

Работа Т-1

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОТНОШЕНИЯ ТЕПЛОЕМКОСТЕЙ ГАЗА МЕТОДОМ КЛЕМАНА-ДЕЗОРМА

Цель работы: Определение отношения теплоёмкости воздуха при постоянном давлении к теплоёмкости при постоянном объёме.

Приборы и принадлежности: Стекланный (или металлический) баллон, водяной манометр или манометр с цифровой индикацией (установка ФПТ1-6н), насос (ручной или электрический). В лабораториях кафедры имеются 4 модификации установок. Их описание и порядок работы с ними представлен ниже по тексту.

Введение

Удельной теплоемкостью вещества называется величина, численно равная количеству теплоты, которую необходимо сообщить единице массы вещества для увеличения её температуры на один кельвин:

$$c = \frac{\delta Q}{m dT}.$$

Молярной теплоёмкостью (или теплоёмкостью одного моля вещества) называется величина, численно равная количеству теплоты, которую необходимо сообщить одному молю вещества для увеличения его температуры на один кельвин:

$$C_{\mu} = \frac{\delta Q}{\frac{m}{\mu} dT} = \frac{\delta Q}{\nu dT},$$

где m – масса вещества; μ – масса одного моля вещества (молярная масса), $\nu = \frac{m}{\mu}$ – число молей (количество вещества).

В СИ удельная теплоёмкость выражается в Дж/(кг·К), а молярная – в Дж/(моль·К).

Численное значение теплоёмкости зависит от природы газа и процесса нагревания.

Согласно первому закону термодинамики количество теплоты δQ , сообщенное системе, расходуется на увеличение её внутренней энергии dU и на выполнение системой работы δA против внешних сил:

$$\delta Q = dU + \delta A. \quad (1)$$

Увеличение внутренней энергии идеального газа при увеличении его температуры на dT определяется как:

$$dU = \frac{m}{\mu} \frac{i}{2} R dT, \quad (2)$$

где i – число степеней свободы молекулы, под которым подразумевается число независимых координат, определяющих положение молекулы в пространстве: $i = 3$ – для одноатомных; $i = 5$ – для двухатомных; $i = 6$ – для трёх- и многоатомных молекул; $R = 8,31$ Дж/(моль·К) – универсальная газовая постоянная;

При расширении газа он выполняет работу:

$$\delta A = PdV.$$

Если газ нагревать при постоянном объёме $V = const$, то $\delta A = 0$, и согласно (1) все полученное газом количество теплоты расходуется только на увеличение его внутренней энергии ($dQ_V = dU$). Учитывая (2), молярная теплоёмкость идеального газа при постоянном объеме может быть представлена в виде:

$$C_V = \frac{dU}{\nu dT} = \frac{i}{2} R.$$

Если газ нагревать при постоянном давлении $P = const$, то полученное газом количество теплоты расходуется на увеличение внутренней энергии dU и выполнение работы δA :

$$\delta Q = dU + PdV.$$

Используя уравнение состояния идеального газа (уравнение Клапейрона – Менделеева) для изобарического ($P = const$) процесса, получим:

$$PdV = \frac{m}{\mu} R dT.$$

Тогда первый закон термодинамики для изобарического процесса можно записать следующим образом:

$$C_p \frac{m}{\mu} dT = \frac{m}{\mu} \frac{i}{2} R dT + \frac{m}{\mu} R dT.$$

После сокращения левой и правой частей уравнения на $\frac{m}{\mu} dT$ получим соотношение, известное как уравнение Майера:

$$C_p = C_v + R.$$

Исходя из этого, легко сделать вывод о том, что:

$$C_p = \frac{i+2}{2} R,$$

и тогда отношение теплоёмкостей γ можно представить в виде:

$$\gamma = \frac{C_p}{C_v} = \frac{i+2}{i}. \quad (3)$$

Для определения отношения C_p/C_v для воздуха в данной лабораторной работе применен метод, предложенный Клеманом и Дезормом, в котором использовано охлаждение газа при его адиабатическом расширении. Предполагается, что воздух – идеальный газ.

