

УТВЕРЖДЕНО  
Проректор по учебной работе  
А. А. Воронов  
17 января 2023 года

## ПРОГРАММА

по дисциплине: **Общая физика:**

**термодинамика и молекулярная физика**

по направлению подготовки: **03.03.01 «Прикладные математика и физика»**

**16.03.01 «Техническая физика»**

физтех-школа: **для всех физтех-школ кроме ФБВТ**

кафедра: **общей физики**

курс: 1

семестр: 2

лекции – 30 часов

практические (семинарские)

занятия – 30 часов

лабораторные занятия – 60 часов

Экзамен – 2 семестр

Диф. зачёт – 2 семестр

**ВСЕГО АУДИТОРНЫХ ЧАСОВ – 120**

**Самостоятельная работа:**

**теор. курс – 90 часов**

**физ. практикум – 75 часов**

Программу и задание составили:

д.ф.-м.н., проф. Гавриков А. В.

к.ф.-м.н., доц. Крымский К. М.

к.ф.-м.н., доц. Клименок К. Л.

к.ф.-м.н., доц. Попов П.В.

к.ф.-м.н., доц. Холин Д.И.

к.ф.-м.н., доц. Юдин И.С.

Программа принята на заседании кафедры  
общей физики 15 декабря 2022 г.

Заведующий кафедрой  
д.ф.-м.н., профессор

А. В. Максимычев

# ТЕРМОДИНАМИКА И МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА

**1.** Основные понятия, задачи и методы молекулярной физики. Макроскопические параметры, термодинамическая система, термодинамические параметры, термодинамическое равновесие. Нулевое начало термодинамики. Термическое и калорическое уравнения состояния.

Идеальный газ. Связь давления идеального газа с кинетической энергией молекул. Уравнение состояния идеального газа. Внутренняя энергия идеального газа. Идеально-газовое определение температуры.

Работа, внутренняя энергия, теплота. Первое начало термодинамики. Теплоёмкость. Теплоёмкости при постоянном объёме и постоянном давлении, соотношение Майера для идеального газа. Адиабатический и политропический процессы. Адиабата и политропа идеального газа.

Скорость звука в газах.

**2.** Циклические процессы. Тепловые машины. КПД тепловой машины. Цикл Карно. Теоремы Карно. Холодильная машина и тепловой насос. Обратимые и необратимые процессы. Второе начало термодинамики. Эквивалентные формулировки второго начала. Неравенство Клаузиуса.

Термодинамическое определение энтропии. Изменение энтропии в обратимых и необратимых процессах, закон возрастания энтропии. Энтропия идеального газа. Неравновесное расширение идеального газа в пустоту.

**3.** Термодинамические функции и их свойства. Термодинамические потенциалы: внутренняя энергия, энтальпия, свободная энергия, энергия Гиббса. Преобразования термодинамических функций. Соотношения Максвелла.

Максимальная работа системы при контакте с термостатом. Максимальная полезная работа системы.

**4.** Применение термодинамических потенциалов. Термодинамика излучения. Адиабатическое растяжение резинового и металлического стержней. Тепловое расширение твёрдых тел.

Поверхностные явления. Краевые углы, смачивание и несмачивание. Формула Лапласа. Свободная и внутренняя энергия поверхности.

**5.** Фаза и агрегатное состояние. Классификация фазовых переходов (I и II рода). Экстенсивные и интенсивные величины. Химический потенциал. Условия равновесия фаз для переходов I рода. Уравнение Клапейрона–Клаузиуса. Кривая фазового равновесия «жидкость–пар», зависимость давления насыщенного пара от температуры.

Фазовые диаграммы. Тройная точка. Диаграмма состояния «лёд–вода–пар». Критическая точка.

Метастабильные состояния. Перегретая жидкость и переохлаждённый пар. Зависимость давления пара от кривизны поверхности жидкости. Кипение. Роль зародышей в образовании фазы.

**6.** Газ Ван-дер-Ваальса как модель реального газа. Внутренняя энергия и энтропия газа Ван-дер-Ваальса. Изотермы газа Ван-дер-Ваальса и их связь с изотермами реальной системы. Правило Максвелла (правило рычага). Критические параметры и приведённое уравнение состояния. Адиабата газа Ван-дер-Ваальса. Неравновесное расширение газа Ван-дер-Ваальса в пустоту.

**7.** Уравнение Бернулли. Изоэнтропическое течение идеального газа, истечение газа из отверстия. Эффект Джоуля–Томсона, температура инверсии.

