

Ю. В. Тихомиров

ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ

по курсу физики

С КОМПЬЮТЕРНЫМИ МОДЕЛЯМИ

(МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА И ТЕРМОДИНАМИКА)

*для студентов всех специальностей
всех форм обучения*

МОСКВА - 2010

Ю. В. Тихомиров

Лабораторные работы по курсу физики с компьютерными моделями (молекулярная физика и термодинамика).

Учебное пособие для студентов высших технических учебных заведений дневной, вечерней и заочной (дистанционной) форм обучения. М., 2010. 30 с.

СОДЕРЖАНИЕ

| | |
|---|-----------|
| <u>ВВЕДЕНИЕ.....</u> | <u>4</u> |
| <u>1. ДОПУСК К ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ.....</u> | <u>5</u> |
| <u>2. ОФОРМЛЕНИЕ КОНСПЕКТА для ДОПУСКА к ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ.....</u> | <u>5</u> |
| <u>3. ОФОРМЛЕНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ К ЗАЧЕТУ.....</u> | <u>6</u> |
| <u>4. МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА и ТЕРМОДИНАМИКА.....</u> | <u>8</u> |
| <u>4_1. АДИАБАТИЧЕСКИЙ ПРОЦЕСС.....</u> | <u>8</u> |
| <u>4_2. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ МАКСВЕЛЛА.....</u> | <u>13</u> |
| <u>4_3. ДИФФУЗИЯ В ГАЗАХ.....</u> | <u>18</u> |
| <u>4_4. УРАВНЕНИЕ СОСТОЯНИЯ ГАЗА ВАН-ДЕР-ВААЛЬСА</u> | <u>24</u> |
| <u>НЕКОТОРЫЕ ПОЛЕЗНЫЕ СВЕДЕНИЯ.....</u> | <u>30</u> |

ВВЕДЕНИЕ

Данный сборник содержит описания к лабораторным работам, в которых используются компьютерные модели, разработанные компанией «Физикон».

Для начала работы необходимо дважды щелкнуть левой кнопкой мыши, когда ее маркер расположен над эмблемой сборника компьютерных моделей. Для молекулярной физики и термодинамики вы увидите следующую картинку:

Глава 3. Молекулярная физика и термодинамика

- 3.1. Броуновское движение
- 3.2. Кинетическая модель идеального газа
- 3.3. Диффузия газов
- 3.4. **Распределение Максвелла**
- 3.5. Полупроницаемая мембрана
- 3.6. Изотермический процесс
- 3.7. Изохорный процесс
- 3.8. Изобарный процесс
- 3.9. Испарение и конденсация
- 3.10. Изотермы реального газа
- 3.11. Работа газа
- 3.12. Адиабатический процесс
- 3.13. Теплоемкости идеального газа
- 3.14. Термодинамические циклы
- 3.15. Цикл Карно
- 3.16. Энтропия и фазовые переходы
- 3.17. Агрегатные состояния
- 3.18. Абсолютная температура

$E_0 = mc^2$

$F = \frac{\gamma_1 \gamma_2}{4\pi \epsilon_0 r^2}$

$C = q / U$

$I = \frac{E}{R + r}$

$T = 2\pi\sqrt{LC}$

$\Delta Q = \int^2 R \Delta t$

$\Delta U = E \Delta \epsilon$

$E = \mu R \ln \frac{E_0}{E_1}$

Чтобы просмотреть дальнейшие пункты содержания данного раздела, надо щелкать левой кнопкой мыши, установив ее маркер на кнопку со стрелкой вниз, расположенную в правом нижнем углу окна.

Установите маркер мыши над названием требуемой компьютерной модели и дважды быстро нажмите левую кнопку мыши. Перемещать окна можно, зацепив (нажав и удерживая левую кнопку) мышью заголовок окна (имеющий синий фон). Закрытие окна осуществляется нажатием кнопки с крестом в правом верхнем углу окна.

1. ДОПУСК К ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ

Для допуска:

- Каждый студент предварительно оформляет свой персональный конспект данной ЛР (см. соответствующие требования);
- Преподаватель индивидуально проверяет оформление конспекта и задает вопросы по теории, методике измерений, установке и обработке результатов;
- Студент отвечает на заданные вопросы (письменно в черновике конспекта или устно);
- Преподаватель допускает студента к работе и ставит свою подпись в конспекте студента (графа ДОПУСК в табличке на обложке).

2. ОФОРМЛЕНИЕ КОНСПЕКТА ДЛЯ ДОПУСКА К ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ

Конспект для допуска к ЛР готовится заранее на двойных листах из школьной тетради в клетку (4-5 двойных листов в зависимости от почерка).

Первая страница (обложка):

| Допуск | Измерения | Установка | Зачет |
|--------|-----------|-----------|-------|
| | | | |

Лабораторная работа N__
Название: ...

Выполнил:
студент группы _____
ФИО _____
Дата выполнения: _____
Дата сдачи: _____

Следующие страницы:

| | |
|---|---|
| <p>ЧЕРНОВИК</p> <p>(здесь и далее на этой стороне должны быть представлены все расчеты, включая расчетные формулы и подстановку числовых значений)</p> | <p><u>Цель работы:</u> (переписать полностью из описания).</p> <p><u>Краткая теория</u> (выписать основные формулы и пояснить каждый символ, входящий в формулу).</p> <p><u>Экспериментальная установка</u> (нарисовать чертеж и написать наименование деталей).</p> <p><u>Таблицы</u> (состав таблиц и их количество определить самостоятельно в соответствии с методикой измерений и обработкой их результатов).</p> <p><u>Оформление отчета</u> (переписать полностью из описания). Этот раздел в описании может иметь и другое название, например, «Обработка результатов и оформление отчета».</p> |
|---|---|

3. ОФОРМЛЕНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ К ЗАЧЕТУ

Полностью оформленная и подготовленная к зачету работа должна соответствовать следующим требованиям:

1. Выполнение всех **пунктов** раздела описания «Оформление отчета» (в черновике представлены все расчеты требуемых величин, заполнены чернилами все таблицы, построены все графики).
2. **Графики** должны удовлетворять всем требованиям, приведенным ниже.
3. Для всех величин в таблицах должна быть записана соответствующая единица измерения.
4. Записаны **выводы** по каждому графику (см. ниже шаблон).
5. Выписан **ответ** по установленной форме (см. ниже шаблон).
6. Записаны **выводы** по ответу (см. ниже шаблон).

ГРАФИК (требования):

- на миллиметровке или листе в клетку, размер не менее 1/2 тетрадного листа;
- на графике: оси декартовой системы, на концах осей – стрелки, символы величин, единицы измерения, 10^N ;
- на каждой оси – **РАВНОМЕРНЫЙ МАСШТАБ** (риски через равные промежутки, числа через равное количество рисок);
- под графиком – полное название графика **СЛОВАМИ**;
- на графике – экспериментальные и теоретические точки ярко;
- форма графика соответствует теоретической зависимости (не ломаная).

