

**МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

ФГОУ ВПО «Оренбургский Государственный Аграрный Университет»

Кафедра «Физики»

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

**к лабораторным работам по физике
(раздел «механика, молекулярная физика и термодинамика»)**

Лабораторный практикум в компьютерном классе

Оренбург, 2006

Методические указания составлены сотрудниками кафедры физики ОГАУ: проф. Комаровой Н.К., доц. Свиридовой Т.Г, доц. Завалий М.В., ст. препод. Ишкаевой С.А., препод. Травиным Д.А., препод. Гладышевой Ю.А., препод. Панкратовой М.В.

Методические указания к лабораторным работам по физике (раздел «механика, молекулярная физика и термодинамика») составлены для следующих специальностей:

- 020803 «Биоэкология»;
- 220200 «Автоматизированные системы обработки информации»;
- 075500 «Комплексное обеспечение информационной безопасности автоматизированных систем»;
- 110301 «Механизация сельского хозяйства»;
- 110304 «Технология обслуживания и ремонта машин в агропромышленном комплексе»;
- 311400 «Электрификация и автоматизация сельского хозяйства»;
- 020209 «Микробиология»;
- 330100 «Безопасность жизнедеятельности в техносфере»;
- 260400 «Лесное хозяйство».

Методические указания к лабораторным работам по физике. (Раздел «Молекулярная физика и термодинамика») / Под общ. ред. Свиридовой Т.Г, Ишкаевой С.А., Травиным Д.А. – 26 с.

Рецензент: к.ф.-м.н., доцент Дженжер В.О.

© Свиридова Т.Г, 2006.
© Ишкаева С.А., 2006.
© Травин Д.А., 2006.

Введение

Компьютерное моделирование широко используется практически во всех отраслях современной науки, но данный курс не ставит своей целью обучить студентов составлять программы для моделирования физических процессов, а предлагает уже готовые модели. Здесь компьютер выступает в роли экспериментальной установки для проведения «физических» опытов по механике и молекулярной физике.

Раздел физики, занимающийся изучением закономерностей механического движения и взаимодействия тел, называется механикой. Механику тел, движущихся с малыми скоростями (по сравнению со скоростью света в вакууме), называют классической механикой в отличие от релятивистской механики быстро движущихся тел.

Мы ограничимся изучением двух основных разделов классической механики: кинематики и динамики. В кинematике даётся математическое описание механического движения тел, не обращая внимания на причины, обеспечивающие существование каждого конкретного вида движения. Динамика занимается исследованием влияния взаимодействия тел на их механическое движение.

Курс «Механика на компьютере» содержит набор компьютерных программ, которые позволяют иллюстрировать законы механического движения, отслеживать изменения кинематических и динамических характеристик движения.

Молекулярная физика – раздел физики, изучающий строение и свойства вещества исходя из молекулярно-кинетических представлений, основывающихся на том, что все тела состоят из молекул, находящихся в непрерывном хаотическом движении.

Процессы, изучаемые молекулярной физикой, являются результатом совокупного действия огромного числа молекул. Законы поведения огромного числа молекул, являясь статистическими закономерностями, изучаются с помощью статистического метода.

Термодинамика – раздел физики, изучающий общие свойства макроскопических систем, находящихся в состоянии термодинамического равновесия, и процессы перехода между ними. Термодинамика не рассматривает микропроцессы, которые лежат в основе этих превращений. Этим термодинамический метод отличается от статистического. Термодинамика базируется на двух началах – фундаментальных законах, установленных в результате обобщения опытных данных.

Молекулярно-кинетическая теория и термодинамика взаимно дополняют друг друга, образуя единое целое, но отличаются различными методами исследования.

Курс «Молекулярная физика на компьютере» содержит набор компьютерных программ, которые позволяют иллюстрировать законы молекулярной физики на основе двумерной модели идеального газа. Каждая

молекула представляет собой твердый диск, а расчет столкновений молекул между собой и со стенками происходит по законам классической механики.

Такая модель позволяет проиллюстрировать статистический характер законов молекулярной физики и термодинамики, а также показать связь микро- и макроскопических параметров термодинамических систем.

О построении графиков.

Неумение правильно построить график по результатам проделанных измерений – очень часто встречающийся недостаток в работе студентов. Поскольку необходимость построения графиков возникает почти в каждой работе настоящего практикума, коснемся этого вопроса несколько подробнее.

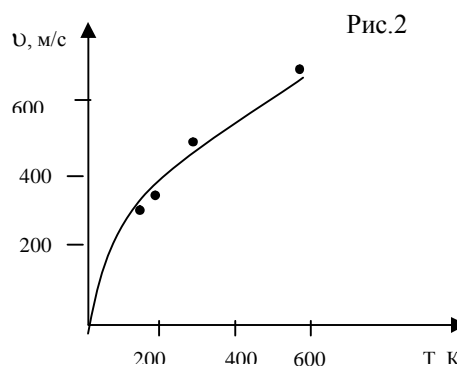
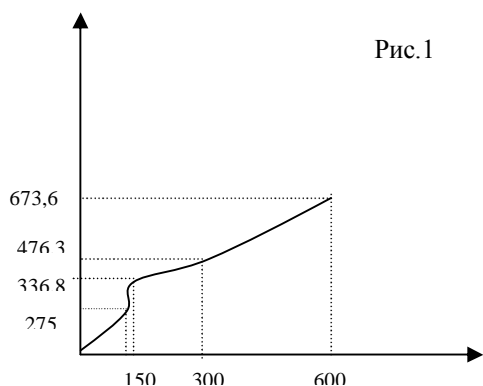
Пусть, как это требуется в одной из работ, получено несколько значений средней арифметической скорости движения молекул при соответствующих температурах газа. По этим значениям составлена таблица:

Температура T (К)	100	150	300	600
Средняя скорость $v_{\text{ср}}$ (м/с)	275	336,8	476,3	673,6

В таблице нужно обязательно писать наименование измеряемой величины, а также указать в каких единицах эта величина измерялась. По числам, занесенным в таблицу, строится график. Обычно по горизонтали откладываются значения независимой переменной, то есть той величины, которая изменяется самим экспериментатором в ходе опыта. В рассматриваемом примере такой величиной является температура. Скорость же молекул вычисляется по данным эксперимента для каждого значения температуры. Зависимые переменные обычно откладываются по вертикальной оси.

На рис. 1 приведен образец неверного (но часто встречаемого) построения графика. Здесь множество ошибок, которые перечислим, поскольку они характерны.

1. Неправильно выбран масштаб. Благодаря этому кривая занимает только половину площади графика, а остальная площадь не используется. Масштаб надо выбирать так, чтобы наибольшие значения величин, занесенных в таблицу, оказались у концов осей координат.



2. На осях координат нерационально обозначен масштаб. Для обозначения масштаба взяты цифры из таблицы. Масштаб на осях должен быть обозначен целыми числами через одинаковые отрезки.

3. На графике не обозначено какие величины и в каких единицах отложены на осях. Обозначения величин должны ставиться у концов осей, а рядом указываются единицы измерения этих величин.

4. На графике фактически не обозначены экспериментальные точки. Положение их мыслится на пересечении пунктирных линий. Каждую точку нужно обозначать, а вспомогательные линии наносить не следует.

