

Лабораторная работа

Определение отношения теплоемкости газа методом Клемана – Дезорма.

Оборудование: манометр, баллон, трубки с краником, насос.

Цель работы:

1) Изучение теории метода Клемана – Дезорма, применяемого для определения отношения теплоемкостей газа. Для этого студент должен владеть знаниями о следующих понятиях и законах:

Физические объекты и явления	Физические величины	Законы
Идеальный газ	Давление	Закон Бойля – Мариотта
Изотермический процесс	Термодинамическая температура	Закон Гей – Люссака
Изохорический процесс	Внутренняя энергия	Закон Шарля
Изобарический процесс	Изменения внутренней энергии	Уравнение Менделеева - Клайперона
Адиабатический процесс	Работа газа	Уравнение Пуассона
Теплообмен	Количество теплоты	Первый закон термодинамики
	Теплоёмкость	Уравнения Майера

2) Экспериментальное определение отношения теплоемкости воздуха $\gamma = \frac{C_p}{C_v}$

Теория

1.1. **Идеальным газом** называется газ, в котором:

- а) отсутствуют силы межмолекулярного взаимодействия, т.е. молекулы не притягиваются и не отталкиваются друг от друга;
- б) взаимодействие молекул происходит только при их соударениях и является упругим;
- в) молекулы газа не имеют объема, т.е. представляют собой материальные точки;

уравнение состояния газа называется соотношением, связывающие четыре параметра газового состояния: давление P , объем V , температуру T и массу m .

Для любого числа $\nu = \frac{m}{M}$ молей газа справедливо уравнение Клайперона –

Менделеева:
$$PV = \frac{m}{M} RT, \quad (1)$$

где M – молярная (молекулярная) масса газа; $R = 8,31$ Дж/К*моль – универсальная Газовая постоянная.

1.2. Основные газовые законы.

1.2.1. **Закон Бойля – Мариотта:** Для данной массы газа m при постоянной температуре T произведение давления P на объем V есть величина постоянная, т.е.: $PV = \text{const}$, или на основании (1)

$$PV = \frac{mRT}{M}$$

Процесс в газе, происходящий при постоянной температуре, называется изотермическим, а его график – изотермой (рис 1).

1.2.2. **Закон Гей – Люссака:** Для данной массы газа m при постоянном давлении P объем V линейно зависит от температуры по закону:

$$V_t = V_0(1 + \alpha t^0), \text{ или на основании (1)} \quad V = \frac{Rm}{MP} T,$$

где V_0 – объем газа при 0°C ;

α - коэффициент объёмного расширения;

t^0 – температура по шкале Цельсия;

T – абсолютная температура; $T = t^0 + 273$

Процесс в газе, происходящий при постоянном давлении, называется изобарическим, а его график – изобарой (рис 2).

1.2.3. **Закон Шарля:** Для данной массы газа m при постоянном объеме V давление P линейно зависит от температуры по закону:

$$P_t = P_0(1 + \beta t^0), \text{ или на основании (1)} \quad P = \frac{mR}{MV} T$$

где P_0 – давление газа при 0°C ;

β - термический коэффициент давления

Процесс, в газе, происходящий при постоянном объеме, называется изохорическим, а его график – изохорой (рис 3)

1.3. Основы термодинамики.

1.3.1. Внутренняя энергия

Все вещества состоят из молекул и атомов. Все молекулы находятся в непрерывном хаотическом движении, которое называется тепловым. Кроме того, молекулы взаимодействуют между собой, т.е. притягиваются или отталкиваются, сохраняя форму или объем. Движение молекул означает, что каждая молекула обладает кинетической энергией. Взаимодействие молекул означает, что каждая из них обладает некоторой потенциальной энергией. Сумма кинетической энергии хаотического движения всех молекул тела и

потенциальной энергии их взаимодействия называется внутренней энергией тела U :

$$U = \sum_{i=1}^N W_{кин,i} + \sum_{i=1}^N W_{пот,i}, \quad (2)$$

где i – номер молекулы от 1 до N .