**8.** Элементы теории вероятностей. Дискретные и непрерывные случайные величины, плотность вероятности. Условие нормировки. Средние величины и дисперсия. Независимые случайные величины. Нормальный закон распределения. Зависимость дисперсии суммы независимых слагаемых от их числа («закон  $\sqrt{N}$ »).

**9.** Распределение Максвелла: распределения частиц по компонентам скорости и абсолютным значениям скорости. Наиболее вероятная, средняя и среднеквадратичная скорости. Распределение Максвелла по энергиям.

Элементы молекулярно-кинетической теории. Плотность потока частиц, движущихся в заданном направлении. Среднее число и средняя энергия частиц, вылетающих в вакуум через малое отверстие в сосуде.

Распределение Больцмана в поле внешних сил. Барометрическая формула. Распределение Максвелла—Больцмана.

**10.** Элементы статистической физики классических идеальных систем. Фазовое пространство, макро- и микросостояния, статистический вес макросостояния. Статистическое определение энтропии. Статистическая сумма. Аддитивность энтропии независимых подсистем. Закон возрастания энтропии. Третье начало термодинамики (теорема Нернста). Понятие о каноническом распределении Гиббса. Распределение Гиббса–Больцмана для идеального газа.

Зависимость статистического веса и энтропии от числа частиц в системе. Изменение энтропии при смешении газов, парадокс Гиббса.

**11.** Приложения статистической физики. Классическая теория теплоёмкостей: закон равномерного распределения энергии теплового движения по степеням свободы. Теплоёмкость кристаллов (закон Дюлонга–Пти). Элементы квантовой теории теплоёмкостей. Замораживание степеней свободы, характеристические температуры. Зависимость теплоёмкости  $C_V$  газов от температуры.

Статистическая температура. Свойства двухуровневой системы, инверсная заселённость.

**12.** Флуктуации. Связь вероятности флуктуации с изменением энтропии системы. Флуктуации аддитивных величин, зависимость флуктуаций от числа частиц. Флуктуация числа частиц в выделенном объёме. Флуктуация энергии системы в жёсткой термостатированной оболочке. Флуктуация объёма в изотермическом и адиабатическом процессах. Влияние флуктуаций на чувствительность измерительных приборов.

**13.** Столкновения. Эффективное газокинетическое сечение. Длина свободного пробега. Распределение молекул по длинам свободного пробега. Число столкновений молекул в единице объёма.

Явления молекулярного переноса: диффузия, теплопроводность, вязкость. Законы Фика, Фурье и Ньютона. Коэффициенты переноса в газах. Уравнение диффузии и теплопроводности. Температуропроводность. Стационарные и квазистационарные распределения концентрации и температуры.

**14.** Диффузия как процесс случайных блужданий. Задача о случайных блужданиях, среднеквадратичное смещение частицы при большом числе шагов. Расплывание облака частиц. Распространение тепла за счёт теплопроводности.

Броуновское движение макроскопических частиц. Закон Эйнштейна–Смолуховского для смещения броуновской частицы. Связь подвижности частицы и коэффициента диффузии облака частиц (соотношение Эйнштейна).

**15.** Явления переноса в разреженных газах. Эффект Кнудсена (эффузия). Течение разреженного газа по прямолинейной трубе. Зависимость коэффициента теплопроводности разреженного газа от давления.

**16.** \*Элементы неравновесной термодинамики. Локальное термодинамическое равновесие. Термодинамические силы и потоки, соотношения взаимности Онзагера, перекрёстные термодинамические явления (термоэлектрический эффект, термомеханический и механокалорический эффекты). Производство энтропии, принципы минимума производства энтропии и наименьшего рассеяния энергии в необратимых термодинамических процессах. Нелинейная термодинамика, динамические структуры, "порядок из хаоса" (ячейки Бенара, реакция Белоусова-Жаботинского).

## ЛИТЕРАТУРА

### Основная литература

1. *Кириченко Н.А.* Термодинамика, статистическая молекулярная физика. – М.: Физматкнига, 2012.
2. *Сивухин Д.В.* Общий курс физики. Т. II. Термодинамика и молекулярная физика. – М.: Физматлит, 2006.
3. *Белонучкин В.Е., Заикин Д.А., Ципенюк Ю.М.* Основы физики. Курс общей физики. Т. 2. Квантовая и статистическая физика / под ред. Ю.М. Ципенюка. Часть V. Главы 1–4. – М.: Физматлит, 2001.
4. *Белонучкин В.Е.* Краткий курс термодинамики. – М.: МФТИ, 2010.
5. Лабораторный практикум по общей физике. Т. 1 / под ред. А.Д. Гладуна. – М.: МФТИ, 2012.
6. Сборник задач по общему курсу физики. Ч. 1 / под ред. В.А. Овчинкина (3-е изд., испр. и доп.). – М.: Физматкнига, 2013.