ВЫВОД по ГРАФИКУ (шаблон):

Полученный экспериментально график зависимости _____ от _____ от
название функции словами
_____ имеет вид (прямой, прямой, проходящей через начало координат,
название аргумента
параболы, гиперболы, плавной кривой) и качественно совпадает с теоретической зависимостью этих характеристик, имеющей вид _____ .
формула

ОТВЕТ: По результатам измерений и расчетов получено значение _____ , равное _____ = (_____ \pm _____) $\cdot 10$ —
название физической характеристики символ среднее ошибка степень ед. измер

ВЫВОД по ОТВЕТУ (шаблон):

Полученное экспериментально значение величины _____ ,
полное название словами
равное _____ , с точностью до ошибки измерений,
число, единица измерения
составляющей _____ , (совпадает, не совпадает) с (табличным,
число, единица измерения
теоретическим) значением этой характеристики, равным _____ .
число, единица измерения

4. МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА и ТЕРМОДИНАМИКА

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА

4_1. АДИАБАТИЧЕСКИЙ ПРОЦЕСС

Ознакомьтесь с теорией в конспекте и учебнике [1, 2]. Запустите программу компьютерного моделирования. Выберите «Глава 3. Термодинамика и молекулярная физика», «Модель 3.12. Адиабатический процесс». Прочитайте теорию и оформите конспект лабораторной работы.

ЦЕЛЬ РАБОТЫ

- Знакомство с адиабатическим процессом в идеальном газе и его компьютерной моделью.
- Экспериментальное подтверждение закономерностей адиабатического процесса.
- Экспериментальное определение показателя адиабаты, количества степеней свободы и структуры молекул газа в данной модели.

КРАТКАЯ ТЕОРИЯ

СОСТОЯНИЕ системы имеет фиксированные значения макроскопических параметров, описывающих систему в целом. Параметры, характеризующие систему в целом, называются ПАРАМЕТРАМИ СОСТОЯНИЯ. Примерами являются температура, давление, объем и т. д.

РАВНОВЕСНЫМ называется такое состояние системы, при котором все параметры системы имеют определенные значения, остающиеся неизменными сколь угодно долго при неизменных внешних условиях.

ОБРАТИМЫМ называется процесс, при реализации которого в обратном направлении система проходит через те же состояния, что и при прямом ходе, но в обратной последовательности. Равновесные процессы всегда обратимы.

КРУГОВЫМ процессом (ЦИКЛОМ) называется процесс, при котором система после ряда изменений возвращается в исходное состояние.

УРАВНЕНИЕ СОСТОЯНИЯ идеального газа (уравнение Менделеева–Клапейрона)

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

ТЕПЛОЕМКОСТЬ тела численно равна отношению количества тепла ∂Q (или dQ), сообщенного телу, к изменению температуры тела dT , которое при этом произошло:

$$C_{\text{ТЕЛА}} = \frac{dQ}{dT}.$$

УДЕЛЬНОЙ теплоемкостью вещества называется отношение теплоемкости к массе тела.

Если тело не меняет свой объем, то оно не совершает работы, поэтому при постоянном объеме тела переданное телу элементарное тепло dQ идет на элементарное изменение его внутренней энергии dU .

ТЕПЛОЕМКОСТЬ ПРИ ПОСТОЯННОМ ОБЪЕМЕ идеального газа, молекулы которого имеют i степеней свободы:

$$C_V = \left(\frac{dQ}{dT} \right)_V = \frac{dU}{dT} = \frac{i}{2} \frac{m}{\mu} R.$$

ТЕПЛОЕМКОСТЬ ПРИ ПОСТОЯННОМ ДАВЛЕНИИ

$$C_P = \left(\frac{dQ}{dT} \right)_P = \frac{dU}{dT} + p \cdot \left(\frac{dV}{dT} \right)_P = \frac{i}{2} \frac{m}{\mu} R + \frac{m}{\mu} R = \frac{i+2}{2} \frac{m}{\mu} R \quad (1).$$

ОТНОШЕНИЕ

$$\frac{C_P}{C_V} = \gamma$$

является константой (в определенном диапазоне температур) для данного газа. Эта константа называется показателем адиабаты.

Формула

$$\gamma = 1 + \frac{2}{i} \quad (2)$$

устанавливает связь ОТНОШЕНИЯ ТЕПЛОЕМКОСТЕЙ γ с ЧИСЛОМ СТЕПЕНЕЙ СВОБОДЫ молекулы газа i .

ЧИСЛО (количество) СТЕПЕНЕЙ СВОБОДЫ есть минимальное количество независимых координат, необходимых для однозначного описания положения молекулы в пространстве ИЛИ минимальное количество независимых движений, суперпозиция которых дает любое движение молекулы.

ПОСТУПАТЕЛЬНОЕ ДВИЖЕНИЕ всегда дает 3 степени свободы.

ВРАЩАТЕЛЬНОЕ ДВИЖЕНИЕ дает 2 степени свободы для линейной молекулы и 3 степени свободы, если атомы в молекуле не расположены на одной линии.

КОЛЕБАТЕЛЬНОЕ ДВИЖЕНИЕ дает $2n_{\text{КОЛ}}$ степеней свободы, где $n_{\text{КОЛ}}$ – количество независимых колебаний атомов в молекуле (у двухатомной моле-

кулы $n_{\text{КОЛ}} = 1$). При недостаточно высоких температурах на возбуждение колебаний не затрачивается энергия, передаваемая газу, поэтому $n_{\text{КОЛ}} = 0$).

АДИАБАТИЧЕСКИМ называется процесс, происходящий без теплообмена с внешней средой ($\delta Q = 0$). Уравнение адиабаты:

$$PV^\gamma = \text{const}, \quad \lg(P) = -\gamma \lg(V) + \lg(\text{const}), \quad \Delta \lg(P) = -\gamma \Delta \lg(V) \quad (3).$$

Принято также выделять ИЗОТЕРМИЧЕСКИЙ, ИЗОБАРИЧЕСКИЙ и ИЗОХОРИЧЕСКИЙ процессы.

МЕТОДИКА И ПОРЯДОК ИЗМЕРЕНИЙ

Внимательно рассмотрите рис.1, найдите изображение элемента, в котором реализуется адиабатический процесс, обратите внимание на его теплоизоляцию. Найдите математическую формулировку условия теплоизоляции. Ознакомьтесь с графиками в правой части изображения.

Зарисуйте необходимое в свой конспект лабораторной работы.

Получите у преподавателя допуск для выполнения измерений.

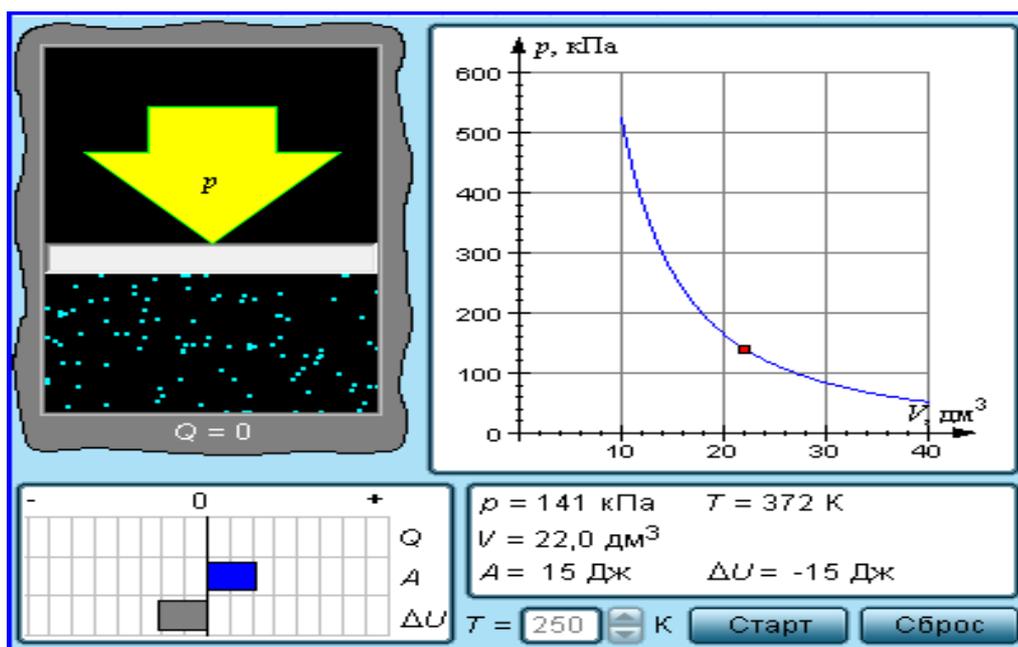


Рис.1. Модель газа, в котором происходит адиабатический процесс.

