности материала, не измеряя непосредственно величину теплового потока Q ?
8. При каком условии справедлива формула (3)?
9. Дайте определение всем величинам, входящим в формулу (4).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бармасов А.В., Холмогоров В.Е. Курс общей физики для природопользователей. Механика / Под ред. А.С. Чирцова.– СПб.: БХВ-Петербург, 2008. Т.1. – Серия «Учебная литература для вузов».
2. Бармасов А.В., Холмогоров В.Е. Курс общей физики для природопользователей. Молекулярная физика и термодинамика / Под ред. А.П. Бобровского– СПб.: БХВ-Петербург, 2009. Т.2. – Серия «Учебная литература для вузов».
3. Зисман Г.А., Тодес О.М. Курс общей физики.– М.: Наука, 1974. – Т.1.
4. Кикоин А.К., Кикоин И.К. Общий курс физики. Молекулярная физика. – М.: Наука, 1976.
5. Матвеев Л.Т. Физика атмосферы.– СПб., Гидрометеиздат, 2000. §4.1 - §4.9.
6. Роджерс Р.Р. Краткий курс физики облаков. – Л.: Гидрометеиздат, 1979. – Глава 2.
7. Савельев И.В. Курс общей физики. (в 5 книгах). – М.: Наука, 1998. - Т.3. «Молекулярная физика и термодинамика».
8. Трофимова Т.И. Курс физики. – М.: Высшая школа, 1990.
9. Фокин С.А., Бармасова А.М., Мамаев М.А. Обработка результатов измерений физических величин.– СПб.: Изд. РГТМУ, 2009.
10. Хромова С.П., Мамонтова Л.И. Метеорологический словарь.–Л.: Гидрометеиздат, 1979.
11. Яворский Б.М., Детлаф А.А. Справочник по физике.– М.: Наука. Физматлит, 1996.
12. Хайкин С.Э. Физические основы механики.– М.: Наука, 1971.

Приложение №1

Систематические погрешности измерительных приборов

Лабораторная работа № 4.

Термометр термостата	0,5 °С.
Термометр цифровой	0,005 °С.
Мановакуумметр	50 Па.

Лабораторная работа № 5.

Термометр термостата	0,5 °С.
Термометр цифровой	0,005 °С.
Мановакуумметр	50 Па.

Лабораторная работа № 6.

Секундомер (таймер)	0,01 с.
Вольтметр	1 В.
Термометр	0,1 °С.
Амперметр	0,01 А.

Лабораторная работа № 7.

Вольтметр	0,05 В.
Термометр	0,01 °С.
Амперметр	0,01 А.
Регулятор расхода	0,1 л/с.

Лабораторная работа № 9.

Звуковой генератор.	
В диапазоне 0 ÷ 1000 Гц	2 Гц.
В диапазоне 1000 ÷ 10000 Гц	20 Гц.
Термометр	1 °С.

Лабораторная работа № 17.

Вольтметр	0,06 В.
Амперметр	0,005 А.
Магазин сопротивлений	0,05 Ом.
Термометр	0,3 °С.

Лабораторная работа № 18.

Термометр термопар	0,0001 °С
--------------------	-----------

Таблицы значений физических величин и констант, используемых в лабораторном практикуме

Удельная газовая постоянная сухого воздуха	287 Дж/(кг К)
Универсальная газовая постоянная	$R = 8,31 \frac{\text{Дж}}{\text{мольК}}$
Удельная газовая постоянная для водяного пара	461,3 Дж/(кг К)
Постоянная Больцмана)	$k = 1,38 \cdot 10^{-23} \frac{\text{Дж}}{\text{К}}$
Число Авогадро	$N_o = 6,02 \cdot 10^{23} \frac{1}{\text{моль}}$

Зависимость давления насыщенного водяного пара $e_{нт}$ и скрытой теплоты конденсации L от температуры воздуха

$t, ^\circ\text{C}$	$e_{нт}, \text{Па}$	L 10^6 Дж/кг
0	610,6	2,499
5	871,9	
10	1227,1	2,476
15	1704,4	
20	2337,1	2,452
25	3167,1	
30	4242,7	2,428
35	5623,6	
40	7377,3	2,405

Теплопроводность воздуха при различных температурах при давлении 1 атм

Температура, $^\circ\text{C}$	$10^{-4} \text{ Вт}\cdot\text{м}^{-1}\cdot\text{К}^{-1}$
-173	0,922
-143	1,204
-113	1,404
-83	1,741

Температура, °С	10^{-4} Вт·м ⁻¹ ·К ⁻¹
-53	1,983
-23	2,207
-3	2,348
0,1	2,370
7	2,417
17	2,485
27	2,553
37	2,621
67	2,836
97	3,026

Коэффициент теплопроводности некоторых материалов

Вещество	Коэффициент теплопроводности λ , Вт·м ⁻¹ ·К ⁻¹
Алюминий	205÷220
Бронза	105
Висмут	8,4
Вольфрам	76÷159
Железо	74,4÷167
Золото	287÷312,8
Кадмий	96
Латунь	85,5÷110
Магний	155
Медь (18 °С)	384,93
Молибден	146,5
Мышьяк	188
Никель	58
Олово	65,3
Платина	70
Ртуть	6,7÷29,1
Свинец	35
Серебро (0 °С)	458,57
Сталь	45,4÷46
Цинк	113
Чугун	62,8

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие.....	3
Лабораторная работа № 4. Определение «точки росы» при различной абсолютной влажности.....	5
Лабораторная работа № 5. Определение теплоты испарения жидкости по давлению насыщенных паров.....	13
Лабораторная работа № 6. Определение теплоемкости твердого тела	20
Лабораторная работа № 7. Определение теплоемкости газа методом проточного нагрева.....	27
Лабораторная работа № 8. Определение показателя адиабаты при адиабатическом расширении газа ...	35
Лабораторная работа № 9. Определение показателя адиабаты по скорости звука в воздухе.....	40
Лабораторная работа № 17. Определение теплопроводности газов методом нагретой нити.....	47
Лабораторная работа № 18. Определение теплопроводности твердого тела.....	55
Приложение №1.....	63
Приложение №2.....	64

Учебное пособие

**ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВИРТУАЛЬНЫХ СТЕНДОВ**

по дисциплине
«ФИЗИКА»

Раздел
«Молекулярная физика и термодинамика»

Редактор
И.Г. Максимова

ЛР № 020309 от 30.12.96.

Подписано в печать 26.06.10. Формат $60 \times 90^{1/16}$. Печать офсетная.
Печ. л. 4,00. Тираж 500. Зак. № 7.

195196, СПб, Малоохтинский пр. 98. РГГМУ