Адиабатическим называется процесс, который происходит без теплообмена с окружающей средой $\delta Q = 0$. Быстрое сжатие и быстрое расширение газа в первом приближении можно рассматривать как адиабатический процесс.

Согласно формуле первого закона термодинамики (1) для адиабатического процесса:

$$0 = dU + \delta A, \text{ откуда}$$

$$\delta A = -dU = -\frac{m}{\mu} \frac{i}{2} R dT.$$

Из последнего уравнения следует, что при адиабатическом сжатии температура газа повышается за счёт работы внешних сил ($\delta A < 0$), а при адиабатическом расширении ($\delta A > 0$) температура газа понижается, так как часть внутренней энергии газа расходуется на работу по расширению газа.

Рисунки 1 и 2 поясняют метод Клемана и Дезорма. На рисунке 1 изображён лабораторный стенд, который состоит из стеклянного баллона Б, наполнённого воздухом и соединённого с водяным манометром М. Посредством крана К баллон может сообщаться с атмосферой. Первоначально в баллоне было атмосферное давление P_A и температура T_A , равная температуре окружающей среды.

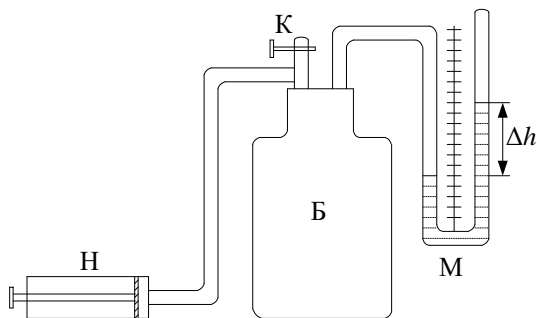


Рис. 1

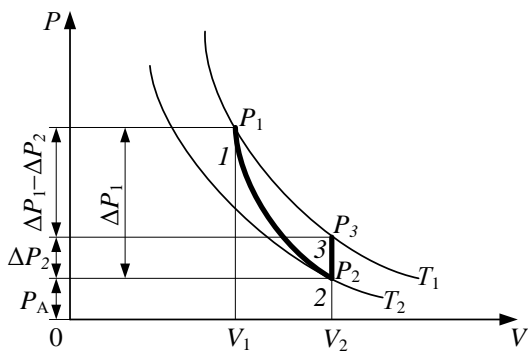


Рис. 2

Если с помощью насоса Н подкачать в баллон некоторое количество воздуха, то давление в баллоне повысится до значения P_1 . Манометрический водяной столбик не сразу займет окончательное положение, так как при быстром сжатии температура повышается. Благодаря теплопроводности стенок сосуда через некоторое время температура воздуха в баллоне сравняется с температурой воздуха окружающей среды. При этом состояние газа характеризуется температурой $T_1 = T_A$, и давлением P_1 (на рис. 2 точка 1). Давление P_1 равно сумме первоначального давления газа в баллоне P_A и избыточного давления газа в баллоне ΔP_1 :

$$P_1 = P_A + \Delta P_1.$$

После того как давление газа в баллоне установилось, открывают кран, и воздух адиабатически расширяется, выходя в атмосферу. В тот момент, когда давление воздуха в баллоне становится равным атмосферному (**высота столбиков воды в обоих коленах манометра сравнивается**), кран быстро закрывают.

При расширении температура газа в баллоне понижается (это состояние представлено точкой 2 на рис. 2) и оказывается ниже температуры T_A окружающей среды. Но через некоторое время после закрытия крана за счет теплообмена с окружающей средой температура воздуха в баллоне повышается до температуры T_A , а давление в баллоне при этом повысится на величину избыточного давления ΔP_2 .