5. Обычно студент стремится провести кривую так, чтобы она непременно проходила через все экспериментальные точки. Вследствие этого кривая принимает столь замысловатую форму (рис.1), что в нее сложно вложить какой-либо физический смысл. Надо иметь в виду, что опыт делается всегда с погрешностями, поэтому некоторые экспериментальные точки на кривую не попадут. Сама же кривая должна проводиться плавно, без необоснованных изгибов, но наиболее удовлетворяя полученным экспериментальным точкам.

График рекомендуется строить на разграфленной в клеточку бумаге или лучше на миллиметровой бумаге.

На рис.2 дано построение графика с соблюдением всех вышеуказанных требований. Этот график построен по тем же данным что и график, изображенный на рис.1.

МЕХАНИКА

Лабораторная работа 1.1 Равноускоренное движение

Цель работы: Проверка кинематических уравнений с помощью компьютерной модели.

Механическим движением называется изменение положения тела в пространстве относительно других тел.

Изменение положения тела в пространстве характеризуется перемещением и пройденным путём

Перемещением $\Delta\vec{r}$ называется вектор, соединяющий начальное и конечное положение тела.

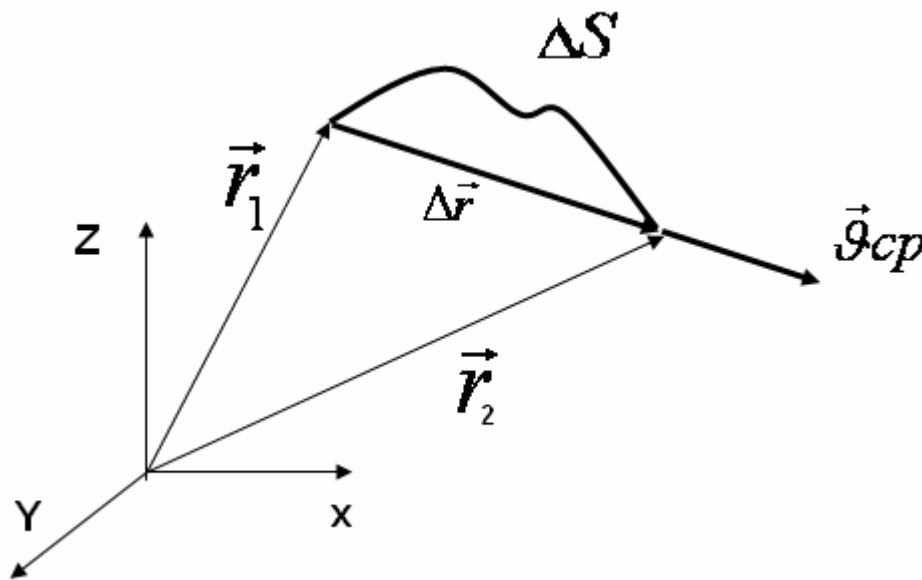
Путь (S или ΔS) это скалярная величина, равная длине отрезка траектории между начальным и конечным положением тела.

Направление и быстрота движения тела характеризуется вектором скорости.

Средняя скорость равна отношению вектора перемещения $\Delta\vec{r}$ к промежутку времени Δt в течение которого это перемещение было совершено.

$$\vec{g}_{cp} = \frac{\Delta\vec{r}}{\Delta t}$$

Направление вектора средней скорости совпадает с направлением вектора перемещения $\Delta\vec{r}$.



Средняя путевая скорость равна отношению пути ΔS , пройденного телом за промежуток времени Δt , к длительности этого промежутка:

$$g_{S\,cp} = \frac{\Delta S}{\Delta t}$$

Путевая скорость является скалярной величиной. В общем случае средняя путевая скорость $g_{S\,cp}$ не вектор.

Мгновенной скоростью \vec{g} называется скорость тела в данный момент времени в данной точке траектории. Мгновенная скорость равна пределу, к которому стремится средняя скорость при бесконечном уменьшении промежутка времени Δt , за который она определяется:

Порядок выполнения работы

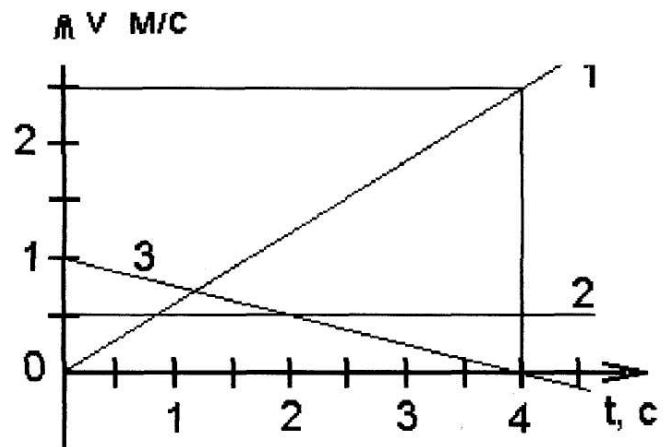
1. Загрузите программу "Физика в картинках".
2. Выберите раздел "Механика", затем лабораторную работу "Равноускоренное движение".

3. Реализуйте в компьютерном эксперименте следующие режимы движения:

- а) $v_0 = 0,2 \text{ м/с}$, $a = 0 \text{ м/с}^2$
- б) $v_0 = 0 \text{ м/с}$, $a = -0,5 \text{ м/с}^2$
- в) $v_0 = 1 \text{ м/с}$, $a = 0,1 \text{ м/с}^2$
- г) $v_0 = 1 \text{ м/с}$, $a = -0,1 \text{ м/с}^2$

Зарисуйте в тетради графики зависимости перемещения, координаты и скорости от времени.

4. На рисунке приведены графики скорости для нескольких режимов движения. Чему равно ускорение в каждом из этих случаев? Реализуйте эти режимы движения на компьютере.



5. Начальная скорость человека $v_0 = 1 \text{ м/с}$. Известно, что двигаясь с постоянным ускорением, человек через 4 с остановился. Найдите его

ускорение. Реализуйте это движение на компьютере. Через какое время он вернётся к точке старта?

Вопросы для самостоятельной подготовки:

1. Путь, перемещение, средняя и мгновенная скорости, ускорение. В каких единицах они измеряются?
2. Равномерное движение. Скорость и путь при равномерном движении, их графики.
3. Равноускоренное движение. Скорость и путь при равноускоренном движении. Графики скорости и пути.
4. Криволинейное движение. Нормальное, тангенциальное и полное ускорения при криволинейном движении.
5. Связь линейных характеристик движения с угловыми.

Лабораторная работа 1.2

Законы сохранения

Цель работы: Проверка законов сохранения в механике с помощью компьютерной модели.

Ударом принято называть кратковременное столкновение тел при котором их скорости претерпевают изменения. Результат ударного взаимодействия тел можно рассчитать, используя механические законы сохранения – закон сохранения импульса и закон сохранения энергии.

Закон сохранения импульса гласит: импульс замкнутой системы не изменяется с течением времени.

$$\vec{p} = \sum_{i=1}^n m_i \vec{v}_i = const$$

Полная механическая энергия консервативной системы не изменяется с течением времени. Этот закон называется **законом сохранения механической энергии**.

Замкнутой называют систему, на которую не действуют внешние силы. Механическая система называется консервативной, если все действующие на неё внешние и внутренние непотенциальные силы не совершают работу, а все внешние потенциальные силы неизменны во времени.