ИЗМЕРЕНИЯ

1. Нажмите мышью кнопку «Сброс». Нажимая мышью одну из кнопок около индикатора температуры T , установите начальную температуру $T_{\text{нач}}$ газа, близкую к числам из табл. 1.

2. Нажмите мышью кнопку «Старт» на экране и наблюдайте перемещение поршня на левой картинке модели и перемещение точки по синей кривой теоретической адиабаты. Попробуйте останавливать процесс нажатием кнопки «Стоп». Последующий запуск процесса осуществляется нажатием кнопки «Старт».
3. После автоматической остановки процесса запустите его снова, нажав кнопку «Сброс», а затем «Старт», и останавливайте, нажимая кнопку «Стоп», когда крестик на теоретической адиабате будет находиться вблизи следующих значений объема: 15, 20, 25, 30, 35 и 40 дм³ (6 значений), записывая при остановке значения объема, температуры и давления в табл. 2.
4. Установите новое значение температуры $T_{нач2}$, взяв его из табл. 1, задавая $V_{нач} = 40$ дм³ и повторите измерения, записывая результаты в табл. 3.

ТАБЛИЦА 1 (не перерисовывать). **Начальные значения температуры**

| Бригада | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
|------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| $T_{нач1}$ | 50 | 70 | 100 | 120 | 140 | 170 | 200 | 220 |
| $T_{нач2}$ | 230 | 240 | 250 | 260 | 270 | 280 | 290 | 300 |

ТАБЛИЦЫ 2, 3. Результаты измерений и расчетов $T_{нач} = \underline{\quad}$ К.

| | | | | | | | |
|-------------------------|--|--|--|--|--|--|--|
| $T, \text{ К}$ | | | | | | | |
| $V, 10^{-3}\text{ м}^3$ | | | | | | | |
| $p, 10^3\text{ Па}$ | | | | | | | |
| $\lg(V)$ | | | | | | | |
| $\lg(p)$ | | | | | | | |

ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ И ОФОРМЛЕНИЕ ОТЧЕТА

1. Постройте на одном рисунке графики экспериментальных зависимостей логарифма давления от логарифма объема для обеих адиабат (указав на них начальные температуры).
2. Для каждой адиабаты определите по графику экспериментальное значение показателя, используя формулу $\gamma = \frac{|\Delta(\lg p)|}{|\Delta(\lg V)|}$.
3. Определите число степеней свободы молекулы газа, исследуемого в данной компьютерной модели, используя формулу (2).
4. Подберите распространенный газ, структура молекулы которого близка к наблюдаемой.
5. Запишите ответы и проанализируйте ответы и графики.

Вопросы и задания для самоконтроля

1. Что такое параметры состояния макросистемы?
2. Дайте определение равновесного состояния макросистемы.
3. Какой процесс называется обратимым?
4. Что такое цикл?
5. Что такое уравнение состояния?
6. Для какого физического газа можно применить модель «идеальный газ»?
7. Какому уравнению подчиняется состояние идеального газа? Напишите его.
8. Дайте определение теплоемкости тела.
9. Дайте определение удельной теплоемкости.
10. Напишите формулу для теплоемкости при постоянном объеме.
11. Напишите формулу для теплоемкости идеального газа при постоянном давлении.
12. Что такое число степеней свободы?
13. Чему равно число степеней свободы для одноатомной молекулы?
14. Вычислите число степеней свободы для двухатомной молекулы с жесткой связью.
15. Вычислите число степеней свободы для двухатомной молекулы с упругой связью.
16. Что такое показатель адиабаты?
17. Напишите формулу связи показателя адиабаты с числом степеней свободы молекулы идеального газа.
18. Дайте определение адиабатического процесса.
19. Напишите уравнение адиабатического процесса.
20. Дайте определение изопроцесса. Перечислите известные изопроцессы.
21. Напишите уравнение и нарисуйте PV -диаграмму изотермического процесса.
22. Напишите уравнение и нарисуйте PV -диаграмму изобарического процесса.
23. Напишите уравнение и нарисуйте PV -диаграмму изохорического процесса.

ЛИТЕРАТУРА

1. Трофимова Т.И. Курс физики. М.: Высшая школа, 2004. Гл.9, § 55.
2. Детлаф А.А., Яворский Б.М. Курс физики. М.: Высшая школа, 2000. Гл. 9, § 9.6.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА

4_2. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ МАКСВЕЛЛА

Ознакомьтесь с теорией в конспекте и учебнике [1, 2]. Запустите программу компьютерного моделирования. Выберите «Глава 3. Термодинамика и молекулярная физика», «Модель 3.4. Распределение Максвелла». Прочитайте теорию и оформите конспект лабораторной работы.

ЦЕЛЬ РАБОТЫ

- Знакомство с поведением молекул идеального газа и компьютерной моделью, описывающей его.
- Экспериментальное подтверждение распределения Максвелла молекул идеального газа по скоростям.
- Экспериментальное определение массы молекул в данной модели.

КРАТКАЯ ТЕОРИЯ

ВЕРОЯТНОСТЬЮ P_i получения некоторого результата измерения называется предел отношения количества измерений, давших этот результат, (N_i) к полному числу измерений N , когда $N \rightarrow \infty$.

ЭЛЕМЕНТАРНОЙ вероятностью dP_v при измерении величины скорости v называется вероятность наличия скорости величиной от v до $v + dv$. Эта вероятность пропорциональна приращению скорости dv : $dP_v = F(v) dv$, где коэффициент пропорциональности $F(v)$ называется ФУНКЦИЕЙ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ молекул по величине скорости. Она может быть выражена через другие функции распределения:

$$F(v) = \varphi(v_x) \cdot \varphi(v_y) \cdot \varphi(v_z) \cdot 4\pi v^2 = f(v) \cdot 4\pi v^2,$$

где $\varphi(v_x)$, $\varphi(v_y)$ и $\varphi(v_z)$ – функции распределения для соответствующих проекций скоростей молекул, а $f(v)$ – их произведение.