Состояние газа характеризуется температурой T_1 и давлением

$$P_3 = P_A + \Delta P_2.$$

Это состояние представлено точкой 3 на рис. 2. Таким образом, процесс перехода газа из состояния 1 в состояние 2 происходит адиабатически, а из состояния 2 в состояние 3 изохорически. Точки 1 и 3 диаграммы лежат на одной изотерме.

Адиабатическое расширение при переходе из состояния 1 в состояние 2 описывается уравнением Пуассона. Обычно в курсе общей физики оно выводится в виде:

$$PV^\gamma = const.$$

Используя уравнение Клапейрона-Менделеева его легко можно преобразовать следующим образом:

$$P_1 T_1^{\frac{\gamma}{1-\gamma}} = P_2 T_2^{\frac{\gamma}{1-\gamma}}. \quad (4).$$

Для изохорического процесса при переходе газа из состояния 2 в состояние 3 имеем:

$$\frac{P_2}{P_3} = \frac{T_2}{T_1}. \quad (5).$$

Из уравнений (4) и (5), исключив T_2/T_1 , получим:

$$\left(\frac{P_1}{P_2}\right)^{1-\gamma} = \left(\frac{P_2}{P_3}\right)^{\gamma}. \quad (6)$$

Данное соотношение можно переписать как:

$$\left(\frac{P_1}{P_2}\right)^{1-\gamma} = \left(\frac{P_3}{P_2}\right)^{-\gamma}. \quad (7)$$

Заменим P_1 , P_2 и P_3 на $P_1 = P_A + \Delta P_1$, $P_2 = P_A$, $P_3 = P_A + \Delta P_2$:

$$\left(\frac{P_A + \Delta P_1}{P_A}\right)^{1-\gamma} = \left(\frac{P_A + \Delta P_2}{P_A}\right)^{-\gamma}. \quad (8)$$

Преобразуем данное уравнение к виду:

$$\left(1 + \frac{\Delta P_1}{P_A}\right)^{1-\gamma} = \left(1 + \frac{\Delta P_2}{P_A}\right)^{-\gamma}. \quad (9)$$

Очевидно, что ΔP_1 и ΔP_2 много меньше P_A , и следовательно отношения $\Delta P_1/P_A$ и $\Delta P_2/P_A$ очень малые величины. В этом случае можно воспользоваться известным разложением в ряд функции вида, ограничившись первыми двумя членами разложения:

$$(1 + x)^m \approx 1 + mx.$$

В результате имеем:

$$1 + (1 - \gamma) \frac{\Delta P_1}{P_A} = 1 - \gamma \frac{\Delta P_2}{P_A}.$$

После несложных алгебраических преобразований получим соотношение для определения отношения C_p / C_v , называемого «постоянной адиабаты»:

$$\gamma = \frac{\Delta P_1}{\Delta P_1 - \Delta P_2} . \quad (10)$$

Учитывая также, что $\Delta P = \rho g \Delta h$, где Δh – разница высот столбиков воды в манометре, окончательно получаем:

$$\gamma = \frac{\Delta h_1}{\Delta h_1 - \Delta h_2} . \quad (11)$$

Историческая справка: Описанный метод определения постоянной адиабаты был предложен Николя Клеманом совместно с Шарлем-Бернаром Дезормом в 1819 году. В настоящее время работа по определению γ включена в программу практически всех высших учебных заведений нашей страны. На кафедре «Физика» МИИТ эта работа – одна из старейших, её история отчетливо прослеживается с 50-х годов прошлого века. В настоящее время в учебных лабораториях Дома физики представлено четыре типа установок для выполнения работы; особенности проведения измерений на каждой из них описаны ниже.

Методика выполнения работы

Методика выполнения лабораторной работы практически одинакова на всех четырёх типах установок.