Различают абсолютно упругий и абсолютно неупругий удар. Удар называется **абсолютно неупругим**, если после удара два тела движутся как одно целое, то есть с одной и той же скоростью. **Абсолютно упругим** ударом называется такой удар, при котором механическая энергия соударяющихся тел не преобразуется в другие виды энергии.

При абсолютно неупругом ударе закон сохранения механической энергии не выполняется. А при абсолютно упругом ударе наряду с законом сохранения импульса выполняется и закон сохранения механической энергии.

Порядок выполнения работы

1. Загрузите программу “Физика в картинках”.
2. Выберите раздел “Механика”, затем демонстрацию “Упругие и неупругие соударения” и ознакомьтесь с её работой.
3. После этого в этой демонстрации нажмите вкладку



“Вопросы”.

4. Решив предложенную компьютером задачу, введите ответ в поле ввода.

5. Проведите проверку вашего решения, нажав кнопку “Проверка” в нижней части экрана. Результат проверки в показать преподавателю (Рис. 2).
6. Перейдите к следующей задаче, для этого нажмите кнопку “Следующая” в нижней части экрана.
Повторите пункты №4, №5, №6 лабораторной работы для всех последующих задач.

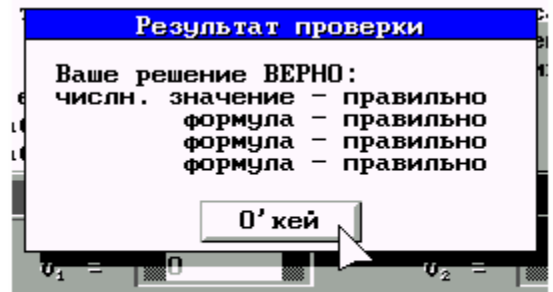


Рис. 2

7. Решения всех задач записать в тетрадь.

Замечание: после решения задач вернуться к модели вы можете при помощи вкладки “Старт”.

8. Сделайте вывод о проделанной работе и запишите его в тетрадь.
9. Дополнительное задание: ознакомьтесь с работой демонстрации “Соударения шаров”, нажмите вкладку “Вопросы” в ней и ответьте на поставленные вопросы.

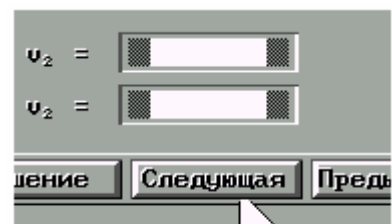


Рис. 3

10. Завершите работу программы при помощи кнопки “Выход” в левом нижнем углу экрана.

Вопросы для самостоятельной подготовки:

1. Законы Ньютона. Виды сил.
2. Потенциальная энергия. Потенциальная энергия тяготения и упругой деформации. Потенциальные силы. Консервативные системы.
3. Кинетическая энергия. Теорема о кинетической энергии.
4. Полная механическая энергия. Закон сохранения и превращения механической энергии для консервативной и неконсервативной системы. КПД машин и механизмов.
5. Импульс тела. Импульс системы тел. Закон сохранения импульса для замкнутой системы.
6. Абсолютно упругое и абсолютно неупругое соударение тел. Законы сохранения импульса и энергии для абсолютно упругого и неупругого ударов.

МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА И ТЕРМОДИНАМИКА

Лабораторная работа 2.1 Распределение Максвелла.

Цель работы: Исследование распределения молекул газа по скоростям.

Газ представляет собой совокупность множества хаотически движущихся молекул, скорости которых непрерывно изменяются. Ввиду этого невозможно определить число молекул, которые обладают заданной скоростью, поскольку в данный момент времени таких молекул может не оказаться. Но всегда можно говорить о числе молекул, скорости которых лежат в некоторых определенных интервалах значений скоростей, т.е. о распределении молекул газа по скоростям.

В газе, находящемся в состоянии равновесия, устанавливается некоторое стационарное, не меняющееся со временем распределение молекул по скоростям, которое подчиняется вполне определенному статистическому закону. Этот закон теоретически вывел в 1860 году Дж. Максвелл.

Закон Максвелла описывается некоторой функцией $f(v)$, называемой **функцией распределения молекул по скоростям**. Функция $f(v)$ определяет относительное число молекул $dN(v)/N$, скорости которых лежат в интервале от v до $v+dv$, т.е.

$$f(v) = \frac{dN(v)}{Ndv}. \quad (1).$$

Применяя методы теории вероятностей, Максвелл нашел функцию $f(v)$ – закон о распределении молекул идеального газа по скоростям:

$$f(v) = 4\pi \left(\frac{m_0}{2\pi kT}\right)^{3/2} v^2 \exp\left[-m_0 v^2 / (2kT)\right], \quad (2)$$

где m_0 - масса молекулы газа,

k – постоянная Больцмана,

T – абсолютная температура,

v - заданная скорость молекул.

Из формулы (2) видно, что конкретный вид функции зависит от рода газа (m_0) и от параметра состояния (T). График функции распределения приведен на рис. 1.

Скорость, при которой функция распределения молекул идеального газа по скоростям максимальна, называется наиболее

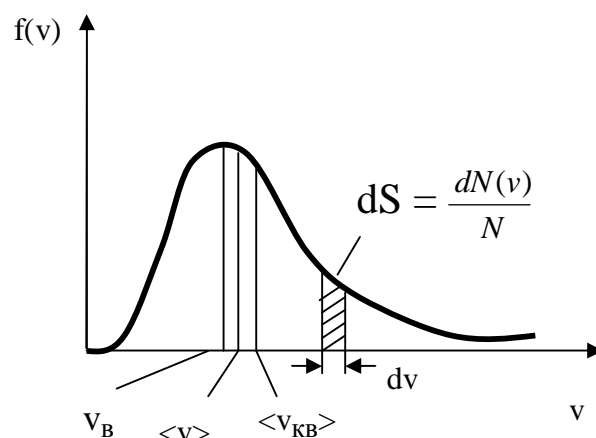


Рис.1

вероятной скоростью.

Значение наиболее вероятной скорости можно найти, продифференцировав выражение (2).

$$v_e = \sqrt{2kT/m_0} = \sqrt{2RT/\mu}. \quad (3)$$

Из формулы (3)

видно, что при

повышении

температуры

максимум функции

сместится вправо.

Однако площадь,

ограниченная кривой,

остаётся неизменной,

поэтому при

повышении

температуры кривая

распределения молекул по скоростям

будет растягиваться и понижаться

(рис. 2).

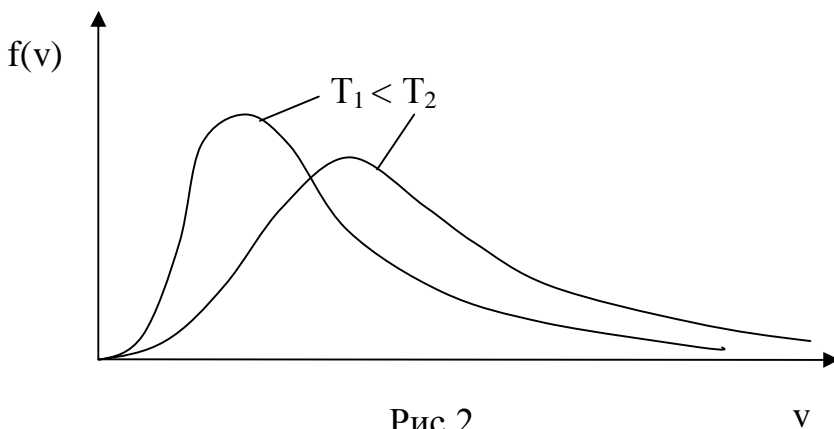


Рис.2

Средняя скорость молекулы $\langle v \rangle$ определяется по формуле:

$$\langle v \rangle = \sqrt{8kT/(\pi m_0)} = \sqrt{8RT/\pi\mu}. \quad (4)$$

При выводе максвелловского распределения молекул по скоростям предполагалось, что на молекулы газа внешние силы не действуют, поэтому молекулы равномерно распределены по объему.

