

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»
27.03.03 «Системный анализ и управление»

физтех-школа: **ФБВТ**

кафедра: **общей физики**

курс: 1

семестр: 2

лекции – 20 часов

практические (семинарские)

занятия – 30 часов

лабораторные занятия – 40 часов

Экзамен – 2 семестр

Диф. зачёт – 2 семестр

ВСЕГО АУДИТОРНЫХ ЧАСОВ – 90

Самостоятельная работа:

теор. курс – 55 часов

физ. практикум – 50 часов

Программу и задание составили:

к.ф.-м.н., доц. Лапушкин Г. И.

к.ф.-м.н., доц. Лилиенберг И. В.

к.ф.-м.н., доц. Попов П. В.

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. Применение термодинамических потенциалов. Термодинамика излучения. Поверхностные явления. Краевые углы, смачивание и несмачивание. Формула Лапласа. Свободная и внутренняя энергия поверхности.

4. 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.

5. 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. Уравнение Бернулли. Изэнтропическое течение идеального газа, истечение газа из отверстия

6. Элементы теории вероятностей. Дискретные и непрерывные случайные величины, плотность вероятности. Условие нормировки. Средние величины и дисперсия. Независимые случайные величины. Нормальный закон распределения. 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.

7. Распределение Больцмана в поле внешних сил. Барометрическая формула. Распределение Максвелла—Больцмана. Элементы статистической физики классических идеальных систем. Фазовое пространство, макро- и микросостояния, статистический вес макросостояния. Статистическое определение энтропии. Статистическая сумма. Аддитивность энтропии независимых подсистем. Изменение энтропии при смешении газов, парадокс Гиббса.

8. 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.

9. Флуктуации. Связь вероятности флуктуации с изменением энтропии системы. Флуктуации аддитивных величин, зависимость флуктуаций от числа частиц. Флуктуация числа частиц в выделенном объёме. Зависимость дисперсии суммы независимых слагаемых от их числа («закон \sqrt{N} »). Влияние флуктуаций на чувствительность измерительных приборов.

10. Столкновения. Эффективное газокинетическое сечение. Длина свободного пробега. Распределение молекул по длинам свободного пробега. Явления молекулярного переноса: диффузия, теплопроводность, вязкость. Законы Фика, Фурье и Ньютона. Коэффициенты переноса в газах. Уравнение диффузии и теплопроводности. Броуновское движение

макроскопических частиц. Закон Эйнштейна–Смолуховского для смещения броуновской частицы.

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. *Калашиков 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. *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.
9. *Попов П.В.* Диффузия. – М.: МФТИ, 2016.

Электронные ресурсы

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.	⁰ 1 ⁰ 2 ⁰ 3 1.47 1.42	1.40 1.54 1.83	1.100 2.6 1.75
8–14 февр.	2	Тепловые машины. Второе начало термодинамики. Изменение энтропии в обратимых процессах.	⁰ 4 ⁰ 5 ⁰ 6 3.7 3.8	4.82 3.43 T2	3.50 3.47 4.80
8–14 февр.	3	Изменение энтропии в необратимых процессах. ----- Термодинамические потенциалы.	⁰ 7 ⁰ 8 ⁰ 9 4.43 5.75	4.75 5.38 T3	4.58 4.44 5.32
15–21 февр.	4	Преобразования термодинамических функций. Поверхностное натяжение.	1.3/4 ⁰ 10 ⁰ 11 ⁰ 12 12.17	5.16 5.40 12.8	5.20 5.42 12.13
22–28 февр.	5	Фазовые превращения. Уравнение Клапейрона–Клаузиуса. Кипение.	⁰ 13 ⁰ 14 ⁰ 15 11.2 11.34	11.16 12.51 12.30	11.29 12.49 11.74
22–28 февр.	6	Реальные газы. ----- Течение газов.	⁰ 16 ⁰ 17 ⁰ 18 6.9 2.11	M14.27 6.52 6.41	2.15 6.17 6.39
1–7 мар.	7	Контрольная работа по 1-му заданию (по группам).			
8–14 мар.	8	Сдача 1-го задания.			
8–14 мар.	9	Основы молекулярно-кинетической теории. Распределение Максвелла.	⁰ 19 ⁰ 20 7.3	7.53 7.14 7.19	7.4 7.16 7.18