В начале опыта при закрытом кране надо подкачивать воздух в баллон до тех пор пока разность уровней в коленях манометра не достигнет 25 – 30 см. Примерно через 2 – 3 минуты, когда температура воздуха в баллоне сравняется с температурой окружающей среды и давление в баллоне стабилизируется, по манометру определяется избыточное давление ΔP_1 . *Стабилизация давления определяется по прекращению движения столбов жидкости в манометре.*

Внимание! Если стабилизации не происходит и столбы продолжают двигаться, что возможно при наличии неконтролируемого натекания воздуха в систему, необходимо прекратить работу и обратиться к лаборанту или преподавателю.

Избыточное давление ΔP_1 отсчитывается по разности уровней Δh_1 в коленях манометра (Δh_1 пропорционально ΔP_1). При этом газ находится в состоянии 1 (см. рис. 2). Затем кран открывают, соединяя баллон с атмосферой и, дождавшись, когда воздух перестанет выходить из баллона (газ переходит в состояние 2), кран закрывают. **Момент закрытия крана определяется по выравниванию уровней столбов жидкости в U-образном манометре**, в этот момент давление в баллоне становится равным атмосферному. Время, прошедшее от выравнивания столбов жидкости до закрытия крана, должно быть минимальным.

Через некоторое время (около 2 – 3 минут) благодаря теплообмену температура в баллоне повышается до комнатной. **Давление в баллоне при этом еще раз стабилизируем, и движение столбов жидкости прекратится.** Газ перейдет в состояние 3 (см. рис. 2), и в этот момент нужно измерить разность уровней Δh_2 (Δh_2 пропорционально ΔP_2). Полученные показания Δh_1 и Δh_2 следует занести в таблицу 1.

Таблица 1

Измеряемые и расчётные величины	Номер опыта									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Δh_1										
Δh_2										
$\Delta h_1 - \Delta h_2$										
γ										

Опыт повторить десять раз.

Описание экспериментальных установок и порядок проведения измерений

Установка № 1 (со стеклянным баллоном)

Это установка, функционирующая с 50-х годов XX-го века, одна из старейших в лаборатории. Ее схема была приведена на рис. 1; фотография самой установки представлена на рис. 3.

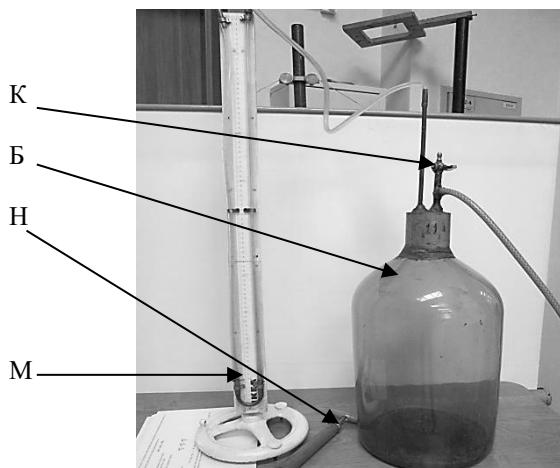


Рис. 3

- 1) Закройте кран (К) – вентиль крана должен встать горизонтально.
- 2) Подкачайте воздух в баллон (Б) с помощью ручного насоса (Н) так, чтобы разность уровней воды в U-образном манометре (М) составила около 30 см. **Следите за тем, чтобы вода не перелилась через верхний край трубки.**
- 3) Дождитесь стабилизации разности уровней воды в коленях манометра и проведите измерения Δh_1 . Занесите полученные результаты в таблицу 1.
- 4) Откройте кран (К): вентиль крана должен встать вертикально.
- 5) Дождитесь момента, когда уровни воды в коленях сравня-

ются, и *быстро закройте кран*. (Время ожидания может варьироваться от установки к установке в зависимости от величины выпускного отверстия).

6) Дождитесь прекращения движения столбов воды и, следовательно, – стабилизации давления. Проведите измерения Δh_2 и занесите полученный результат в таблицу 1.