Порядок выполнения работы

Задание 1 Определение наиболее вероятной скорости движения молекул азота.

1. Запустите программу “Молекулярная физика”
2. Ознакомьтесь с описанием компьютерной модели «Распределение Максвелла». Выберите в меню кнопку *Один газ*.
3. С помощью кнопки *Изменение T* установите температуру 450 К, считая $T_0 = 600$ К.
4. Дождитесь, пока кривая распределения не станет максимально приближена к вершинам каждого из столбиков. Приостановите модель нажатием клавиши PAUSE (BREAK) на клавиатуре. (Для продолжения работы модели необходимо нажать ENTER)

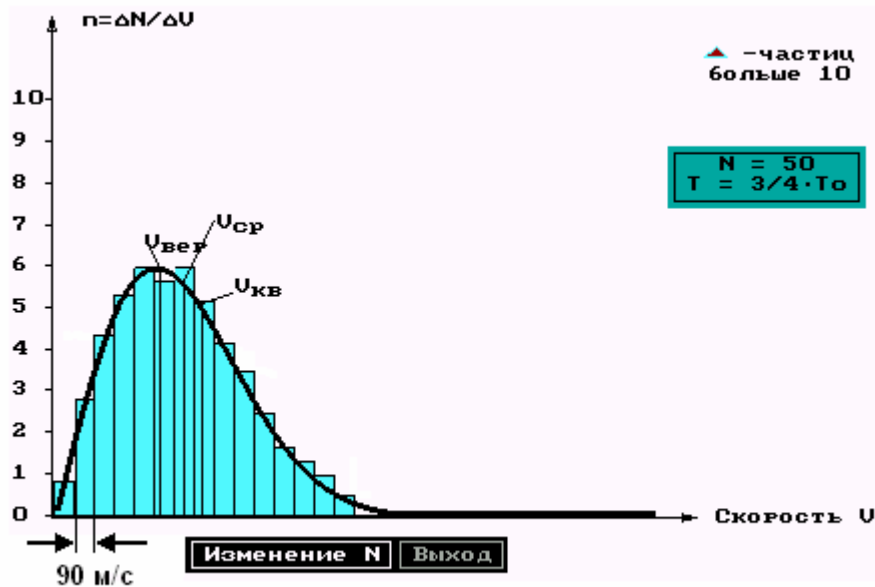


Рис. 1

5. Одно деление на оси абсцисс соответствует 90 м/с. (Рис.1) Измерьте:
- число частиц n_1 , скорости которых попали в интервал от 90 м/с до 180 м/с,
 - число частиц n_2 , скорости которых попали в интервал от 270 м/с до 360 м/с,
 - число частиц n_3 , скорости которых попали в интервал от 450 м/с до 540 м/с,
 - число частиц n_4 , скорости которых попали в интервал от 630 м/с до 720 м/с
 - число частиц n_5 , скорости которых попали в интервал от 810 м/с до 900 м/с
 - число частиц n_6 , скорости которых попали в интервал от 1080 м/с до 1170 м/с

Результаты занесите в таблицу.

$\nu \div \nu + \Delta\nu$	90 ÷ 180	270 ÷ 360	450 ÷ 540	630 ÷ 720	810 ÷ 900	1080 ÷ ...
№ опыта	n_1	n_2	n_3	n_4	n_5	n_6
№1 T=450 К						
№2 T=600 К						

6. Постройте кривую распределения молекул по скоростям $n_i(\nu)$. Определите по графику наиболее вероятную скорость молекул. Таким образом, вы получите её экспериментальное значение.
7. Вычислите теоретическое значение наиболее вероятной скорости молекул азота ($\mu = 0,028$ кг/моль) для заданной температуры по формуле (3) и сравните с экспериментальным.

8. Выполните пункты № 3 ÷ №7 лабораторной работы для температуры $T = 600 \text{ К}$. (**Замечание:** графики распределения первого и второго опыта необходимо строить в одних осях)
9. Сделайте вывод о проделанной работе и запишите его в тетрадь.
10. Завершите работу программы.

Вопросы для самостоятельной подготовки

1. Закон о распределении молекул идеального газа по скоростям.
2. Наиболее вероятная скорость молекул газа.
3. Средняя арифметическая скорость молекул газа.
4. Во сколько раз отличается средняя арифметическая скорость движения молекул кислорода от средней арифметической скорости молекул водорода?
5. Можно ли вычислить точное число молекул, обладающих скоростью 500 м/с.

Лабораторная работа 2.2 Распределение Больцмана.

Цель работы: Исследование распределения Больцмана.

При выводе распределения молекул по скоростям Максвелл не учитывал воздействие на систему внешних силовых полей (например, силу тяжести).

Однако молекулы любого газа находятся в потенциальном поле Земли. Тяготение, с одной стороны, и тепловое движение молекул – с другой, приводят к некоторому стационарному состоянию газа, при котором давление газа с высотой убывает.

С изменением высоты от h_1 до h_2 давление изменяется от p_1 до p_2 , т. е.

$$p_2 = p_1 e^{-\mu g(h_2 - h_1)/(RT)} \quad (1)$$

где μ - молярная масса газа или смеси газов, R – газовая постоянная равная 8,31 Дж/(К·моль), T – абсолютная температура.

Выражение (1) называется **барометрической формулой**. Она позволяет найти атмосферное давление в зависимости от высоты или измерив давление, найти высоту. Так как высоты обозначаются относительно уровня моря, где давление считается нормальным, то выражение (1) может быть записано в виде

$$p = p_0 e^{-\mu gh/(RT)} \quad (2)$$

где p – давление на высоте h .

Барометрическую формулу можно преобразовать, если воспользоваться выражением $p = nkT$:

$$n = n_0 e^{-\mu gh/(RT)} \quad (3)$$

где n – концентрация молекул на высоте h , n_0 - то же, на высоте $h = 0$.

Учитывая, что $\mu/R = m/k$ можно записать:

$$n = n_0 e^{-\Pi/(kT)}, \quad (4)$$

где $\Pi = m_0 gh$ – потенциальная энергия молекулы в поле тяготения.

Выражение (4) называется **распределением Больцмана**.
Распределение Больцмана справедливо для любого потенциального поля.

Порядок выполнения работы

Задание 1 Определение массы частицы.

1. Запустите программу “Молекулярная физика.”
2. Ознакомьтесь с описанием модели «Распределение Больцмана».
3. Установите число частиц в системе $N = 50$, температуру T_0 и ускорение свободного падения равным g .
4. Дождитесь, пока кривая распределения не станет максимально приближена к вершинам каждого из столбиков. Приостановите модель нажатием клавиши PAUSE (BREAK) на клавиатуре. (Для продолжения работы модели необходимо нажать ENTER)
5. На диаграмме распределения Больцмана по оси ординат откладывается шкала высот h с ценой деления 0,5 см; по оси абсцисс число частиц. Используя данную диаграмму, определите:
 - среднее число частиц n_0 , находящихся на высоте $0 \div 0,5$ см,
 - среднее число частиц n находящихся на высоте 2 см, 3 см, . . . , 9 см.
 (Рис. 1.) Полученные данные занесите в таблицу (кроме n_0).