### Дополнительная литература

1. *Щёголев И.Ф.* Элементы статистической механики, термодинамики и кинетики. – М.: Янус, 1996; М.: Интеллект, 2008.
2. *Базаров И.П.* Термодинамика. – М.: Высшая школа, 1983.
3. *Рейф Ф.* Статистическая физика (Берклеевский курс физики). Т. 5. – М.: Наука, 1972.
4. *Калашиников Н.П., Смондырев М.А.* Основы физики. — М.: Лаборатория знаний, 2017.
5. *Пригожин И., Кондепуди Д.* Современная термодинамика. От тепловых двигателей до диссипативных структур. – М.: Мир, 2009.
6. *Корявов В.П.* Методы решения задач в общем курсе физики. Термодинамика и молекулярная физика. – М.: Высшая школа, 2009.
7. *Прут Э.В., Кленов С.Л., Овсянникова О.Б.* Введение в теорию вероятностей в молекулярной физике. – М.: МФТИ, 2002. Элементы теории флуктуаций и броуновского движения в молекулярной физике. – М.: МФТИ, 2002.
8. *Прут Э.В.* Теплофизические свойства твёрдых тел. – М.: МФТИ, 2009.
9. *Булыгин В.С.* Теоремы Карно. – М.: МФТИ, 2012; Теплоёмкость и внутренняя энергия газа Ван-дер-Ваальса. – М.: МФТИ, 2012; Некоторые задачи теории теплопроводности. – М.: МФТИ, 2006; Теплоёмкость идеального газа. – М.: МФТИ, 2019.
10. *Попов П.В.* Диффузия. – М.: МФТИ, 2016.

### Электронные ресурсы

[http://physics.mipt.ru/S\\_II/method/](http://physics.mipt.ru/S_II/method/)

## ЗАДАНИЕ ПО ФИЗИКЕ

для студентов 1-го курса на весенний семестр 2022/2023 учебного года

Дата	№ нед.	Тема семинарских занятий	Задачи		
			0	I	II
1–7 февр.	1	Первое начало термодинамики. Теплоёмкость. Адиабатический и политропический процессы.	<sup>0</sup> <sub>1</sub> <sup>0</sup> <sub>2</sub> <sup>0</sup> <sub>3</sub>	1.40 1.54 1.87 2.6	1.100 T1 1.75 1.83
8–14 февр.	2	Тепловые машины. Второе начало термодинамики. Изменение энтропии в обратимых процессах.	<sup>0</sup> <sub>4</sub> <sup>0</sup> <sub>5</sub> <sup>0</sup> <sub>6</sub>	3.25 3.43 T2 4.80	3.52 3.47 4.15 4.73
15–21 февр.	3	Изменение энтропии в необратимых процессах. ----- Термодинамические потенциалы.	<sup>0</sup> <sub>7</sub> <sup>0</sup> <sub>8</sub> <sup>0</sup> <sub>9</sub>	4.75 4.43/44 5.75 5.38	4.47 T3 5.32 5.54
22–28 февр.	4	Преобразования термодинамических функций. Поверхностное натяжение.	1.3 <sup>0</sup> <sub>10</sub> <sup>0</sup> <sub>11</sub> <sup>0</sup> <sub>12</sub>	5.16 5.28 12.8 5.42	5.63 T4 12.9 12.38
1–7 мар.	5	Фазовые превращения. Уравнение Клапейрона–Клаузиуса. Кипение.	<sup>0</sup> <sub>13</sub> <sup>0</sup> <sub>14</sub> <sup>0</sup> <sub>15</sub>	11.29 11.16 11.34 12.51	T5 11.74 11.78 12.48
8–14 мар.	6	Реальные газы. ----- Течение газов. Эффект Джоуля—Томсона.	<sup>0</sup> <sub>16</sub> <sup>0</sup> <sub>17</sub> <sup>0</sup> <sub>18</sub>	T6 6.52 2.11 6.68/69	6.41 6.73 6.87 2.20
15–21 мар.	7	Контрольная работа по 1-му заданию (по группам).			
22–28 мар.	8	Сдача 1-го задания.			
29 мар.–4 апр.	9	Основы молекулярно-кинетической теории. Распределение Максвелла.	<sup>0</sup> <sub>19</sub> <sup>0</sup> <sub>20</sub> 7.52	7.18 7.14 7.20 7.19	7.70 7.16 7.53 7.67
5–11 апр.	10	Основы молекулярно-кинетической теории. Распределение Больцмана.	<sup>0</sup> <sub>21</sub> <sup>0</sup> <sub>22</sub>	7.24 8.11 8.55 8.14	7.40 7.80 T7 8.25