В учебнике вы можете найти вывод формул, в частности,

$$F(v) = \left(\frac{m}{2\pi kT} \right)^{\frac{3}{2}} e^{\left(-\frac{mv^2}{2kT} \right)} 4\pi v^2.$$

$$\text{СРЕДНЯЯ скорость } \langle v \rangle = \int_0^{\infty} v F(v) dv = \sqrt{\frac{8kT}{\pi m}}.$$

$$\text{СРЕДНЯЯ квадратичная скорость } v_{\text{СР.КВ}} = \sqrt{\frac{3kT}{m}}.$$

НАИВЕРОЯТНЕЙШЕЙ называется скорость $v_{\text{ВЕР}}$, при которой $F(v)$ имеет максимум:

$$v_{\text{ВЕР}} = \sqrt{\frac{2kT}{m}}.$$

МЕТОДИКА И ПОРЯДОК ИЗМЕРЕНИЙ

Внимательно рассмотрите рисунок и зарисуйте необходимое в свой конспект лабораторной работы.

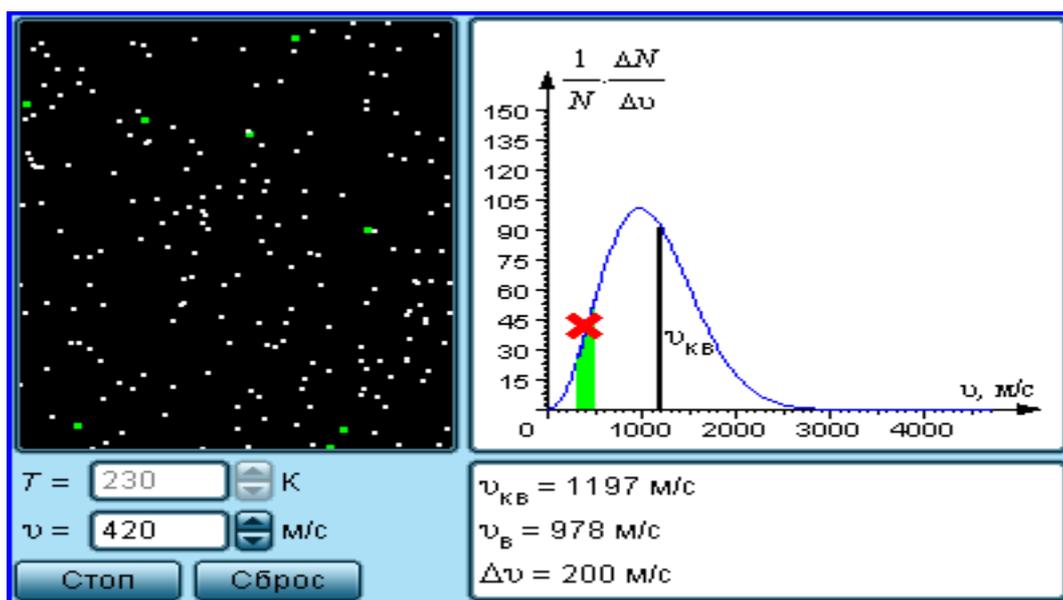


Рис.1. Модель идеального газа

Внимательно рассмотрите изображение на экране монитора компьютера. Обратите внимание на систему частиц, движущихся в замкнутом объеме слева во внутреннем окне. Они абсолютно упруго сталкиваются друг с другом и со стенками сосуда. Их количество около 100, и данная система является хорошей «механической» моделью идеального газа.

В процессе исследований можно останавливать движение всех молекул (при нажатии кнопки «Стоп») и получать как бы «мгновенные фотографии», на которых выделяются более ярким свечением частицы (точки), скорости которых лежат в заданном диапазоне Δv вблизи заданной скорости v (то есть имеющие скорости от v до $v + \Delta v$). Для продолжения наблюдения движения частиц надо нажать кнопку «Старт». Запишите в тетрадь значение Δv , указанное на экране.

Получите у преподавателя допуск для выполнения измерений.

ИЗМЕРЕНИЯ

1. Нажмите кнопку «Сброс», и нажимая кнопки около индикатора температуры, установите температуру T_1 , указанную в табл. 1 для вашей бригады. Запишите для нее значение наивероятнейшей скорости.
2. Нажимая кнопки около индикатора скорости, установите скорость выделенной группы молекул вблизи минимального заданного в табл. 2 значения.
3. Нажмите клавишу «Старт» и через 10-20 секунд клавишу «Стоп». Подсчитайте на «мгновенной фотографии» количество молекул ΔN , скорости которых лежат в заданном диапазоне Δv вблизи заданной скорости молекул v (они более яркие). Результат запишите в табл. 2.
4. Нажмите кнопку «Старт» и через 10-20 секунд, нажав кнопку «Стоп», получите еще одну мгновенную фотографию. Подсчитайте количество частиц с заданной скоростью. Результат запишите в табл. 2.
5. Повторите еще 3 раза измерения для данной скорости и результаты запишите в табл. 2.
6. Измените скорость до значения, указанного в табл. 2, и сделайте по 5 измерений (как в п. 4) для каждой скорости.
7. Установите (как в п. 1) вторую температуру T_2 из табл. 1. Запишите для нее значение наивероятнейшей скорости.
8. Повторите измерения (по пунктам 2, 3, 4, 5), записывая результат в табл. 3, аналогичную табл. 2.

ТАБЛИЦА 1 (не перерисовывать). **Примерные значения температуры.**

| Бригада | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
|---------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| T_1 | 160 | 200 | 260 | 300 | 360 | 400 | 460 | 500 |
| T_2 | 700 | 740 | 760 | 800 | 840 | 860 | 900 | 960 |

ТАБЛИЦЫ 2,3 Результаты измерений при $T = \underline{\hspace{1cm}}$ К. $v_{\text{ВЕР}} = \underline{\hspace{1cm}}$ км/с.

| v , км/с | 0,5 | 1,0 | 1,5 | 2,0 | 2,5 | 3,0 | 3,5 |
|------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| ΔN_1 | | | | | | | |
| ΔN_2 | | | | | | | |
| ΔN_3 | | | | | | | |
| ΔN_4 | | | | | | | |
| ΔN_5 | | | | | | | |
| ΔN_{CP} | | | | | | | |

ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ И ОФОРМЛЕНИЕ ОТЧЕТА

1. Вычислите и запишите в таблицы средние значения количества частиц $\Delta N_{\text{ср}}$, скорости которых лежат в данном диапазоне от v до $v + \Delta v$.
2. Постройте на одном рисунке графики экспериментальных и теоретических зависимостей $\Delta N_{\text{ср}}(v)$. Теоретические зависимости можно срисовать с экрана монитора компьютера, подобрав соответствующий масштаб по вертикальной оси ординат.
3. Для каждой температуры определите экспериментальное значение наиболее вероятной скорости молекул $v_{\text{в.п.}}$.
4. Постройте график зависимости квадрата наиболее вероятной скорости от температуры $v_{\text{в.п.}}^2(T)$.
5. По данному графику определите значение массы молекулы

$$m = 2k \frac{\Delta T}{\Delta(v_{\text{в.п.}}^2)}.$$

6. Подберите газ, масса молекулы которого достаточно близка к измеренной массе молекулы.
7. Запишите ответы и проанализируйте ответы и графики.

Табличные значения

| Газ | Водород | Гелий | Неон | Азот | Кислород |
|--------------------------------------|---------|-------|------|------|----------|
| Масса молекулы, $\times 10^{-27}$ кг | 3,32 | 6,64 | 33,2 | 46,5 | 53,12 |

Вопросы и задания для самоконтроля

1. Дайте определение вероятности получения некоторого результата измерения.
2. Дайте определение элементарной вероятности при измерении величины скорости.
3. Что такое функция распределения?
4. Как вычисляется среднее значение некоторой физической величины A , если известна ее функция распределения $f(A)$?
5. Что такое макросистема?
6. Каковы основные свойства макросистем?
7. Как движутся частицы макросистемы?
8. Что такое давление?
9. Почему и для чего одной из широко применяемых единиц измерения является миллиметр ртутного столба?
10. Что такое температура?
11. Что такое эмпирическая температура?