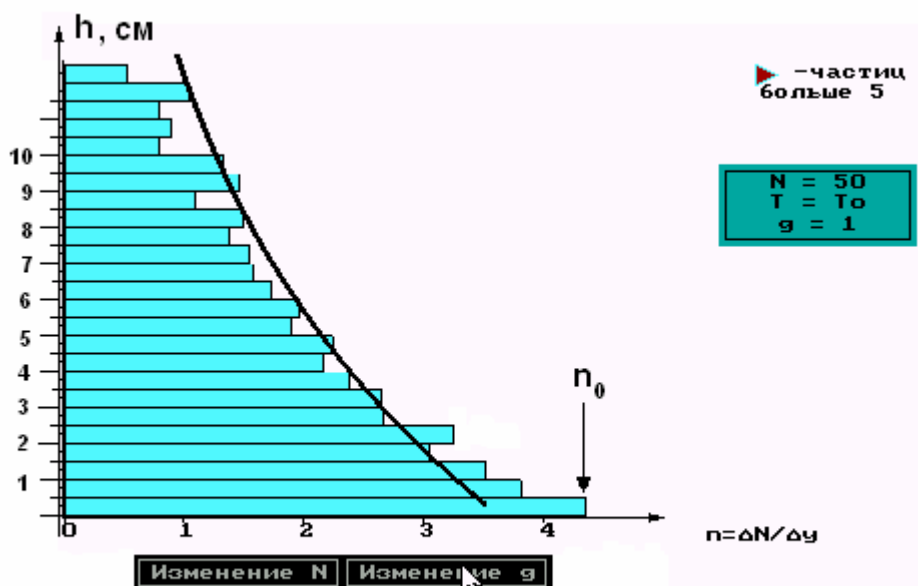


Рис. 1

6. Определите для каждого случая отношение числа частиц n_0 к числу частиц n на высоте h ; и натуральный логарифм этого отношения $\ln \frac{n_0}{n}$.
7. Прологарифмировав формулу (3) получим $\ln \frac{n_0}{n} = \mu gh/RT = mgh/kT$.
Считая температуру $T_0 = 200$ К, вычислите массу m движущихся частиц

используя полученную формулу. Определите среднее значение массы $m_{\text{ср}}$.

8. Не меняя число частиц в сосуде, установите температуру среды $T = 2 T_0$. Повторите пункты 3÷6.
9. Постройте в одних координатных осях графики зависимости числа частиц (n) от высоты (h) для двух случаев ($T = T_0$ и $T = 2T_0$)
10. Сделайте вывод о проделанной работе, завершите работу программы.

№ опыта	Высота, h (м)	Число частиц, n	$\frac{n_0}{n}$	$\ln \frac{n_0}{n}$	Масса, m	$m_{\text{ср}}$

Вопросы для самостоятельной подготовки:

1. Изменение давления газа с высотой. Барометрическая формула.
2. Распределение Больцмана.
3. Распределение Максвелла – Больцмана.
4. Можно ли указать точную границу атмосферы Земли?
5. Концентрация молекул азота $n_0(\text{N}_2)$ на нулевом уровне равна концентрации молекул водорода $n_0(\text{H}_2)$. Каким будет соотношение между концентрациями газов на высоте h ?

Лабораторная работа 2.3

Длина свободного пробега, средняя скорость движения молекул

Цель работы: изучение зависимости средней скорости теплового движения от температуры.

Молекулы газа, находясь в состоянии хаотического движения, непрерывно сталкиваются друг с другом. Под столкновением молекул подразумевается процесс их взаимодействия, в результате которого изменяются направление движения и модуль скорости молекул.

Между двумя последовательными столкновениями молекулы проходят некоторый путь, который называется **длиной свободного пробега**. В общем случае длина пути между столкновениями различна, но так как мы имеем дело с огромным числом молекул, то можно говорить о **средней длине свободного пробега** $l_{\text{ср}}$.

Расстояние d , на которое сближаются при столкновении центры молекул газа, называется **эффективным диаметром молекулы**.

Так как за 1 с молекула проходит в среднем путь, равный средней арифметической скорости $v_{\text{ср}}$, и если z - среднее число столкновений, испытываемых одной молекулой за 1 с, то средняя длина свободного пробега:

$$l_{cp} = v_{cp} / z. \quad (1)$$

Средняя скорость молекул газа, с молярной массой μ , находящегося при температуре T , находится по формуле:

$$v_{cp} = \sqrt{\frac{8RT}{\pi\mu}}, \quad (2)$$

где $R=8,31$ Дж/(моль К).

Расчеты показывают, что при учете движения всех молекул

$$Z = \sqrt{2} \pi d^2 n v_{cp}. \quad (3).$$

Тогда средняя длина свободного пробега:

$$l_{cp} = 1/(\sqrt{2} \pi d^2 n). \quad (4).$$

Порядок выполнения работы.

Задание. Исследование зависимости средней арифметической скорости движения молекул газа от температуры.

1. Запустите программу “Молекулярная физика”
2. Ознакомьтесь с описанием компьютерной модели «Длина свободного пробега». В меню выберите кнопку «столкновения».
3. С помощью кнопок меню установите температуру газа $T=T_0/2$, число частиц $N=50$, размер сосуда $L/2$.
4. Зафиксируйте 10 раз число столкновений z , начиная с пятого значения.

Число ударов
374

Вычислите среднее значение z_{cp} и занесите его в таблицу.

T	Z_{cp}	l_{cp}	$v_э$	v_T
$T_0/2$				
T_0				
$2T_0$				

5. На диаграмме распределения молекул по длинам свободного пробега $N(l)$ 1мм шкалы ординат соответствует одной молекуле. Учитывая это, измерьте (линейкой) число частиц N , обладающих длиной свободного пробега в каждом из интервалов расстояния от 0 до $L/2$ (Рис.1). Затем, считая $L = 4$ см, вычислите среднюю длину свободного пробега l_{cp} по формуле:

$$l_{cp} = (N_1 + 2 N_2 + 3 N_3 \dots + 11 N_{11}) \cdot \frac{L}{22}$$

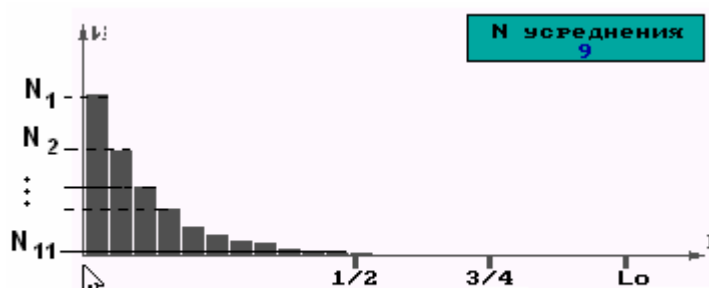


Рис. 1

6. Выразив из формулы (1), определите экспериментальное значение средней арифметической скорости движения молекул воздуха v_3 .
7. Вычислите теоретическое значение средней скорости молекул v_T воздуха ($\mu = 0,029$ кг/моль) по формуле (2), считая $T_0 = 300$ К. Результаты занесите в таблицу.
8. Установите температуру T_0 , $2T_0$ и выполните пункты 3 ÷ 7 с учетом новой температуры.
9. Постройте в системе координат $v(T)$ графики зависимостей $v_3(T)$ и $v_T(T)$.
10. Сравните графики и сделайте вывод о зависимости экспериментально найденной скорости движения молекул газа от температуры.
11. Завершите работу программы.