7) Повторите измерения по п.п. 1 ÷ 6 не менее 10 раз, стараясь выставить близкие значения величины Δh_1 .

Установка № 2 (в металлическом корпусе, производство мастерских МЭИ)

Фотография установки приведена на рис. 4.

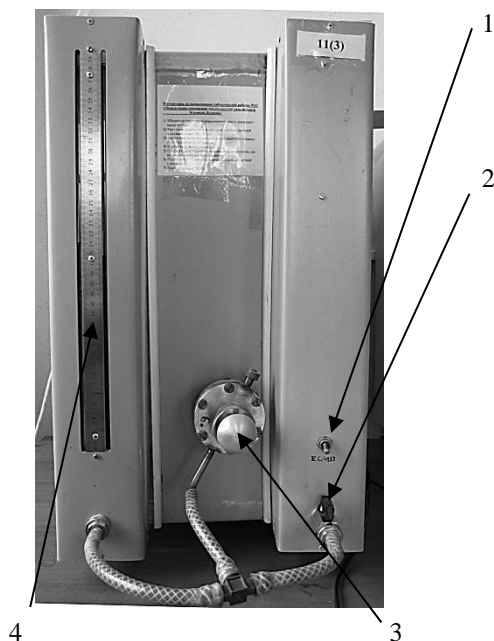


Рис. 4

Установка снабжена насосом с электроприводом, который включается и выключается тумблером 1. Подача воздуха в баллон перекрывается с помощью крана 2. Для выпуска воздуха предназначен специальный клапан (3). Он открывается нажатием, а если перестать на него давить, – закрывается. Металлический баллон для газа находится внутри корпуса, в который встроены также трубки U-образного манометра 4: они хорошо видны через специальные прорези. *(При плохой видимости трубки можно подсветить фонариком мобильного телефона).*

1) Откройте кран (2): вентиль крана должен встать вдоль подводящей трубки.

2) Подкачайте воздух в баллон. Для этого включите электрический насос выключателем (1). Поднимите давление в баллоне так, чтобы разность уровней воды в U-образном манометре (4) составила около 30 см. ***Следите за тем, чтобы вода не перелилась через верхний край трубки.***

3) Отключите насос тумблером (1) и перекройте кран (2): вентиль крана должен встать перпендикулярно подводящей трубке.

4) Дождитесь стабилизации разности уровней воды в коленях манометра и проведите измерения Δh_1 . Занесите полученные результаты в таблицу 1.

5) *Нажатием* откройте выпускной клапан (3).

6) Дождитесь момента, когда уровни воды в коленях сравняются, и *быстро отпустите* клапан. (Время ожидания может варьироваться от установки к установке.)

7) Дождитесь прекращения движения столбов воды и, следовательно, – стабилизации давления. Проведите измерение Δh_2 и занесите полученный результат в таблицу 1.

8) Повторите измерения по пп. 1 ÷ 7 не менее 10 раз, стараясь выставить близкие значения величины Δh_1 .

Установка № 3 (ФПТ1-6)

Фотография экспериментальной установки ФПТ1-6, представлена на рис. 5.