12. Назовите шкалы эмпирических температур.
13. Что такое градус Цельсия?
14. Как связаны функции распределения величины и проекции скорости частиц макросистемы?
15. Опишите модель «идеальный газ».
16. Каковы особенности графика функции распределения величины скорости молекул идеального газа?
17. Напишите формулу, определяющую среднее значение скорости молекул.
18. Напишите формулу, определяющую среднюю квадратичную скорость молекул.
19. Напишите условие, позволяющее вычислить наиболее вероятную скорость молекул.
20. Напишите выражение для средней скорости молекул идеального газа.
21. Напишите выражение для средней квадратичной скорости молекул идеального газа.
22. Напишите выражение для наиболее вероятной скорости молекул идеального газа.
23. Вычислите на сколько процентов отличаются средняя и средняя квадратичная скорости молекул идеального газа.
24. Вычислите на сколько процентов отличаются средняя и наиболее вероятная скорости молекул идеального газа.

ЛИТЕРАТУРА

1. Трофимова Т.И. Курс физики. М.: Высшая школа, 2004. Гл.8, § 48.
2. Детлаф А.А., Яворский Б.М. Курс физики. М.: Высшая школа, 2000. Гл. 10, §§ 10.7, 10.8.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА

4_3. ДИФФУЗИЯ В ГАЗАХ

Ознакомьтесь с теорией в конспекте и учебнике [1, 2]. Запустите программу компьютерного моделирования. Выберите «Глава 3. Термодинамика и молекулярная физика», «Модель 3.3. Диффузия». Прочитайте теорию и оформите конспект лабораторной работы.

ЦЕЛЬ РАБОТЫ

- Знакомство с явлением диффузии на основе компьютерной модели, описывающей диффузию молекул идеального газа.
- Экспериментальное подтверждение закона диффузии.
- Экспериментальное определение средней скорости теплового движения частиц в данной модели.

КРАТКАЯ ТЕОРИЯ:

При нарушении равновесия макросистема стремится вернуться в равновесное состояние.

ЯВЛЕНИЯМИ ПЕРЕНОСА называются процессы, связанные с возникновением в веществе НАПРАВЛЕННОГО ПЕРЕНОСА (потока) массы, импульса или внутренней энергии.

ДИФФУЗИЯ есть процесс установления внутри фаз вещества равновесного распределения концентраций, который обеспечивается направленным переносом массы этого вещества. Диффузия обусловлена тепловым движением молекул и проявляется в самопроизвольном выравнивании концентраций в смеси нескольких веществ.

САМОДИФФУЗИЯ имеет место при самопроизвольном выравнивании концентрации однородного вещества, если по некоторым причинам равновесное распределение концентрации было нарушено.

ДЛИНА СВОБОДНОГО ПРОБЕГА λ есть среднее расстояние, пролетаемое частицей между двумя последовательными столкновениями. ЭФФЕКТИВНЫЙ ДИАМЕТР частицы есть минимальное расстояние, на которое сближаются центры двух сталкивающихся частиц.

Если в начальный момент времени имеет место неоднородное распределение плотности вещества ρ вдоль только одной оси (например, Ox), тогда возникает ОДНОМЕРНАЯ ДИФФУЗИЯ, связанная с переносом массы M вдоль этой оси Ox . Для двухкомпонентной системы (например, смеси двух газов) одномерная диффузия описывается первым законом Фика:

$$dM = -D \frac{d\rho}{dx} dS \cdot dt,$$

где dM – масса одного компонента (индексы для характеристик данного компонента пропущены), которая переносится за время dt через элементарную площадку, перпендикулярную оси OX , имеющую площадь dS , в направлении убывания плотности этого компонента,

$\frac{d\rho}{dx}$ – градиент плотности первого компонента,

D – коэффициент диффузии.

Для смеси «красных» и «зеленых» частиц, имеющих одинаковую массу m каждой частицы,

$$dM = m \cdot dN ,$$

$$\rho = m \frac{N}{V} , \text{ а}$$

$$\frac{d\rho}{dx} = m \frac{dN}{V dx} ,$$

где dN – количество частиц, проходящих через dS за время dt . Оно равно

$$dN = -D \frac{\Delta N}{\Delta x \cdot V} dS dt,$$

где разность числа частиц в левом и правом сосудах $\Delta N = N_2 - N_1$, $N_2 = N_0 - N(t)$, $N_1 = N(t)$, $\Delta x = L_{\text{отв}}$, объем сосуда $V = 20 \text{ см}^3$, dS есть площадь отверстия. Решаем уравнение методом разделения переменных:

$$\frac{dN}{N_0 - 2N(t)} = -D \frac{S_{\text{отв}}}{L_{\text{отв}} V} dt .$$

Интегрируем слева от 0 до $N(t)$, а справа – от 0 до t , и получаем:

$$\ln \left(1 - \frac{2N(t)}{N_0} \right) = -\frac{2DS_{\text{отв}}}{L_{\text{отв}}V} t \quad \text{или} \quad N(t) = \frac{N_0}{2} \left[1 - e^{-\left(\frac{2DS_{\text{отв}}}{L_{\text{отв}}V} t \right)} \right] .$$

МЕТОДИКА И ПОРЯДОК ИЗМЕРЕНИЙ

Внимательно рассмотрите рисунок. Зарисуйте необходимое в конспект.

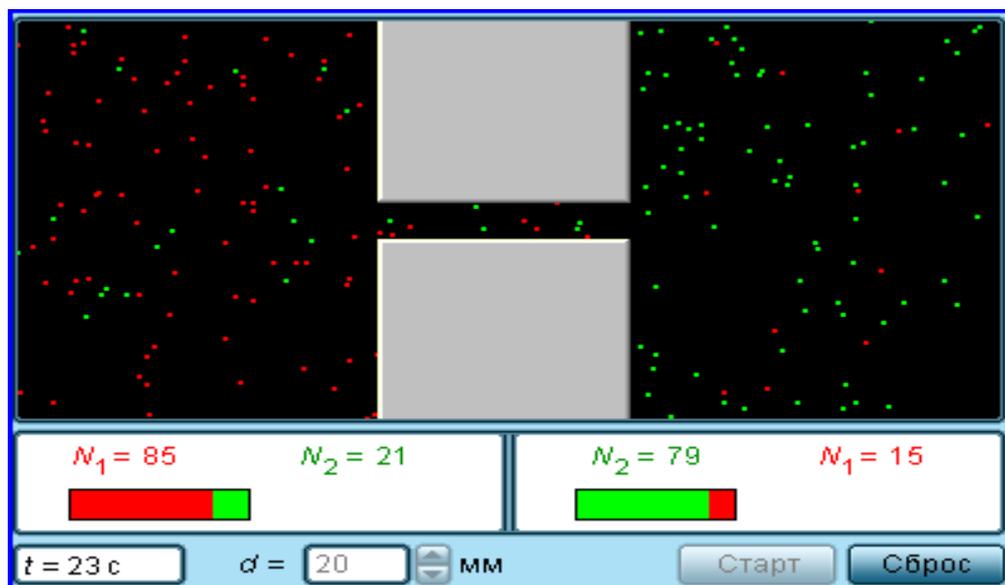


Рис.1. Модель диффузии двух газов

Обратите внимание на 2 системы частиц, находящихся в начальный момент в левом (красные) и в правом (зеленые) объемах. Они абсолютно упруго сталкиваются друг с другом и со стенками сосуда. Количество частиц N_0 каждой компоненты равно 100, и данная система является хорошей «механической» моделью идеального газа.