Вопросы для самостоятельной подготовки

1. Закон Максвелла о распределении молекул идеального газа по скоростям. Средняя скорость молекулы.
2. Среднее число столкновений молекул.
3. Средняя длина свободного пробега молекул.
4. Зависит ли средняя длина свободного пробега молекул от температуры газа? Почему?
5. Как изменится средняя длина свободного пробега молекул с увеличением давления?

Лабораторная работа 2.4 Явления переноса

Цель работы: Ознакомление с явлениями переноса.

В термодинамических неравновесных системах возникают особые *необратимые* процессы, называемые **явлениями переноса**, в результате которых происходит пространственный перенос массы, энергии, импульса. К явлениям переноса относятся **диффузия** (обусловлена переносом массы), **теплопроводность** (обусловлена переносом энергии) и **внутреннее трение** (обусловлено переносом импульса). Интенсивность процесса переноса характеризуется потоком соответствующей величины. Потоком, какой –

либо величины называется количество этой величины, проходящее в единицу времени через некоторую воображаемую поверхность.

Диффузия. Диффузией называется обусловленное тепловым движением выравнивание концентраций в смеси нескольких веществ.

Явление диффузии для химически однородного газа подчиняется **закону Фика:**

$$j_m = -D \frac{d\rho}{dx}, \quad (1)$$

где j_m - **плотность потока массы** – величина, определяемая массой вещества, диффундирующего в единицу времени через единичную площадку, перпендикулярную оси x , D – **диффузия (коэффициент диффузии)**, $d\rho/dx$ – градиент плотности, равный скорости изменения плотности на единицу длины x в направлении нормали к этой площадке. Знак минус показывает, что перенос массы происходит в направлении убывания плотности. Диффузия D численно равна плотности потока массы при градиенте плотности, равном единице. Согласно кинетической теории газов,

$$D = 1/3 v_{cp} l_{cp}, \quad (2)$$

где v_{cp} - средняя арифметическая скорость теплового движения молекул, l_{cp} - средняя длина свободного пробега.

Теплопроводность. Если в одной области газа температуру больше, чем в другой, то с течением времени вследствие постоянных столкновений молекул происходит процесс выравнивания средних кинетических энергий молекул, т.е. выравнивание температур.

Перенос энергии в форме теплоты подчиняется **закону Фурье:**

$$j_E = -\lambda \frac{dT}{dx}, \quad (3)$$

где j_E - **плотность теплового потока** – величина, определяемая энергией, переносимой в форме теплоты в единицу времени через единичную площадку, перпендикулярную оси x , λ - **теплопроводность**, dT/dx – градиент температуры, равный скорости изменения температуры на единицу длины x в направлении нормали к этой площадке. Знак минус показывает, что при теплопроводности энергия переносится в направлении убывания температуры. Теплопроводность λ численно равна плотности теплового потока при градиенте температуры, равном единице. Можно показать, что

$$\lambda = c_v \rho v_{cp} l_{cp}, \quad (4)$$

где c_v - удельная теплоемкость газа при постоянном объеме, ρ - плотность газа.

Внутреннее трение (вязкость). Предположим, что имеются два соприкасающихся слоя газа, движущихся параллельно друг другу с различными скоростями u_1 и u_2 (рис.3). Пусть в

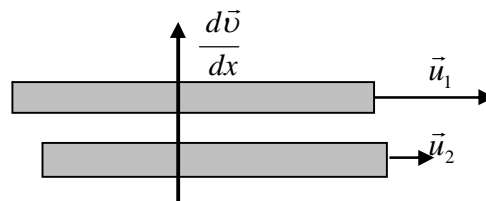


Рис. 3

некоторый момент времени слои обладают импульсами p_1 и p_2 .

Если никакого внешнего воздействия нет, их импульсы не могут оставаться неизменными, так как вследствие теплового движения происходит непрерывный переход молекул из одного слоя в другой. Попав в другой слой, молекула претерпевает столкновения с молекулами этого слоя, в результате чего она либо отдает избыток своего импульса другим молекулам (если она из слоя, движущегося быстрее), либо увеличивает свой импульс за счет других молекул (если она из слоя, движущегося медленнее). В итоге импульс слоя, движущегося быстрее, убывает, а импульс слоя, движущегося медленнее, возрастает. Сила внутреннего трения между двумя слоями газа подчиняется **закону Ньютона:**

$$F = \eta \left| \frac{dv}{dx} \right| S, \quad (5)$$

где η - динамическая вязкость, dv/dx – градиент скорости, показывающий быстроту изменения скорости в направлении x , перпендикулярном направлению движения слоев, S – площадь, на которую действует сила F . Выражение (5) можно представить в виде

$$j_p = - \eta \frac{dv}{dx}, \quad (6)$$

где j_p - **плотность потока импульса** – величина, определяемая полным импульсом, переносимым в единицу времени в положительном направлении оси x через единичную площадку, перпендикулярную оси x . Знак минус указывает, что импульс переносится в направлении убывания скорости.

Динамическая вязкость η численно равна плотности потока импульса при градиенте скорости, равном единице; она вычисляется по формуле:

$$\eta = 1/3 \rho \alpha_{cp} l_{cp} \quad (7)$$

Из сопоставления формул (1), (3) и (6), описывающих явления переноса, следует, что закономерности всех явлений переноса сходны между собой. Формулы (2), (4), и (7) связывают коэффициенты переноса и характеристики теплового движения молекул. Из этих формул вытекают простые зависимости между λ , D и η :

$$\eta = \rho D, \\ \lambda / (\eta c_v) = 1.$$

Порядок выполнения работы.

Задание 1. Диффузия газов.

1. Ознакомьтесь с описанием компьютерной модели «Диффузия газов».
2. Выберите в меню кнопку «ПАРАМЕТРЫ ГАЗА» и установите число частиц $n_1 = 1$, $n_2 = 20$.
3. Выберите в меню кнопку «ДИФФУЗИЯ». Пронаблюдайте выравнивание концентраций молекул одного сорта в сосудах, связанных копиллярным отверстием.

Задание 2. Теплопроводность.

1. Ознакомьтесь с описанием компьютерной модели «Теплопроводность».
2. Выберите в меню кнопку ΔT и установите разность температур $\Delta T = -160$ К.
3. Выберите в меню кнопку «ГИСТОГРАММА». Пронаблюдайте на протяжении 35 приближений выравнивание температур слоев газа.
4. Сделайте вывод о характере распределения температур слоев газа.

Задание 3. Вязкость.

1. Ознакомьтесь с описанием компьютерной модели «Вязкость».
2. Выберите в меню нижней части экрана кнопку «ЭКСПЕРИМЕНТ», установите «**Поток газа**». Затем необходимо нажать кнопку «**Старт**» в том же меню.
3. Диаметр трубы $D_0 = 9$ мм, т.е. одно деление на оси ординат соответствует 1 мм. Одно деление на оси абсцисс соответствует 1 м/с. Измерьте не менее 5 раз значение приращения скорости Δv при переходе от слоя, расположенного на отметке $x_1 = 2$ мм, к слою, расположенному на отметке $x_2 = 3$ мм. (Рис. 1).