12–18 апр.	<b>11</b>	Элементы статистической физики. Теория теплоёмкостей. Статистический смысл энтропии.	<sup>0</sup> 23 <sup>0</sup> 24 <sup>0</sup> 25	8.56 8.52 9.45 Т8	8.70 8.61 8.51 Т9
19–25 апр.	<b>12</b>	Флуктуации <hr/> Столкновения, длина свободного пробега.	<sup>0</sup> 26 <sup>0</sup> 27 <sup>0</sup> 28	9.6 9.8 9.28	9.23 9.40 9.31
26 апр.– –2 мая.	<b>13</b>	Явления переноса.	<sup>0</sup> 29 <sup>0</sup> 30 <sup>0</sup> 31	10.15 10.36 10.134 10.106	10.16 10.143 10.25 Т10
3–9 мая	<b>14</b>	Броуновское движение. Течение газов. Явления в разреженных газах.	<sup>0</sup> 32 <sup>0</sup> 33 <sup>0</sup> 34 <sup>0</sup> 35	Т11 10.92 10.68/69 10.120	Т12 10.30 10.54 10.77
10–23 мая	<b>15/16</b>	Сдача 2-го задания.			

### **Примечание**

Номера задач указаны по “Сборнику задач по общему курсу физики. Ч. 1. Механика, термодинамика и молекулярная физика” / под ред. В.А. Овчинкина (4-е изд., испр. и доп.). — М.: Физматкнига, 2016.

Все задачи обязательны для сдачи задания, их решения должны быть представлены преподавателю на проверку. В каждой теме семинара задачи разбиты на 3 группы:

- задачи, которые студент должен решать в течение недели для подготовки к семинару;
- задачи, рекомендованные для разбора на семинаре (преподаватель может разбирать на семинарах и другие равноценные задачи по своему выбору);
- задачи для самостоятельного решения.

### **Задачи 0 группы**

**1.** В комнате объёмом  $V$  в течение некоторого времени был включён нагреватель. В результате температура воздуха увеличилась от  $T_1$  до  $T_2$ . Давление в комнате не изменилось. Найти изменение внутренней  $\Delta U$  энергии воздуха, содержащегося в комнате.

**2.** Найти работу, которую совершает моль воздуха, расширяясь от объёма  $V_0$  до  $V_1 = 2V_0$  в изотермическом процессе при комнатной температуре.

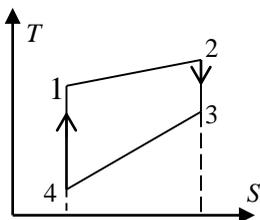
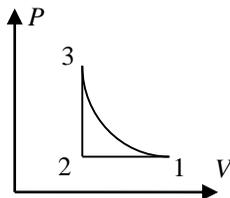
Ответ: 1,7 кДж.

3. Температура воздуха равна  $T = 273$  К. Найти изменение скорости звука при изменении температуры на  $\Delta T = 1$  К.

Ответ:  $\Delta c_s \approx \frac{1}{2} \frac{\Delta T}{T} c_s = 0,61$  м/с.

4. Вычислить КПД цикла, состоящего из изобарного сжатия, изохорного нагревания и адиабатического расширения, если отношение максимального и минимального объёмов равно 2. Рабочее тело – двухатомный идеальный газ.

Ответ: 0,15.



5. Тепловая машина с неизвестным веществом в качестве рабочего тела совершает обратимый термодинамический цикл, представленный на рисунке в координатах  $TS$ .  $T_2 = \frac{3}{2}T_1$ ,  $T_3 = \frac{3}{4}T_1$ ,  $T_4 = \frac{1}{20}T_1$ . Найти КПД цикла.

Ответ: 0,68.

6. Идеальная тепловая машина, работающая по обратному циклу (тепловой насос), отбирает от первого резервуара 65 Дж теплоты и передаёт количество теплоты 80 Дж второму резервуару при  $T = 320$  К. Определить температуру первого резервуара.

Ответ: 260 К.

7. Два теплоизолированных сосуда равного объёма соединены трубкой с краном. В одном сосуде содержится 10 г водорода  $H_2$ , второй откачан до высокого вакуума. Кран открывают и газ расширяется на весь объём. Считая газ идеальным, найти изменение его энтропии к моменту установления равновесия.

Ответ:  $\Delta S = 28,8$  Дж/К.