Вообще говоря, внутреннюю энергию произвольного тела подсчитать точно нельзя, т.к. мы не можем точно узнать ни число молекул, ни их кинетическую, и, особенно, потенциальную энергию в конкретный момент времени.

Однако оказалось в большинстве случаев важно знать не саму внутреннюю энергию, а её изменение ΔU :

$$\Delta U = U_{конечн.сост.} - U_{начал.сост.}$$

На основании закона сохранения энергии можно утверждать, что изменение внутренней энергии тела всегда связано с его взаимодействием с другими телами и с окружающей средой.

1.3.2. Изменение внутренней энергии.

Существуют два способа изменения внутренней энергии тела:

1) Совершение работы. Например, сжатие или растяжение тела, перемещение его по шероховатой поверхности или в вязкой среде. Во всех случаях, движущееся или деформируемое тело нагревается, т.е. увеличивается кинетическая энергия молекул и следовательно и внутренняя энергия. Увеличение внутренней энергии тела происходит за счет того что какое то другое тело совершает механическую работу над данным телом. Передача энергии от данного тела к другому путем совершения работы одного тела над другим всегда необходима связана с изменением внешних условий, с перемещением тела в целом или его отдельных макроскопических частей. Величина работы определяет количество энергии, перешедшей от одного тела к другому в процессе перемещения (движения). Если бы данное тело совершало бы работу над другими телами, то его внутренняя энергия должна была бы уменьшиться. Такая ситуация реализуется, например, при расширении газа. Расширяясь, газ может переместить какое-то тело, например, поршень в цилиндре, и тем самым совершить работу по перемещению этого тела. Работа ΔA , совершаемая газом при очень малом расширении газа, определяется формулой:

$$\Delta A = p \Delta V, \quad (3)$$

где P – давление газа;

ΔV – изменение объёма газа при расширении.

1) Нагревание тела (без совершения над ним работы).

Например, нагревание газа в закрытом сосуде, нагревание жидкости или твердого тела.

Обмен внутренней энергии между телами и окружающей средой или между частями тела без совершения механической работы называется теплообменом.

Физическую величину, определяющую количество энергии, переданной от одного тела при теплообмене, называют количеством теплоты Q .

Количество теплоты измеряют в единицах энергии – Дж.

Т.о. количество теплоты Q является мерой изменения внутренней энергии тел в процессе теплообмена и существенно зависит от рода процесса. Это означает, что о количестве теплоты можно говорить только в связи с каким – либо процессом (нагревание, плавление, парообразование). Когда же тело находится в каком-то определенном состоянии, то ни о каком количестве теплоты в теле речи быть не может. В этом случае можно говорить лишь о внутренней энергии тела.

Для подсчета количества теплоты при нагревании тел пользуются эмпирической формулой:

$$Q = mc(T_{\text{кон}} - T_{\text{нач}}) \quad (4) \quad \text{или} \quad Q = \nu C^{\text{мол}}(T_{\text{кон}} - T_{\text{нач}}), \quad (4')$$

где m – масса нагреваемого вещества;

c – удельная теплоёмкость вещества;

$C^{\text{мол}}$ – молярная теплоёмкость вещества.

1.3.3. Первый закон термодинамики.

Закон сохранения энергии для тепловых процессов формулируется как первый закон термодинамики.

Количество теплоты Q , переданное системе, идет на изменение внутренней энергии ΔU системы и совершение системой работы A :

$$Q = \Delta U + A \quad (5)$$

Внутренняя энергия является функцией состояния системы и для данного состояния имеет вполне определенное значение ; ΔU есть разность двух значений внутренней энергии, соответствующих конечному и начальному состоянию системы.