Нажмите мышью кнопку «Старт». Наблюдайте переход частиц из одной части объема в другую (диффузию).

Количество частиц подсчитывается автоматически и высвечивается над соответствующими столбиками. Для установки нового диаметра трубки надо нажать «Сброс» и соответствующие кнопки регулятора диаметра d .

Получите у преподавателя допуск для выполнения измерений.

ИЗМЕРЕНИЯ

ЭКСПЕРИМЕНТ. Исследование диффузии частиц через тонкую трубку, соединяющую два объема.

1. Нажмите кнопку «Старт» и через Δt секунд (из табл.1) после начала процесса произнесите цифру, которая приводится в нижней части и соответствует требуемому по табл.1 измерению (например, количество зеленых частиц слева). Результат записывает в табл. 2 второй участник эксперимента.

- Через следующие Δt секунд снова произнесите результат и запишите количество частиц.
- Закончив измерения с данной трубкой, установите второе значение диаметра соединительной трубки d_2 из табл. 1 и повторите измерения, записывая результат в табл. 3, аналогичную табл. 2.

ТАБЛИЦА 1. Значения диаметров соединительной трубки, длительности промежутка измерения и сорта частиц.

| | | | | | | | | |
|----------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Бригада | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| d_1 , мм | 10 | 12 | 14 | 16 | 10 | 12 | 14 | 16 |
| d_2 , мм | 20 | 22 | 24 | 26 | 28 | 30 | 32 | 34 |
| Δt , с | 15 | 15 | 15 | 15 | 10 | 10 | 10 | 10 |
| Сорт | красн. | зелен. | красн. | зелен. | красн. | зелен. | красн. | зелен. |
| Объем | справа | слева | справа | слева | справа | слева | справа | слева |

ОБРАЗЕЦ ТАБЛИЦ 2, 3 для записи результатов измерений и расчетов

| | | | | | | | | | | |
|---|------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|--------------|
| t , с | Δt | $2\Delta t$ | $3\Delta t$ | $4\Delta t$ | $5\Delta t$ | $6\Delta t$ | $7\Delta t$ | $8\Delta t$ | $9\Delta t$ | $10\Delta t$ |
| $N(t)$ | | | | | | | | | | |
| $\left(1 - \frac{2N(t)}{N_0}\right)$ | | | | | | | | | | |
| $\ln\left(1 - \frac{2N(t)}{N_0}\right)$ | | | | | | | | | | |

ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ И ОФОРМЛЕНИЕ ОТЧЕТА

- Вычислите и запишите в таблицы все указанные значения.
- Постройте на одном рисунке графики экспериментальных зависимостей

$$-\ln\left(1 - \frac{2N(t)}{N_0}\right) = f(t)$$

для каждого отверстия.

- Используя формулу

$$D = -\frac{2L_{отв} V}{\pi d^2} \frac{\Delta\left(\ln\left(1 - \frac{2n(t)}{N_0}\right)\right)}{\Delta t},$$

3. определите по графикам коэффициенты диффузии для каждого отверстия. Длину отверстия $L_{\text{отв}}$ измерьте линейкой на экране монитора (учитывая масштаб по диаметру отверстия d), объем сосуда $V = 20 \text{ см}^3$.
5. Найдите среднее значение коэффициента диффузии и, используя соотношение

$$D = \frac{1}{3} v_{\text{ср}} \lambda_{\text{ср}},$$

найдите среднюю скорость теплового движения $v_{\text{ср}}$ частиц ($\lambda_{\text{ср}} = 2 \text{ см}$).

6. Сделайте выводы по графику и ответу. В выводе по ответу сравните полученное экспериментально значение $v_{\text{ср}}$ с величиной скорости, оцененной «на глаз».

Вопросы и задания для самоконтроля

1. Что происходит с изолированной макросистемой при нарушении равновесия?
2. Дайте определение явления переноса.
3. Назовите примеры явлений переноса.
4. Дайте определение явления диффузии.
5. Чем обусловлена диффузия?
6. В чем проявляется диффузия?
7. Какая диффузия называется одномерной?
8. Что такое самодиффузия?
9. Напишите уравнение одномерной диффузии для двухкомпонентной системы газов.
10. Каков физический смысл коэффициента диффузии?
11. Что такое плотность тела?
12. Что такое концентрация молекул (частиц)?
13. Дайте определение градиента плотности в общем случае.
14. Напишите формулу для градиента плотности, если она меняется только вдоль оси OX .
15. Напишите формулу для градиента плотности, если она меняется только вдоль оси OY .
16. Напишите формулу для градиента плотности, если она меняется только вдоль оси OZ .
17. Напишите формулу для градиента плотности, если она меняется вдоль осей OX и OY .
18. Куда направлен вектор градиента плотности?
19. Чему равен модуль вектора градиента плотности?
20. Что такое приближение средней скорости?
21. Что такое длина свободного пробега частицы?
22. Что такое время свободного пробега?

23. Что такое эффективный диаметр и эффективное сечение частицы?
24. Какое уравнение связывает среднюю скорость с коэффициентом диффузии?

ЛИТЕРАТУРА

1. Трофимова Т.И. Курс физики. М.: Высшая школа, 2004. Гл.8, § 48.
2. Детлаф А.А., Яворский Б.М. Курс физики. М.: Высшая школа, 2000. Гл. 10, §§ 10.7, 10.8.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА

4_4. УРАВНЕНИЕ СОСТОЯНИЯ ГАЗА ВАН-ДЕР-ВААЛЬСА

Ознакомьтесь с теорией в конспекте и учебнике [1, 2]. Запустите программу. Выберите «Глава 3. Термодинамика и молекулярная физика», «Модель 3.10. Изотермы реального газа». Прочитайте теорию и оформите конспект лабораторной работы.

ЦЕЛЬ РАБОТЫ

- Знакомство с поведением вещества, находящегося в газообразном состоянии и переходящего в жидкое состояние, на основе соответствующей компьютерной модели.
- Экспериментальное подтверждение закономерностей поведения реального газа.

КРАТКАЯ ТЕОРИЯ

ФИЗИЧЕСКИМ газом называется вещество, находящееся в газообразном состоянии.

«ИДЕАЛЬНЫЙ ГАЗ» – это название модели, описывающей физический газ, находящийся в сильно разреженном состоянии (при не слишком больших давлениях и достаточно высоких температурах). Уравнением, связывающим параметры состояния идеального газа, является уравнение Менделеева–Клапейрона. Поэтому оно имеет второе название: УРАВНЕНИЕ СОСТОЯНИЯ ИДЕАЛЬНОГО ГАЗА. Его вид известен: $pV = \nu RT$, где p – давление газа, V – объем газа, ν – количество киломолей, R – универсальная газовая постоянная, T – температура газа.