8. Кусок льда массой 90 г, имеющий температур  $0^\circ\text{C}$ , положили в пустую алюминиевую кастрюлю массой 330 г, нагретой до  $100^\circ\text{C}$ . Пренебрегая теплообменом с окружающей средой, найти изменение энтропии системы к моменту установления равновесия. Теплота плавления льда 330 Дж/г, теплоёмкость алюминия 0,9 Дж/(г · К).

Ответ:  $\Delta S = 16,1$  Дж/К.

9. Найти изменение свободной энергии  $\Delta F$  и термодинамического потенциала Гиббса  $\Delta G$  для 1 кг водяного пара при изотермическом ( $T = 298 \text{ K}$ ) увеличении давления от 1,0 до 2,0 мбар. Водяной пар считать идеальным газом.

Ответ:  $\Delta G = \Delta F = 95,4 \text{ кДж}$ .

10. Уравнение состояния резиновой полосы имеет вид  $f = aT \left[ \frac{l}{l_0} - \left( \frac{l_0}{l} \right)^2 \right]$ , где  $f$  — натяжение,  $a = 1,3 \cdot 10^{-2} \text{ Н/К}$ ,  $l$  — длина полосы, длина недеформированной полосы  $l_0 = 1 \text{ м}$ . Найти изменение свободной и внутренней энергии резины при её изотермическом растяжении до  $l_1 = 2 \text{ м}$ . Температура  $T = 300 \text{ К}$ .

Ответ:  $\Delta F = 3,9 \text{ Дж}$ ,  $\Delta U = 0$ .

11. Определить работу, которую необходимо совершить, чтобы разделить сферическую каплю масла массой  $m = 1 \text{ г}$  на капельки диаметром  $d = 2 \cdot 10^{-4} \text{ см}$ , если процесс дробления изотермический. Поверхностное натяжение масла  $\sigma = 26 \text{ дин/см}$ , плотность масла  $\rho = 0,9 \text{ г/см}^3$ .

Ответ:  $8,7 \cdot 10^5 \text{ эрг}$ .

12. На какую высоту поднимается вода между двумя плоскими параллельными пластинами, расстояние между которыми  $h = 0,1 \text{ мм}$ , если краевой угол смачивания  $\theta = 60^\circ$ . Поверхностное натяжение воды  $\sigma = 73 \cdot 10^{-3} \text{ Н/м}$ .

Ответ:  $7,5 \text{ см}$ .

13. Молярная теплота парообразования воды в точке кипения при  $t = 100^\circ \text{ C}$  равна  $\Lambda = 40,7 \text{ кДж/моль}$ . Считая водяной пар идеальным газом, найти разность молярных внутренних энергий жидкой воды и водяного пара при данной температуре.

Ответ:  $u_{\text{п}} - u_{\text{ж}} = 37,6 \text{ кДж/моль}$ .

14. Определить температуру кипения воды на вершине Эвереста, где атмосферное давление составляет 250 мм рт. ст. Теплоту парообразования воды считать не зависящей от температуры и равной  $\Lambda = 2,28 \text{ кДж/г}$ .

Ответ:  $71^\circ \text{ C}$ .

15. Оценить относительный перепад давления  $\Delta P/P$  паров воды на высоте подъёма воды в полностью смачиваемом капилляре диаметром  $d = 1 \text{ мкм}$ . Поверхностное натяжение  $\sigma = 73 \cdot 10^{-3} \text{ Н/м}$ , температура  $t = 20^\circ \text{ C}$ .

Ответ:  $\Delta P/P \approx 2 \cdot 10^{-3}$ .

16. Во сколько раз давление газа Ван-дер-Ваальса больше его критического давления, если известно, что его объём в 5 раз, а температура в 5,7 раза больше критических значений этих величин?

Ответ:  $\pi = 3,14$ .

17. Найти изменение энтропии идеального газа, подвергнутого дросселированию через пористую перегородку, если начальное давление равно  $P_1 = 4$  атм, конечное  $P_2 = 1$  атм.

Ответ: 11,5 Дж/К.

18. Оценить максимально возможную скорость истечения воздуха при нормальных условиях через отверстие, выходящее в вакуум.

Ответ: 740 м/с.

19. Скорости частиц с равной вероятностью принимают все значения от 0 до  $v_0$ . Определить среднюю и среднеквадратичную скорости частиц, а также абсолютную и относительную среднеквадратичные флуктуации скорости.

Ответ:  $0,5v_0$ ;  $v_0/\sqrt{3}$ ;  $v_0/2\sqrt{3}$ ;  $1/\sqrt{3}$ .

20. Найти наиболее вероятную, среднюю и среднеквадратичную скорости молекул азота при  $T = 300$  К. Сравнить полученные значения со скоростью звука.