Количество теплоты, как и работа, является функцией процесса, а не состояния. И количество теплоты, и работу нельзя выразить в виде разности двух значений какого – либо параметра в конечном и начальном состояниях, т.к. они не сохраняются. В связи с этим количество теплоты Q и работы A в (5) записаны без знака приращения Δ .

Значения Q , A , ΔU могут быть как положительными (теплота передается системе внешними телами, внутренняя энергия увеличивается, газ расширяется), так и отрицательными (теплота отнимается от системы, внутренняя энергия уменьшается, газ сжимается).

1.4. Применение первого закона термодинамики к изопроцессам в идеальном газе.

1.4.1 Изотермический процесс

Т.к. температура газа постоянна, то постоянна и его внутренняя энергия:

$$U = \text{const}, \text{ следовательно } \Delta U = 0.$$

Согласно первому закону термодинамики теплота Q , передаваемая газу, полностью затрачивается на совершение газом работы A над внешними телами:

$$Q = A$$

1.4.2. Изохорический процесс

Т.к. объём газа постоянен, следовательно, $\Delta V = 0$, т.е. согласно (3) $\Delta A = P \Delta V = 0$.

Т.о., при нагревание, газ не совершает работу над внешними телами.

Из уравнения (5) следует, что $Q = \Delta U$, т.е. при изохорическом процессе вся подводимая к газу теплота Q затрачивается на увеличение внутренней энергии ΔU газа.

1.4.3 Изобарический процесс.

Согласно первому закону термодинамики, теплота Q , переданная газу при изобарическом процессе, затрачивается на увеличение его внутренней энергии ΔU и совершении работы A над внешними телами:

$$Q_p = \Delta U + A$$

1.4.4 Адиабатический процесс.

Этот процесс протекает без теплообмена с окружающей средой, т.е. при $Q=0$. В этом случае уравнение первого закона термодинамики примет вид:

$$A = -\Delta U$$

Это означает, что при адиабатическом процессе система может выполнять работу над внешними телами только за счет своей внутренней энергии:

$$\Delta U = -A \text{ или } A = -\Delta U$$

В первом случае газ под действием внешних сил адиабатно сжимается. При этом газ нагревается, а его внутренняя энергия увеличивается. Во втором случае газ, адиабатно расширяясь, совершает работу. При этом газ охлаждается и его внутренняя энергия уменьшается.

1.5 Теплоемкость.

1.5.1 Теплоемкостью какого-либо тела называется величина, равная количеству теплоты, которое необходимо сообщить телу, чтобы повысить его температуру на 1°C :

$$C = \frac{\Delta Q}{\Delta T} \quad (6)$$

Удельной теплоемкостью c данного вещества называется количество теплоты, необходимое для нагревания единицы массы данного вещества на 1°C .

Молярной теплоемкостью μ данного вещества называется количество теплоты, необходимое для нагревания одного моля данного вещества на 1°C .

Используя пункт 1.4.2. и (4) найдем теплоемкость для изохорического процесса:

$c_v m \Delta T = \Delta Q_v = \Delta U$ (7), откуда $c_v = \frac{\Delta U}{\Delta T}$, где c_v – удельная теплоемкость при $V = \text{const}$. Она характеризует процесс нагревания газа в закрытом сосуде.

Используя пункт 1.4.3. и (4) найдем теплоемкость для изобарического процесса:

$c_p m \Delta T = \Delta Q_p = \Delta U + \Delta A$ (8), откуда $c_p = \frac{\Delta Q}{\Delta T}$, где c_p – удельная теплоемкость при $p = \text{const}$.

Изобарическое нагревание сопровождается расширением газа, при котором он совершает работу.

Сравнивая значения c_v и c_p в (7),(8) мы видим, что удельная теплоемкость c_p превосходит теплоемкость c_v на величину работы расширения газа при $p = \text{const}$.