Более точная модель физического (реального) газа была предложена Ван-дер-Ваальсом. Она также является приближенной, но лучше описывает процессы, нежели модель «идеальный газ». Иногда эту модель называют «реальный газ». Газом ВАН-ДЕР-ВААЛЬСА (ВдВ) называется воображаемый газ (модель), параметры состояния которого точно подчиняются уравнению

$$\left(p + \frac{\nu^2 a}{V^2}\right)(V - \nu \cdot b) = \nu RT .$$

Оно называется УРАВНЕНИЕМ ВАН-ДЕР-ВААЛЬСА. Здесь a и b – константы Ван-дер-Ваальса.

ДОБАВКА К ВНЕШНЕМУ ДАВЛЕНИЮ (a) обусловлена взаимным притяжением молекул друг к другу.

ПОПРАВКА К ОБЪЕМУ (b) характеризует ту часть объема, которая недоступна для движения молекул. Она равна нескольким суммарным объемам молекул, содержащихся в газе.

ИЗОТЕРМОЙ называется зависимость давления от объема данного (фиксированного) количества вещества при постоянной температуре.

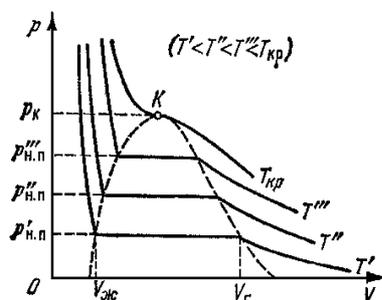


Рис.1

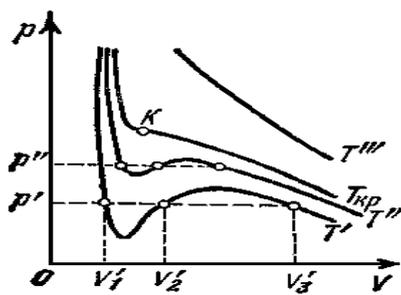


Рис.2

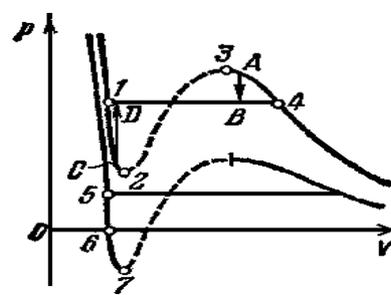


Рис.3

Изотермы некоторого физического (реального) газа.

На рис. 1 - 3 приведены изотермы некоторого физического (реального) газа, а на рис. 2 и рис. 3 – изотермы ВдВ газа (взяты из учебника Савельева).

ИЗОТЕРМА ВдВ газа, имеющая только точку перегиба и не имеющая экстремумов, называется КРИТИЧЕСКОЙ. Температура критической изотермы называется КРИТИЧЕСКОЙ ТЕМПЕРАТУРОЙ. Объем и давление в критической точке также называются КРИТИЧЕСКИМИ.

УРАВНЕНИЯ ДЛЯ КРИТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ:

$$V_{кр} = 3b, \quad p_{кр} = \frac{a}{27b^2}, \quad T_{кр} = \frac{8a}{27R \cdot b}.$$

Отсюда

$$A = \frac{p_{кр} V_{кр}}{RT_{кр}} = \frac{3}{8} v = 0,375 v.$$

При температуре выше критической вещество может находиться только в ГАЗООБРАЗНОМ состоянии. При температуре ниже критической вещество может находиться как в газообразном, так и в жидком состоянии.

ЖИДКОЕ состояние описывается левыми (по отношению к точке перегиба) частями графиков на рисунках и характерно тем, что небольшое уменьшение объема вещества может произойти только при резком увеличении давления (жидкость практически несжимаема).

Изотермы ВдВ примерно совпадают с изотермами реального газа на участках, соответствующих однофазным состояниям вещества.

Рис. 3 разъясняет поведение вещества при разных внешних условиях. В области, где присутствуют две фазы (1–2–3–4), S-образный завиток изотермы

ВдВ заменяется горизонтальным участком (1–4) реальной изотермы (см. учебник).

НЕРЕАЛИЗУЕМОЕ СОСТОЯНИЕ соответствует участку 2–3, на котором сжимаемость

$$\beta = \frac{dV}{dP}$$

вещества была бы отрицательна, что невозможно.

ПЕРЕОХЛАЖДЕННЫЙ ПАР на участке 3–4 реализуется при определенных условиях (при практическом отсутствии центров конденсации и внешних воздействий).

ПЕРЕГРЕТАЯ ЖИДКОСТЬ на участке 1–2 реализуется при отсутствии примесей, способных быть центрами кипения.

МЕТОДИКА И ПОРЯДОК ИЗМЕРЕНИЙ

Рассмотрите внимательно рис.4, зарисуйте необходимое в свой конспект.

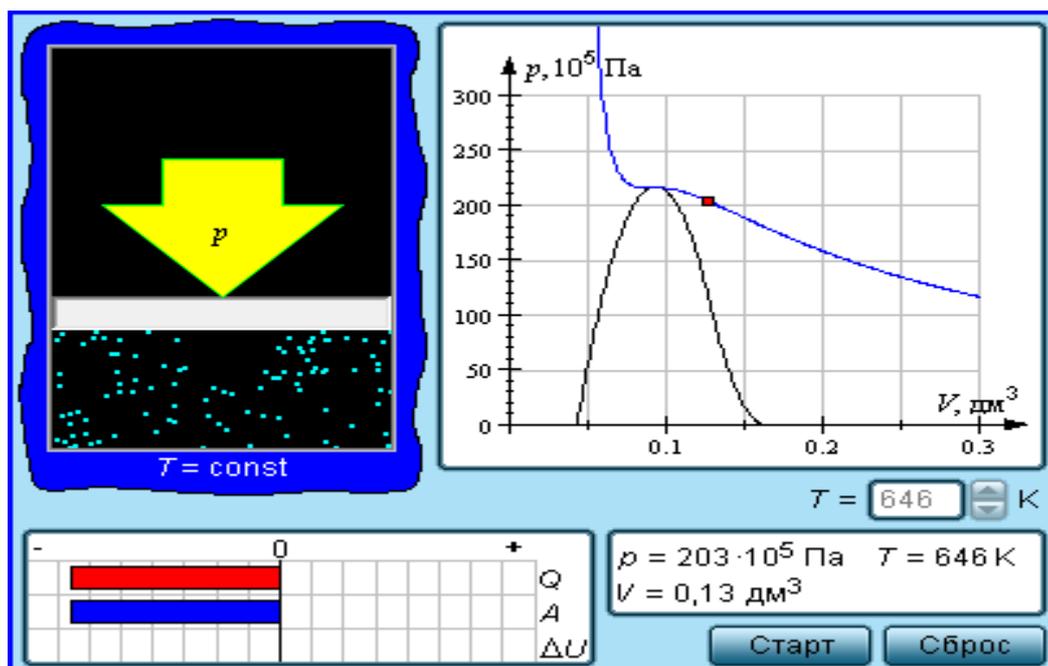


Рис.4. Модель реального газа, в котором происходит изотермический процесс

Нажмите мышью кнопку «Старт». Поработайте с моделью (рис.4), меняя температуру. **Получите у преподавателя допуск для выполнения измерений.**

ИЗМЕРЕНИЯ

ЭКСПЕРИМЕНТ 1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ КРИТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ

1. Подведите маркер мыши к кнопке на регуляторе температуры и нажмите левую кнопку мыши.
2. Удерживайте кнопку в нажатом состоянии пока не появится критическая изотерма (с точкой перегиба, в которой касательная горизонтальна).
3. Запишите в свой конспект значения критических параметров $T_{кр}$, $V_{кр}$, $p_{кр}$.