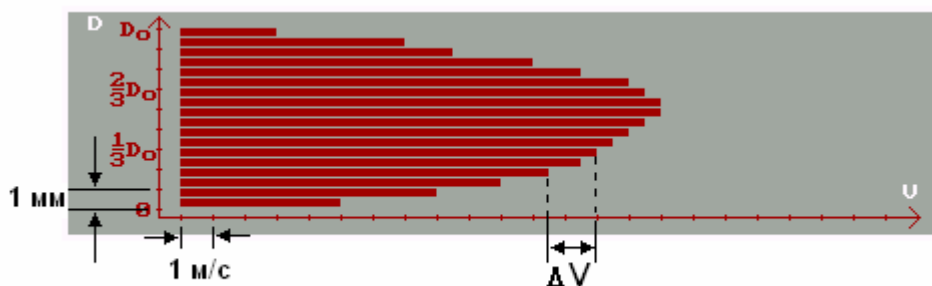


Рис. 1

4. Вычислите среднее значение приращения скорости $\Delta v_{\text{ср.}}$. Определите градиент скорости: $\Delta v_{\text{ср.}} / \Delta x$.
5. Рассчитайте вязкость азота по формуле (7), учитывая, что при нормальных условиях $l_{\text{ср}} = 10^{-9}$ м, $v_{\text{ср}} = 474$ м/с и $\rho = 10^{-3}$ кг/м³.
6. Вычислите по формуле (5) силу внутреннего трения, действующую на площадь соприкосновения слоев $S = 2 \cdot 10^{-4}$ (см²).
7. Сделайте вывод о проделанной работе.
8. Завершите работу программы.

Вопросы для самостоятельной подготовки

1. Диффузия. Закон Фика. Коэффициент диффузии.
2. Теплопроводность. Закон Фурье. Коэффициент теплопроводности.
3. Внутреннее трение. Закон Ньютона. Динамическая вязкость.
4. Связь между коэффициентами переноса.
5. При каких условиях возникают явления переноса?
6. Как связаны между собой коэффициенты переноса?

Лабораторная работа 2.5 Цикл Карно.

Цель работы: Выяснить с помощью компьютерной модели зависимость КПД цикла от температуры термостатов.

Процессы, происходящие в термодинамической системе разделяют на обратимые и необратимые. **Обратимым** называется процесс, в котором, при протекании обратного процесса, система будет проходить те же равновесные состояния, что и при прямом ходе, но в обратной последовательности.

В ходе любого обратимого процесса идеальный газ подчиняется уравнению состояния:

$$pV = \frac{m}{\mu} RT. (1)$$

Процесс, при котором неизменной остается температура газа называется **изотермическим**. Из уравнения (1) следует, что в случае идеального газа при изотермическом процессе давление и объем связаны соотношением (закон Бойля – Мариотта):

$$pV = \text{const.} (2)$$

Диаграмма изотермического процесса (изотерма) в координатах p , V представляет собой гиперболу (рис. 4), расположенную на диаграмме тем выше, чем выше температура, при которой происходит процесс.

Процесс, при котором отсутствует теплообмен ($\delta Q = 0$) между системой и окружающей средой, называется **адиабатическим**. К адиабатическим процессам можно отнести все быстротекущие процессы. Адиабатический процесс подчиняется уравнению Пуассона:

$$pV^\gamma = \text{const.} (3)$$

Безразмерная величина γ в уравнении (3) называется показателем адиабаты или коэффициентом Пуассона:

$$\gamma = \frac{C_p}{C_v} = \frac{c_p}{c_v} = \frac{(i+2)}{i}, (4)$$

где C_p - удельная теплоемкость газа при постоянном давлении,

C_v - удельная теплоемкость газа при постоянном объеме,

i - число степеней свободы молекул газа.

На рис.4 видно, что адиабата более крута, чем изотерма. Это объясняется тем, что при адиабатическом сжатии увеличение давления газа обусловлено не только уменьшением его объема, как при изотермическом сжатии, но и повышением температуры.

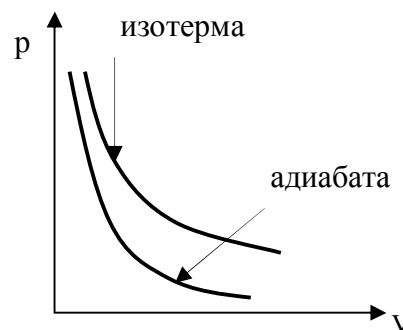


Рис. 4

Термодинамика возникла как наука о превращении теплоты в работу. В задачу этой науки входило создание наиболее эффективных тепловых

машин. Эффективность тепловой машины принято характеризовать *коэффициентом полезного действия* (η), который определяется как отношение совершаемой за цикл работы A к получаемому от нагревателя за цикл количеству теплоты Q_1 :

$$\eta = \frac{A}{Q_1}. \quad (5)$$

Коэффициент полезного действия необратимой тепловой машины всегда меньше, чем обратимой машины, работающей в аналогичных условиях. Обратимый цикл, совершаемый в тепловой машине рабочим телом, вступающим в теплообмен с двумя резервуарами бесконечно большой теплоемкости (нагревателем и холодильником), может состоять только из двух изотерм (при температурах резервуаров) и двух адиабат (рис. 5). Такой цикл был впервые введен в рассмотрение французским физиком Сади Карно и носит название *цикла Карно*. Коэффициент полезного действия цикла Карно определяется формулой

$$\eta = \frac{T_1 - T_2}{T_1}, \quad (6)$$

где T_1 - температура нагревателя, а T_2 - температура холодильника.

Коэффициент полезного действия всех обратимых тепловых машин, работающих в идентичных условиях, одинаков и определяется только температурами нагревателя и холодильника. Это утверждение носит название теоремы Карно.

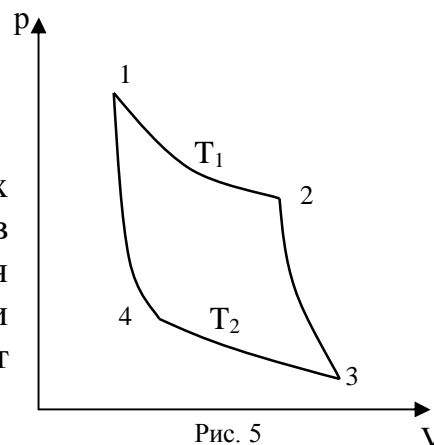




Рис. 5


Порядок выполнения работы.

Задание 1. Изотерма и адиабата.

1. Ознакомьтесь с описанием компьютерной модели «Изотерма и адиабата».
2. Пронаблюдайте экспериментальные графики изотермического и адиабатного процессов при различных температурах.

Задание 2. Определение зависимости КПД цикла Карно от температур нагревателя и охладителя..

1. Запустите программу «Молекулярная физика».
2. Ознакомьтесь с описанием компьютерной модели «Цикл Карно».
3. Нажмите кнопку ПУСК. Определите по строке параметров температуру нагревателя T_1 .
4. Установите температуру $T_1 = 380^0$. Для этого нажмите кнопку «ИЗМЕНЕНИЕ ТЕМПЕРАТУР» «», затем «». Если исходная температура ниже 380^0 , то перейдите с помощью клавиш клавиатуры к выше лежащей изотерме. Подтвердите свой выбор нажатием клавиши ENTER.