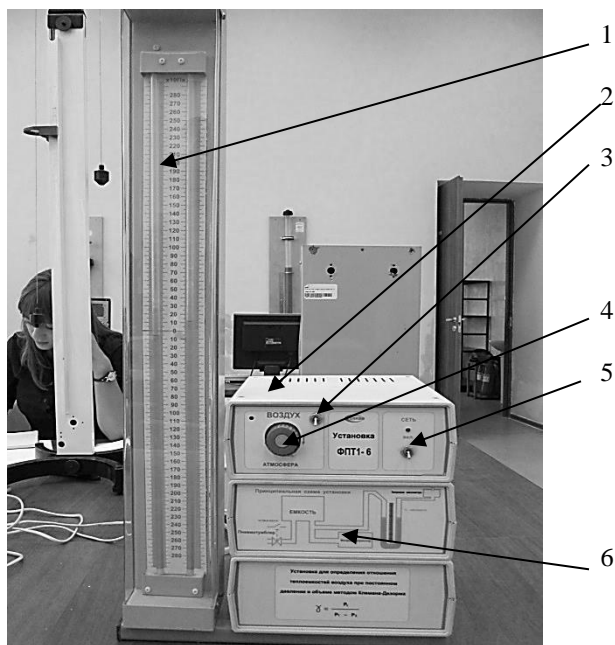


Рис. 5

Установка состоит из стеклянной колбы, соединённой с открытым вертикальным водяным манометром (1). Воздух нагнетается в колбу микрокомпрессором, размещённым в блоке рабочего элемента (2). Микрокомпрессор включается тумблером «Воздух» (3), расположенным на передней панели блока рабочего элемента. Пневмотумблер «Атмосфера» (4), расположенный на передней панели блока рабочего элемента, в положении «Открыто» позволяет соединять колбу с атмосферой. Тумблер «Сеть вкл» (5) предназначен для подключения установки к электросети. На передней панели рабочего блока изображена блок-схема установки (6), позволяющая лучше представить функциональное назначение ее элементов.

1) Включите установку тумблером «Сеть вкл.» (5). При этом начинает светиться светодиод над тумблером.

2) Убедитесь, что пневмотумблер «Атмосфера» (4) находится в положение «Закрыто». При исправной установке он автоматически переводится в это положение пружинным механизмом.

3) Для подачи воздуха в колбу включите тумблер «Воздух» (3).

4) По изменению уровней воды в коленях манометра контролируйте давление в колбе. Когда разность уровней воды в манометре достигнет значения $\Delta h_1 = 150 \div 250$ мм, отключите тумблер «Воздух» (3). **Следите за тем, чтобы вода не перелилась через верхний край трубки.**

5) Подождите 2-3 минуты, пока температура воздуха в колбе T_1 сравняется с температурой окружающего воздуха T_A , то есть дождитесь стабилизации разности уровней воды в коленях манометра. При этом в колбе установится постоянное давление $P_1 = P_A + \rho g \Delta h_1$. Определите разность уровней Δh_1 , окончательно установившуюся в коленях манометра, и внесите её значение в таблицу 1.

6) На короткое время соедините колбу с атмосферой, установив пневмотумблер «Атмосфера» (4) в положении «Открыто». Для этого поверните ручку тумблера по часовой стрелке до щелчка и отпустите. *При этом наблюдайте как уровни воды в коленях манометра сравняются.* В положение «Закрыто» пневмотумблер «Атмосфера» возвращается автоматически пружиной. В случае необходимости его можно довести в положение «закрыто» в ручном режиме.

7) Через две - три минуты, когда в колбе установится постоянное давление $P_3 = P_A + \rho g \Delta h_2$, **(дождитесь стабилизации разности уровней воды в коленях манометра)** определите разность уровней Δh_2 , установившуюся в коленях манометра, и внесите её значение в таблицу 1.

8) Повторите измерения по п.п. 3 ÷ 7 не менее 10 раз, стараясь выставить близкие значения величины Δh_1 .

9) По окончании работы выключите установку тумблером «Сеть вкл» (5).

Установка № 4 (ФПТ1-6н)

Фотография экспериментальной установки ФПТ1-6н, представлена на рис. 6.