Теплоемкости $c_p = c_v + R$ или $c_p - c_v = R$

Для идеального газа c_p и c_v имеют вид:

$$c_p = \frac{i+2}{2}R, \quad c_v = \frac{i}{2}R, \quad \text{где } i - \text{число степеней свободы молекул газа.}$$

1.5.2. Уравнение Пуассона.

Оно справедливо для адиабатического процесса, т.е. процесса происходящего без теплового обмена с внешней средой. График этого процесса изображен на рис.4.

$$PV^\gamma = const, \quad \text{где } \gamma = \frac{c_p^{Мол}}{c_v^{Мол}}$$

показывает степени отклонения адиабатического процесса от изотермического.

Практическая часть

Прибор Клемана - Дезорма состоит (рис.5) из стеклянного баллона А, соединенного с ним ручного воздушного насоса Н через кран К₁, крана К₂ и водяного манометра М.

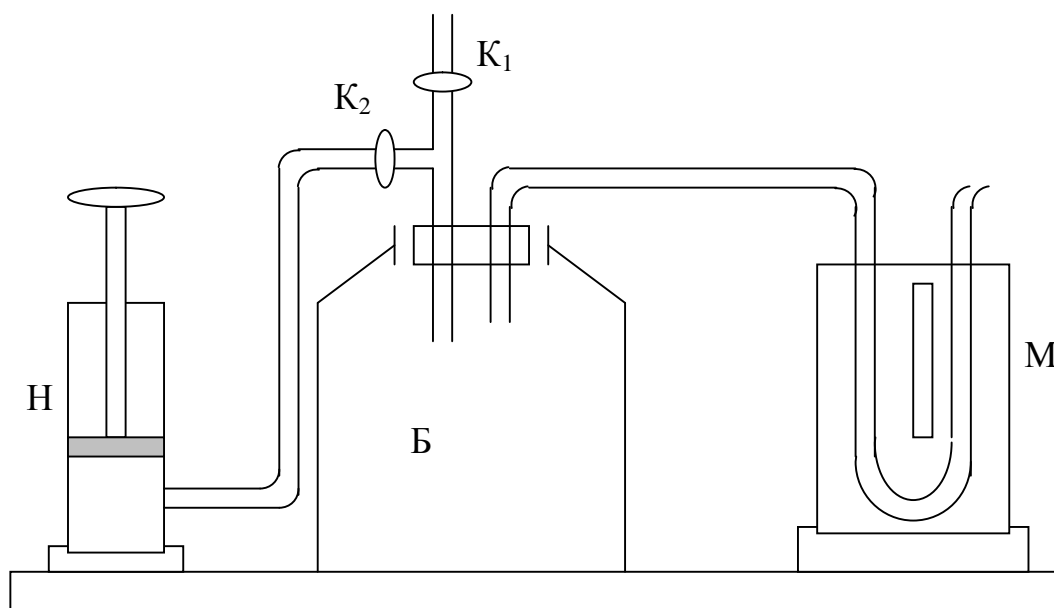


Рис.5

Посредством крана К₂ может соединяться с атмосферой, и пусть первоначально в нем было атмосферное давление p_0 . Если закрыть кран К₂ и с помощью насоса накачать в сосуд небольшое количество воздуха, то давление в сосуде повысится; но если это повышение было произведено достаточно быстро, манометрический столбик не сразу займет окончательное положение, т.к. сжатие воздуха было адиабатическим и следовательно, температура его повысилась. Окончательная разность уровней в манометре Н₁ установится только тогда, когда температура воздуха внутри сосуда сравняется благодаря теплопроводности стенок с температурой окружающего воздуха. В этом случае давление P_1 в баллоне будет равно:

$$P_1 = P_0 + \rho g H_1 ,$$

где ρ - плотность жидкости в манометре. Величина H_1 измеряется манометром.

Если теперь быстро открыть кран K_2 , то воздух в сосуде будет расширяться адиабатически, пока давление его не сравняется с атмосферным давлением: $P_2 = P_0$.