Ответ:  $v_{н.в.} = 421$  м/с,  $v_{ср} = 476$  м/с,  $v_{кв} = 517$  м/с;  $c_{зв} = 353$  м/с.

21. Определить, на какой высоте в изотермической атмосфере её плотность уменьшится в 5 раз, если на высоте 5,5 км она уменьшается в 2 раза.

Ответ: 12,8 км.

22. Молекула может находиться на двух энергетических уровнях: основном и возбуждённом. Разность энергий между ними составляет  $\Delta E = 6,0 \cdot 10^{-21}$  Дж. Какова доля молекул, находящихся в возбуждённом состоянии при  $t = 250$  °С?

Ответ: 0,3.

23. Определить температуру, при которой средняя поступательная энергия молекулы  $H_2$  будет равна энергии возбуждения её первого вращательного уровня. Расстояние между атомами равно  $d = 0,74 \cdot 10^{-8}$  см.

Ответ: 116 К.

24. Собственная частота колебаний атомов в молекуле  $Cl_2$  равна  $10^{14} \text{ с}^{-1}$ . Оценить характеристическую температуру, выше которой колебательную теплоёмкость молекулы можно рассчитывать по классической теории. Какова будет при этом молярная теплоёмкость газа?

Ответ: 760 К, 7R/2.

25. Два твёрдых тела с температурами 299 К и 300 К приведены в соприкосновение. Оценить, во сколько раз более вероятна передача порции энергии  $10^{-11}$  эрг от тела с большей температурой к телу с меньшей температурой, чем в обратном направлении. Теплоёмкости тел достаточно велики, так что изменением их температуры можно пренебречь.

Ответ: 5.

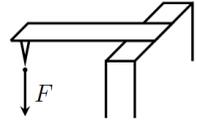
26. Небольшой груз массой 1 г подвешен на лёгкой нити длиной 1 м. Оценить среднеквадратичное отклонение груза от положения равновесия из-за тепловых флуктуаций при комнатной температуре.

Ответ:  $\sqrt{\langle \Delta r^2 \rangle} \approx 0,9$  нм.

27. Оценить среднеквадратичную относительную флуктуацию числа молекул воздуха в объёме  $1 \text{ мкм}^3$  при нормальных условиях.

Ответ: 0,02%.

28. Кантилевер (чувствительный элемент) атомно-силового микроскопа представляет собой кремниевую пластинку с острой иглой на конце (см. рис.). Вертикальное смещение конца иглы пропорционально приложенной силе с коэффициентом  $k = 1 \text{ Н/м}$  («силовая константа» кантилевера). Найдите среднеквадратичную флуктуацию положения иглы при комнатной температуре.



Ответ:  $0,64 \cdot 10^{-10}$  м.

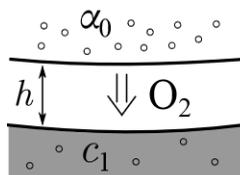
29. Вязкость азота при комнатной температуре и атмосферном давлении составляет  $\eta = 18 \cdot 10^{-6}$  Па·с. Оценить коэффициенты теплопроводности и самодиффузии азота, а также диаметр молекулы азота.

Ответ:  $\kappa \sim 10^{-2}$  Вт/м·К,  $D \sim 0,15$  см<sup>2</sup>/с,  $d \sim 4 \cdot 10^{-10}$  м.

30. Оценить количество тепла в расчёте на  $1 \text{ м}^2$ , теряемое комнатой в единицу времени через однокамерный стеклопакет. Расстояние между стёклами  $h = 23$  мм. Разность температур между комнатой и улицей составляет  $\Delta T = 30$  °С. Теплопроводность воздуха  $\kappa = 2,3 \cdot 10^{-2} \frac{\text{Вт}}{\text{м}\cdot\text{К}}$  считать не зависящей от температуры.

Ответ:  $q = 30$  Вт/м<sup>2</sup>.

31. (2019) В процессе дыхания организм человека извлекает кислород из воздуха и использует его для получения энергии при окислении органических молекул. Считая, что на один моль  $O_2$  выделяется энергия  $E = 470$  кДж/моль, а мощность, вырабатываемая человеком при активной физической нагрузке, составляет  $W = 1$  кВт, оценить рабочую площадь поверхности его легких  $S$ . Мольную долю кислорода в воздухе внутри лёгких принять постоянной и равной  $\alpha_0 = 0,14$ , а концентрацию  $O_2$  в крови -  $c_1 = 2$  моль/м<sup>3</sup>. Толщина барьера между воздухом и кровью  $h = 1$  мкм, коэффициент диффузии в нём  $D = 10^{-7}$  см<sup>2</sup>/с.