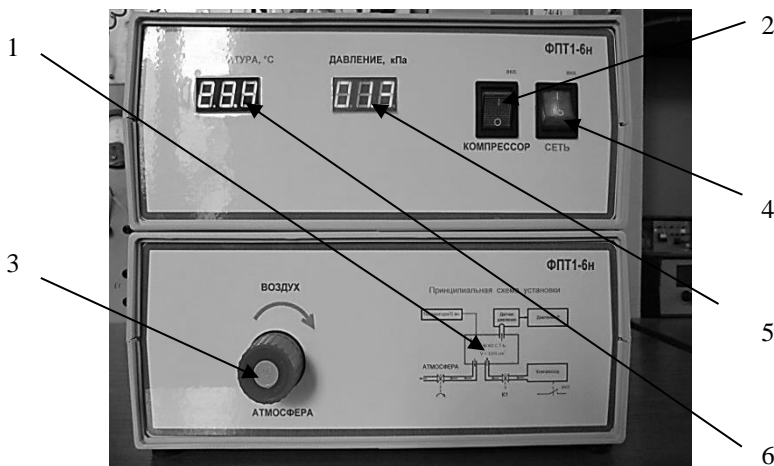


Рис. 6

На передней панели рабочего блока изображена схема установки (1), позволяющая лучше представить функциональное назначение её элементов. Данная установка отличается от предыдущих моделей тем, что она имеет встроенные датчики давления и температуры. Обработка данных производится встроенным микроконтроллером, и полученные результаты выводятся на переднюю панель устройства сразу в цифровом виде (U-образный манометр, изображённый на рис. 1, здесь не нужен). Воздух нагнетается в баллон не ручным насосом, а компрессором, который включается тумблером «Компрессор» (2) – см. рис. 6.

Пневмотумблер «Атмосфера» (3), расположенный на передней панели блока рабочего элемента, в положении «Открыто» позволя-

ет соединять колбу с атмосферой. Тумблер «Сеть вкл.» (4) предназначен для подключения установки к электросети. Измеренное давление в колбе в цифровом виде высвечивается на индикаторе «Давление, кПа» (5), а температура в баллоне – на индикаторе «Температура, °C» (6).

1) Включите установку тумблером «Сеть вкл.» (4). При этом начинает светиться светодиод внутри тумблера, индикатор «Температура, °C» (6) показывает температуру внутри баллона, а индикатор «Давление, кПа» (5) **показывает избыток давления внутри баллона над атмосферным.** В начальный момент индикатор «Давление, кПа» должен показывать «00,0», а индикатор «Температура, °C» – температуру в баллоне и внутри блока.

2) Убедитесь, что пневмотумблер «Атмосфера» (3) в положение «Закрыто». При исправной установке он автоматически переводится в это положение пружинным механизмом.

3) Для подачи воздуха в колбу включите тумблер «Компрессор» (2). При этом должен послышаться характерный шум работающего компрессора. *Если этого не происходит, обратитесь к лаборанту или преподавателю.*

4) Следите за тем, как поднимается давление в колбе, и при достижении нужного значения выключите компрессор тумблером «Компрессор» (2). **(Внимание! Максимально возможное избыточное давление 10,3 кПа.)** Установите давление близкое к максимально возможному. Наблюдайте за изменением температуры в колбе по индикатору «Температура, °C».

5) Подождите 2-3 минуты, дождитесь стабилизации показаний индикатор «Давление, кПа», и внесите значение ΔP_1 в таблицу 2.

6) На *короткое время* соедините колбу с атмосферой, установив пневмотумблер «Атмосфера» (3) в положении «Открыто». Для этого поверните ручку тумблера по часовой стрелке до щелчка и отпустите. *При этом наблюдайте как показания индикатора «Давление, кПа» станут равными нулю.* В

положение «Закрото» пневмотумблер «Атмосфера» возвращается автоматически пружиной. В случае необходимости его можно довести в положение «закрото» в ручном режиме.

7) Подождите 2-3 минуты, дождитесь стабилизации показаний индикатора «Давление, кПа», и запишите значение ΔP_2 в таблицу 2.

Таблица 2

Измеряемые и расчётные величины	Номер опыта									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ΔP_1										
ΔP_2										
$\Delta P_1 - \Delta P_2$										
γ										

8) Повторите измерения по пп. 2 ÷ 7 не менее 10 раз, стараясь выставить близкие значения величины давления.