При этом воздух охладится до некоторой температуры. Если сразу после выравнивания давления вне и внутри сосуда вновь закрыть кран K_2 , то давление внутри сосуда начнет возрастать вследствие того, что охладившийся при расширении воздух в сосуде станет снова нагреваться. Возрастание давления прекратится, когда температура воздуха в сосоуде сравняется с внешней температурой. В этом случае давление воздуха в сосуде будет равно:

$$P_3 = P_0 + \rho g H_2 ,$$

где H_2 – разность уровней жидкости в манометре.

Используя математические выкладки для определения $\gamma = \frac{c_p}{c_v}$ мы получим:

$$\gamma = \frac{H_1}{H_1 - H_2} \quad (9)$$

Порядок выполнения работы

1. Приступая к работе ознакомьтесь с установкой и получите разрешение преподавателя на работу.
2. Откройте краны K_1 и K_2 . При этом разность уровней жидкости в манометре будет равна нулю.
3. Закройте кран K_2 и накачайте насосом в сосуд воздух так, чтобы разность верхнего и нижнего уровней жидкости в манометре была как можно больше. Закройте кран K_1 . Снимите показания H_1 , равное установившейся разности уровней жидкости в коленах манометра, и определите его погрешность ΔH_1 . Занесите их в таблицу 1.
4. Откройте кран K_2 и, как только уровни жидкости в манометре уравниваются, закройте его.
5. Дождитесь пока разность уровней жидкости в манометре перестанет расти. Максимальное значение разности уровней жидкости является значение H_2 . Запишите это значение и определите его погрешность ΔH_2 .
6. По формуле (9) определите отношение γ . Определите погрешность $\Delta \gamma$ по формуле:

$$\Delta \gamma = \gamma \left(\frac{\Delta H_1}{H_1} + \frac{\Delta H_1 + \Delta H_2}{H_1 - H_2} \right) \quad \text{результат занесите в таблицу 1.}$$

Таблица 1.

H_1	ΔH_1	H_2	ΔH_2	$\langle \gamma \rangle$	$\langle \Delta \gamma \rangle$	γ

7. Повторите измерения и расчеты несколько (7-8) раз.
8. Найдите среднее значение $\langle \gamma \rangle$ по всем измерениям.
9. Найдите средние значения $\langle \Delta\gamma \rangle$ по всем измерениям.
10. Найденное вами значение γ запишется в виде: $\gamma = \langle \gamma \rangle \pm \langle \Delta\gamma \rangle$
11. Найдите относительную погрешность результата: $\frac{\langle \Delta\gamma \rangle}{\langle \gamma \rangle} 100\%$

Контрольные вопросы.

1. Назовите основные параметры газа и запишите соотношения между ними.
2. Что такое теплоемкость газа?
3. Какова связь между C_p и C_v ? Почему c_p больше c_v ?
4. Как изменяется температура газа при адиабатическом процессе?
5. Что происходит с внутренней энергией газа при адиабатическом процессе?
6. Почему процесс, происходящий в баллоне, при открытии крана может считаться адиабатическим ?

Литература

1. Б.М.Яворский и А.А.Детлаф “Справочник по физике”, 1977
2. В.И.Иверонова “Физический практикум”, 1962
3. А.Н.Ремизов “Медицинская и биологическая физика”, 1987
4. А.С.Шубин “Курс общей физики”, 1976
5. Е.И.Бутиков, А.А.Быков, А.С.Кондратьев “Физика”, 1982
6. Л.С.Жданов “ Учебник по физике”, 1978
7. Н.И.Карякин, К.Н.Быстров, П.С. Киряев “Краткий справочник по физике”, 1964
8. А.С. Шубин “Курс общей физики”, ч.2,п. 1-6
9. Р.И. Грабовский “Курс общей физики”, п. 69-70
10. А.В.Кортнев “Практикум по физике”, стр. 110-113
11. В.И.Иверонова “Физический практикум”, стр. 123-127