Ответ: 60 м<sup>2</sup>

32. Оценить коэффициент диффузии капель тумана радиусом  $R \sim 10$  мкм в воздухе при нормальных условиях. Вязкость воздуха  $\eta \sim 2 \cdot 10^{-5}$  Па·с.

Ответ:  $10^{-8}$  см<sup>2</sup>/с.

33. Оценить, за какое время молекула HCN смещается в воздухе при комнатной температуре от исходного положения на расстояние порядка 10 см. Длину свободного пробега принять равной  $\lambda \sim 10^{-5}$  см.

Ответ: 10<sup>2</sup> с.

34. Два сосуда с идеальным газом соединены трубкой, диаметр которой заметно меньше длины свободного пробега в обоих сосудах. Температура в сосудах поддерживается постоянной и равной соответственно  $T_1$  и  $T_2 = 2T_1$ . Найти отношение давлений  $P_2/P_1$ .

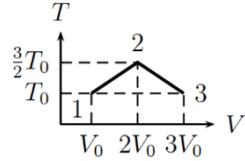
Ответ:  $\sqrt{2}$ .

35. Оценить коэффициент диффузии сильно разреженного воздуха по длинной трубке диаметром 1 см при комнатной температуре. Считать, что разрежение таково, что длина пробега молекул ограничивается диаметром трубки (высокий вакуум).

Ответ:  $\sim 1,6$  м<sup>2</sup>/с.

## Текстовые задачи

**Т-1.** (2022) С одним молем идеального газа проводится процесс  $1 \rightarrow 2 \rightarrow 3$ , изображённый на рисунке. Найдите изменение теплоёмкости газа при переходе через точку 2.

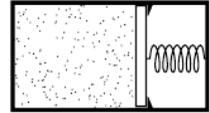


Ответ:  $\Delta C \approx -3R$ .

**Т-2.** В двух одинаковых изолированных сосудах находится по моллю воздуха при  $T_0 = 300$  К. Сосуды используются в качестве тепловых резервуаров для тепловой машины, работающей по обратному циклу. Найти минимальную работу, которую должна затратить машина, чтобы охладить газ в одном из сосудов до  $T_1 = 200$  К. Какова будет конечная температура газа во втором сосуде? Теплоёмкостью сосудов и зависимостью теплоёмкости воздуха от температуры пренебречь.

Ответ:  $A \approx 1$  кДж,  $T_2 = 450$  К.

**Т-3.** (2018) Горизонтально расположенный теплоизолированный цилиндрический сосуд разделён на две части поршнем, прикрепленным пружиной к правой стенке сосуда (см. рис.). Слева от поршня находится 1 моль азота при комнатной температуре, справа — вакуум. Вначале пружина не деформирована, а поршень удерживается защёлкой. Защёлку убирают, и когда система приходит в равновесие, давление газа оказывается в  $n = 3$  раза меньше исходного. Считая газ идеальным, найдите изменение его энтропии в этом процессе.



Ответ:  $0,75R$ .

**Т-4.** (2019) При низких температурах ( $T \rightarrow 0$ ) свободная энергия «электронного газа» в металлах в объёме  $V$  при температуре  $T$  даётся зависимостью  $F = F_0 - \beta V^{\frac{2}{3}} T^2$ , где  $F_0$  и  $\beta$  — постоянные величины. Найти разность теплоёмкостей  $C_p - C_v$  электронного газа как функцию  $V$  и  $T$ .

Ответ:  $8\beta V^{2/3} T$

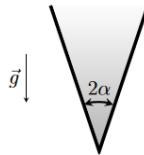
**Т-5.** (2019) Закрытый сосуд с жёсткими стенками полностью заполнен водой при нормальных условиях. После помещения сосуда в морозильную камеру и установления равновесия 10% воды превратилось в лёд. Найти температуру  $t$  в камере. Теплота плавления льда  $q = 330$  Дж/г, начальная плотность воды  $\rho_w = 1,0$  г/см<sup>3</sup>, сжимаемость воды  $\beta_w = 4,8 \cdot 10^{-5}$  атм<sup>-1</sup>, плотность образовавшегося льда  $\rho_l = 0,92$  г/см<sup>3</sup>. Деформацией стенок пренебречь.