5. Аналогично установите температуру $T_2 = 220^0$.
6. Нажмите кнопку «». Зарисуйте цикл Карно в координатах $p - V$. Дождитесь пока модель завершит цикл и зарисуйте его в осях $S - T$, где S – энтропия.
7. Занесите в таблицу значение работы A , совершенной за цикл, количества теплоты Q_1 , полученного от нагревателя и КПД машины.(Рис. 1)

$T_1 = 340^0$	$U_1 = 15$
$T_2 = 220^0$	$U_2 = 23$
$A=16$	$Q=47 \quad \eta=0.35$

Рис. 1

8. Вычислите приращение энтропии ΔS , полученное при изотермическом расширении по формуле $\Delta S = \frac{Q_1}{T_1}$.
9. Установите температуру $T_2=200^0$, а затем 180^0 и выполните пункты № 6, №7 и №8
- 10.Сделайте вывод о зависимости КПД тепловой машины и приращения энтропии от температур нагревателя и холодильника.
- 11.Завершите работу программы.

$T_1 - T_2 (^0 C)$	$A, (Дж)$	$Q_1, (Дж)$	$\eta (%)$	$\Delta S, (Дж/К)$

Вопросы для самостоятельной подготовки

1. Обратимые и необратимые процессы.
2. Применение первого начала термодинамики к изотермическому процессу. Закон Бойля - Мариотта.
3. Применение первого начала термодинамики к адиабатическому процессу. Уравнение Пуассона.
4. Цикл Карно. Теорема Карно.
5. Почему адиабата более крута, чем изотерма?
6. Как изменится температура газа при его адиабатическом сжатии?
7. Изобразите в системе координат T, S изотермический и адиабатический процессы.
8. Может ли аргон являться рабочим телом в идеальной тепловой машине?

Лабораторная работа 2.6

Энтропия.

Цель работы: Убедиться на компьютерной модели в справедливости закона возрастания энтропии.

Первое начало термодинамики является законом сохранения энергии для термодинамических процессов, но оно не указывает направления протекания процессов. Для определения направленности процессов в природе вводят физическую величину – энтропию.

Для того чтобы ввести понятие энтропии рассматривают **приведенное количество теплоты** - отношение теплоты Q , полученной телом в изотермическом процессе, к температуре T теплоотдающего тела. Строгий анализ показывает, что приведенное количество теплоты, сообщаемое телу в любом обратимом круговом процессе, равно нулю:

$$\oint \frac{\delta Q}{T} = 0. (1)$$

Из равенства (1) следует, что подынтегральное выражение $\frac{\delta Q}{T}$ есть полный дифференциал некоторой функции, которая определяется только состоянием системы и не зависит от пути, каким система пришла в это состояние. Таким образом,

$$\frac{\delta Q}{T} = dS. (2)$$

Функция состояния, дифференциалом которой является $\delta Q/T$, называется энтропией и обозначается S .

Энтропия обладает свойством *аддитивности*: *энтропия системы равна сумме энтропий тел, входящих в систему*.

Энтропия замкнутой системы может либо возрастать (в случае необратимых процессов), либо оставаться постоянной (в случае обратимых процессов):

$$\Delta S \geq 0. (3)$$

Выражение (3) носит название **неравенства Клаузиуса**.

Количественной характеристикой теплового состояния тела (макросистемы) является его **термодинамическая вероятность W** или **статистический вес**. **Термодинамическая вероятность** состояния системы – это число способов, которыми может быть реализовано данное состояние макроскопической системы, или число микросостояний, осуществляющих данное макросостояние ($W \geq 1$).

Согласно Больцману **энтропия** системы и термодинамическая вероятность связаны между собой следующим образом:

$$S = k \ln W, (4)$$

где k – постоянная Больцмана.

Формула Больцмана (4) позволяет дать энтропии следующее *статистическое* толкование: *энтропия является мерой неупорядоченности*

системы. В самом деле, чем больше число микросостояний, реализующих данное макросостояние, тем больше энтропия.

Используя понятие энтропии и неравенство Клаузиуса, можно сформулировать **второе начало термодинамики** как **закон возрастания энтропии** замкнутой системы при необратимых процессах: *любой необратимый процесс в замкнутой системе происходит так, что энтропия системы при этом возрастает.*

Отметим еще раз, что *энтропия остается постоянной в замкнутой системе только при обратимых процессах.*

При абсолютном нуле температуры всякое тело, как правило, находится в состоянии, термодинамическая вероятность которого равна единице. Согласно формуле (4) энтропия в этом случае равна нулю. Отсюда следует, что *энтропия любого тела в состоянии равновесия стремится к нулю по мере приближения температуры к нулю Кельвина:*

$$\lim_{T \rightarrow 0} S = 0. \quad (5)$$

Это утверждение называют теоремой Нернста или третьим началом термодинамики.

Порядок выполнения работы.

Задание 1. Энтропия смеси двух газов.

1. Ознакомьтесь с описанием компьютерной модели «Энтропия».
2. Установите с помощью кнопки «ИЗМЕНЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ» $T_1 = 50 \text{ К}$ и $T_2 = 150 \text{ К}, 250 \text{ К}, 350 \text{ К}, 450 \text{ К}$.
3. Пронаблюдайте возрастание энтропии смеси по сравнению с суммой начальных энтропий двух газов при необратимом смешении газов.
4. Сделайте вывод о характере изменения энтропии газа при передаче ему тепла в изохорном процессе.

Вопросы для самостоятельной подготовки

1. Энтропия как функция состояния системы. Свойства энтропии..
2. Статистическое толкование энтропии.
3. Неравенство Клаузиуса. Второе начало термодинамики.
4. Третье начало термодинамики. Теорема Нернста.
5. В каком направлении может изменяться энтропия замкнутой системы? Незамкнутой системы?
6. Дайте понятие энтропии (определение, размерность и математическое выражение).
7. В чем заключается физический смысл энтропии?
8. Объясните смысл формулы Больцмана.

Литература.

1. Грабовский Р.И. «Курс физики» - М., Высшая школа, 2002.
2. Савельев И.В. Курс общей физики: т. I-III, М.: Наука, 1989.
3. Трофимова Т.И. Курс физики: Учеб пособие для вузов. – М.: Высш.шк., 2004
4. Роджерс Э. Физика для любознательных. – М.: МИР, 1970.
5. Фриш С. Э., Тиморева А.В. Курс общей физики – М.: Физматгиз, 1962.
6. Кольчугин Н.А. Курс физики. Механика. Молекулярная физика. Самара: Самар.гос.техн.ун-т, 1999.
7. Киттель Ч., Найт У., Рудерман М., Вихман Э., Ритер Ф., Берклеевский Курс физики, М.: Наука, 1971-1974, т. I-V.
8. Сивухин Д.В. Общий курс физики, М.: Наука, 1979-1989, т. I-V.
9. Ахнезер А.И., Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Курс общей физики, М.: Наука, 1969.
10. Астахов А.В., Широков Ю.М. Курс физики.
11. Фейнман Р., Литтон Р., Сэндс М. Фейнмановские лекции по физике, М.: Мир 1965-1967, вып. 1-9.
12. Матвеев А.Н. Курс общей физики, М.: Высшая школа, 1976-1989, т I-V.