9) По окончании работы выключите установку тумблером «Сеть вкл» (4).

Обработка результатов измерений

1. Вычислите γ по формуле (11) при работе с установками № 1 ÷ № 3 или по формуле (10) при работе с установкой № 4, внесите их значения последние строки таблиц 1 и 2, соответственно.

2. Вычислите среднее арифметическое $\langle \gamma \rangle$ для всех полученных значений γ_i по формуле:

$$\langle \gamma \rangle = \frac{\sum_{i=1}^n \gamma_i}{n}.$$

3. Вычислите величину среднего квадратичного отклонения S по формуле:

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\gamma_i - \langle \gamma \rangle)^2}{n(n-1)}},$$

где n – число измерений.

4. Найдите абсолютную погрешность измерений:

$$\Delta\gamma = \alpha S,$$

где α – коэффициент Стьюдента, определяемый по таблице, приведённой в работе [4] и на информационном стенде лаборатории.

Доверительная вероятность задается преподавателем.

Результат запишите в виде:

$$\gamma = \langle \gamma \rangle \pm \Delta\gamma.$$

5. Оцените относительную погрешность полученного значения γ по формуле:

$$\delta\gamma = (\Delta\gamma / \langle \gamma \rangle) \cdot 100\%.$$

Полученное значение $\langle \gamma \rangle$ сравните с теоретическим значением, вычисленным по формуле (3), рассматривая воздух как двухатомный идеальный газ.

Контрольные вопросы

1. Какой процесс изменения состояния газа называется изотермическим, изобарическим, изохорическим и адиабатическим? Нарисуйте графики этих процессов.

2. Сформулируйте первый закон термодинамики. Запишите этот закон для изотермического, изобарического, изохорического и адиабатического процессов.

3. Дайте определение удельной и молярной теплоемкостей. В каких единицах СИ они измеряются?

4. Приведите формулы расчёта молярных теплоёмкостей C_V и C_p для одно-, двух-, трёх- и многоатомных идеальных газов.

5. Что называется числом степеней свободы молекулы и чему оно равно для одно-, двух-, трёх- и многоатомных идеальных газов?

6. Рассчитайте теоретическое значение γ для одно-, двух-, трёх- и многоатомных идеальных газов.

7. В чем заключается метод Клемана и Дезорма для определения отношения C_p/C_v ?

8. Опишите рабочий цикл и изменения состояния воздуха по диаграмме P - V , приведённой на рис. 2.

9. Как изменяется температура газа при адиабатическом расширении и адиабатическом сжатии и почему?

10. Запишите формулу для расчета изменения внутренней энергии идеального газа.

11. Объяснить различие между рассчитанными теоретически и полученными экспериментально значениями γ .

12. Объясните, почему теплоемкость газа при постоянном давлении больше теплоемкости газа при постоянном объеме.

13. Запишите уравнение Майера и поясните смысл входящих в него параметров.

14. Запишите уравнение Пуассона для адиабатического процесса и поясните смысл входящих в него параметров.

Список литературы

1. Савельев И. В. Курс общей физики в 3-х томах. Т. 2. – СПб.: Лань, 2016. – 480 с. <http://library.miit.ru>, <http://e.lanbook.com>

2. Детлаф А.А., Яворский Б.М., Курс физики. – М.: Академия, 2015. – 720 с. <http://library.miit.ru>, ЭБС «Академия».

3. Трофимова Т.И. Курс физики. – М.: Академия, 2016. – 560 с. <http://library.miit.ru>, ЭБС «Академия».

4. Андреев А.И., Селезнёв В.А., Тимофеев Ю.П. Вводное занятие в лабораториях кафедры физики / Под ред. проф. В.А. Никитенко. Методические указания. – М.: МИИТ, 2017. – 40 с.