Ответ:  $-1.5^\circ\text{C}$

**Т-6.** (2019ГОС.) Во время опыта по демонстрации критического состояния эфира, при некоторой температуре  $T$  60% объема ампулы было заполнено жидким эфиром с плотностью  $\rho_{\text{ж}}(T) = 0,42 \text{ г/см}^3$ , а остальной объем заполнен парами эфира. При дальнейшем нагревании ампулы граница раздела «жидкость-пар» поднялась и жидкость заняла всю ампулу. В этот момент плотность жидкого эфира упала до значения  $\rho_{\text{ж}}(T') = 0,28 \text{ г/см}^3$ . Чему была равна начальная температура содержимого ампулы? Критическая температура эфира  $T_{\text{кр}} = 467 \text{ К}$ , критическая плотность эфира  $\rho_{\text{кр}} = 0,265 \text{ г/см}^3$ . Эфир в однофазном (жидком или газообразном) состоянии считать вандерваальсовским газом.

Ответ: 418 К

**Т-7.** (2021) Сколько молей идеального газа содержится в бесконечно высокой конусообразной воронке, стоящей вертикально в однородном поле силы тяжести, если давление при её вершине равно  $P_0$ ? Молярная масса газа равна  $\mu$ , температура  $T$ , угол раствора конуса  $2\alpha$ , ускорение свободного падения  $g$ . Найдите наиболее вероятную высоту молекулы в сосуде.



Ответ:  $2\pi P_0 t g^2 \alpha (RT)^2 / (\mu g)^3$ ,  $2RT / \mu g$

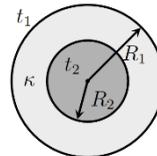
**Т-8.** (2017) Ионы солей иттербия имеют спин  $s = 7/2$ . Во внешнем магнитном поле  $B$  энергия иона зависит от ориентации спина и может принимать значения  $E_m = m\mu B$ , где  $\mu$  — известная константа, и  $m = -s, -s + 1, \dots, s - 1, s$ . Найти изменение энтропии  $\Delta S$  и количество теплоты  $Q$ , поглощаемое 1 молекул соли при её квазистатическом изотермическом размагничивании от очень большого ( $B_0 \gg kT/\mu$ ) до нулевого поля ( $B_1 = 0$ ) при температуре  $T = 1 \text{ К}$ . Взаимодействием ионов между собой пренебречь.

Ответ:  $\Delta S = 17,3 \text{ Дж/К}$ ,  $Q = 17,3 \text{ Дж}$ .

**Т-9.** Найти молярную энтропию кристаллического  ${}^6\text{Li}$  при низких температурах, пренебрегая взаимодействием ядер между собой. Момент импульса (спин) ядра  ${}^6\text{Li}$  равен  $s = 1$  (в единицах постоянной Планка  $\hbar$ ). Согласно квантовой механике, число возможных ориентаций вектора момента импульса равно  $2s + 1$ .

Ответ:  $S = 9,1 \text{ Дж/(моль}\cdot\text{К)}$ .

**Т-10.** (2022) Стальной шар, имеющий температуру  $t_2 = 250 \text{ }^\circ\text{C}$ , окружён слоем тепловой изоляцией с наружным радиусом  $R_1 = 0,7 \text{ м}$  и внутренним  $R_2 = 0,5 \text{ м}$ . Коэф-



коэффициент теплопроводности оболочки  $\kappa = 0,2 \frac{\text{Вт}}{\text{м}\cdot\text{К}}$ . Температура окружающей среды  $t_1 = 0^\circ\text{C}$ . Определите производство энтропии (скорость изменения  $dS/dt$ ) в системе. Распределение температуры в оболочке считать стационарным.

Ответ: 1,9 Вт/К

**Т-11.** «Пьяный матрос» совершает случайные блуждания по площади, смещаясь каждые  $\tau = 4$  с на расстояние  $\lambda = 0,5$  м в случайном направлении. Найти среднеквадратичное смещение матроса от исходного положения  $\sqrt{\Delta r^2}$  за  $t = 1$  час и определить коэффициент диффузии  $D$  толпы пьяных матросов, не взаимодействующих между собой.

Ответ:  $\sqrt{\Delta r^2} = 15$  м,  $D \approx 56,3$  м<sup>2</sup>/ч.

**Т-12.** (2018) Вертикально расположенная пробирка высотой  $h = 5$  см заполнена водой, в которой диспергированы в небольшом количестве сферические наночастицы плотностью  $\rho = 4$  г/см<sup>3</sup> каждая. Система исходно находится в равновесии при температуре  $T_0 = 300$  К, а отношение максимальной и минимальной концентраций наночастиц равно  $n_{\text{max}}/n_{\text{min}} = 1,1$ . На дне сосуда размещают адсорбент, поглощающий все попадающие на него наночастицы. Оценить время, требуемое для очистки воды от примеси. Вязкость воды  $\eta = 10^{-3}$  Па · с.

Ответ: ~ 9 мес.