ЭКСПЕРИМЕНТ 2. ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗОТЕРМ ГАЗА ВДВ.

1. Установите значение температуры, указанное первым в таблице начальных значений для вашей бригады. Нажмите мышью кнопку «Старт» на экране и наблюдайте перемещение поршня на левой картинке модели и перемещение точки по красной кривой теоретической адиабаты. Попробуйте останавливать процесс нажатием кнопки «Стоп» на экране. Последующий запуск процесса осуществляется нажатием кнопки «Старт».
2. После остановки процесса запустите его снова, нажав кнопку «Старт», и останавливайте, нажимая кнопку «Стоп», когда крестик на теоретической изотерме (синяя кривая) будет находиться вблизи следующих значений объема: 0,1, 0,12, 0,14, 0,16, 0,18 и 0,2 дм³ (6 значений), записывая при остановке значения в табл. 2.
3. Установив новое значение температуры T из табл. 1, задавая $V_{нач} = 0,1$ дм³, повторите измерения, записывая результаты в табл. 3, 4, 5.

ТАБЛИЦА 1 (не перерисовывать). Примерные значения температуры

| Бригада | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
|---------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| T_1 | 500 | 510 | 520 | 530 | 540 | 550 | 560 | 570 |
| T_2 | 580 | 590 | 600 | 610 | 620 | 630 | 640 | 650 |
| T_3 | 660 | 670 | 680 | 690 | 660 | 670 | 680 | 690 |
| T_4 | 690 | 700 | 690 | 700 | 690 | 700 | 690 | 700 |

ТАБЛИЦЫ 2, 3, 4, 5 Результаты измерений при $T = \underline{\hspace{2cm}}$ К

| | | | | | | | |
|-----------------------|--|--|--|--|--|--|--|
| $V, \text{ см}^3$ | | | | | | | |
| $p, \text{ кПа}$ | | | | | | | |
| $1/V, \text{ м}^{-3}$ | | | | | | | |

ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ И ОФОРМЛЕНИЕ ОТЧЕТА

1. По измеренным значениям критических параметров вычислите константу

$$A = \frac{p_{KP} V_{KP}}{RT_{KP}} .$$

2. Постройте на одном рисунке графики экспериментальных зависимостей давления от обратного объема для начальных точек всех изотермических процессов (указав на них температуры).
3. Для каждой изотермы определите значение количества вещества, используя

$$\nu = \frac{1}{RT} \frac{\Delta p}{\Delta \left(\frac{1}{V} \right)} .$$

4. Вычислите среднее значение ν и величину константы A' по формуле $A' = 0,375\nu$. Запишите ответ для A' и проанализируйте ответы и графики. В выводах по ответу сравните A' , полученное по изотермам, с A , полученным через критические параметры.

Вопросы и задания для самоконтроля

1. Что такое физический газ?
2. Перечислите все известные агрегатные состояния вещества.
3. Что такое идеальный газ?
4. При каких условиях физический газ можно описывать моделью идеального газа?
5. Что такое уравнение состояния?
6. Как выглядит уравнение состояния идеального газа? Каково его второе название?
7. Что такое газ Ван-дер-Ваальса?
8. Как выглядит уравнение состояния газа Ван-дер-Ваальса? Каково его второе название?
9. Что такое константы Ван-дер-Ваальса?
10. Что определяет первая константа Ван-дер-Ваальса?
11. Что определяет вторая константа Ван-дер-Ваальса?
12. Что такое изотерма?
13. Что такое критическая изотерма?
14. Каковы особенности поведения газа при температуре выше критической?
15. Каковы особенности поведения газа при температуре ниже критической?

16. На каких участках изотермы ВдВ примерно совпадают с изотермами реального газа?
17. На каком участке изотерма ВдВ описывает газообразное состояние вещества?
18. На каком участке изотерма ВдВ описывает жидкое состояние вещества?
19. На каком участке изотерма ВдВ описывает состояние перегретой жидкости?
20. На каком участке изотерма ВдВ описывает состояние переохлажденного пара?
21. Что такое точка росы?
22. На каком участке изотерма ВдВ описывает нереализуемые состояния вещества?
23. Перечислите условия существования перегретой жидкости.
24. Перечислите условия существования переохлажденного пара.
25. Приведите пример применения перегретой жидкости.
26. Приведите пример применения переохлажденного пара.

ЛИТЕРАТУРА

1. Трофимова Т.И. Курс физики. М.: Высшая школа, 2004. Гл.10, §§ 60-62.
2. Детлаф А.А., Яворский Б.М. Курс физики. М.: Высшая школа, 2000. Гл. 12, §§ 12.1, 12.2.

НЕКОТОРЫЕ ПОЛЕЗНЫЕ СВЕДЕНИЯ

ФИЗИЧЕСКИЕ КОНСТАНТЫ

| Название | Символ | Значение | Размерность |
|---|------------------|-----------------------|---|
| Гравитационная постоянная | γ или G | $6,67 \cdot 10^{-11}$ | $\text{Н} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{кг}^{-2}$ |
| Ускорение свободного падения на поверхности Земли | g_0 | 9,8 | $\text{м} \cdot \text{с}^{-2}$ |
| Скорость света в вакууме | c | $3 \cdot 10^8$ | $\text{м} \cdot \text{с}^{-1}$ |
| Постоянная Авогадро | N_A | $6,02 \cdot 10^{26}$ | кмоль^{-1} |
| Универсальная газовая постоянная | R | $8,31 \cdot 10^3$ | $\text{Дж} \cdot \text{кмоль}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$ |
| Постоянная Больцмана | k | $1,38 \cdot 10^{-23}$ | $\text{Дж} \cdot \text{К}^{-1}$ |
| Элементарный заряд | e | $1,6 \cdot 10^{-19}$ | Кл |
| Масса электрона | m_e | $9,11 \cdot 10^{-31}$ | кг |
| Постоянная Фарадея | F | $9,65 \cdot 10^4$ | $\text{Кл} \cdot \text{моль}^{-1}$ |
| Электрическая постоянная | ϵ_0 | $8,85 \cdot 10^{-12}$ | $\text{Ф} \cdot \text{м}^{-1}$ |
| Магнитная постоянная | μ_0 | $4\pi \cdot 10^{-7}$ | $\text{Гн} \cdot \text{м}^{-1}$ |
| Постоянная Планка | h | $6,62 \cdot 10^{-34}$ | $\text{Дж} \cdot \text{с}$ |

ПРИСТАВКИ И МНОЖИТЕЛИ

для образования десятичных кратных и дольных единиц

| Приставка | Символ | Множитель |
|-----------|--------|-----------|
| дека | да | 10^1 |
| гекто | г | 10^2 |
| кило | к | 10^3 |
| мега | М | 10^6 |
| гига | Г | 10^9 |
| тера | Т | 10^{12} |

| Приставка | Символ | Множитель |
|-----------|--------|------------|
| деци | д | 10^{-1} |
| санتي | с | 10^{-2} |
| милли | м | 10^{-3} |
| микро | мк | 10^{-6} |
| нано | н | 10^{-9} |
| пико | п | 10^{-12} |