			7.52		
15–21 мар.	10	Основы молекулярно-кинетической теории. Распределение Больцмана.	⁰ 21 ⁰ 22 7.24	7.80 8.25 8.11	7.40 8.15 8.28
22–28 мар.	11	Элементы статистической физики. Теория теплоёмкостей. Статистический смысл энтропии.	⁰ 23 ⁰ 24 ⁰ 25 8.70 9.45	8.59 8.52 Т8	8.72 8.56 Т9
22–28 мар.	12	Флуктуации Столкновения, длина свободного пробега, явления переноса	⁰ 26 ⁰ 27 ⁰ 29 10.2 9.6	9.40 10.149 10.106	9.8 10.36 10.15
29мар. -4 апр.	13	Броуновское движение. Течение газов. Явления в разреженных газах.	⁰ 32 ⁰ 33 ⁰ 34 ⁰ 35	10.82 Т11 10.92	10.83 10.120 10.68
4 апр. – 11 мар.	14	Разбор дополнительных задач по темам семестра, подготовка к сдаче 2 задания	⁰ 28 ⁰ 30 ⁰ 31 Т7	Т4 Т6 Т12	Т1 Т5
4 апр. -11 апр.	15	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.

Номера задач с индексом М даны из первого раздела (механика)

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

0 — задачи, которые студент должен решать в течение недели для подготовки к семинару;

I — задачи, рекомендованные для разбора на семинаре (преподаватель может разбирать на семинарах и другие равноценные задачи по своему выбору);

II — задачи для самостоятельного решения. Должны быть решены вместе с задачами группы «0» следующего семинара

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 ΔU 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.

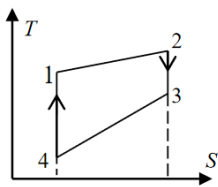
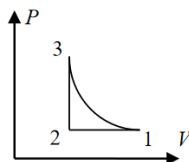
Ответ: 1,7 кДж.

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°C , положили в пустую алюминиевую кастрюлю массой 330 г, нагретой до 100°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 ΔF и термодинамического потенциала Гиббса ΔG 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: $\Delta G = \Delta F = 95,4$ 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, $a = 1,3 \cdot 10^{-2}$ Н/К, l — длина полосы, длина недеформированной полосы $l_0 = 1$ м. Найти изменение свободной и внутренней энергии резины при её изотермическом растяжении до $l_1 = 2$ м. Температура $T = 300$ К.

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

11. Определить работу, которую необходимо совершить, чтобы разделить сферическую каплю масла массой $m = 1$ г на капельки диаметром $d = 2 \cdot 10^{-4}$ см, если процесс дробления изотермический. Поверхностное натяжение масла $\sigma = 26$ дин/см, плотность масла $\rho = 0,9$ г/см³.

Ответ: $8,7 \cdot 10^5$ эрг.

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

Ответ: 7,5 см.

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

Ответ: $u_{\text{п}} - u_{\text{ж}} = 37,6$ 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 $\lambda = 2,28$ кДж/г.

Ответ: 71°C .

15. Оценить относительный перепад давления $\Delta P/P$ паров воды на высоте подъёма воды в полностью смачиваемом капилляре диаметром $d = 1$ мкм. Поверхностное натяжение $\sigma = 73 \cdot 10^{-3}$ 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 $t = 250^\circ\text{C}$?

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}с^{-1} . Оценить характеристическую температуру, выше которой колебательную теплоёмкость молекулы можно рассчитывать по классической теории. Какова будет при этом молярная теплоёмкость газа?

Ответ: 760К, $7R/2$.

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.

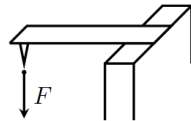
26. Небольшой груз массой 1 г подвешен на лёгкой нити длиной 1 м. Оценить среднеквадратичное отклонение груза от положения равновесия из-за тепловых флуктуаций при комнатной температуре.

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

27. Оценить среднеквадратичную относительную флуктуацию числа молекул воздуха в объёме 1 мкм³ 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: $0,64 \cdot 10^{-10}\text{м}$.

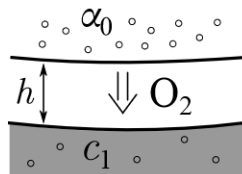
29. Вязкость азота при комнатной температуре и атмосферном давлении составляет $\eta = 18 \cdot 10^{-6}$ Па·с. Оценить коэффициенты теплопроводности и самодиффузии азота, а также диаметр молекулы азота.

Ответ: $\kappa \sim 10^{-2}$ Вт/м·К, $D \sim 0,15$ см²/с, $d \sim 4 \cdot 10^{-10}$ м.

30. Оценить количество тепла в расчёте на 1 м², теряемое комнатой в единицу времени через однокамерный стеклопакет. Расстояние между стёклами $h = 23$ мм. Разность температур между комнатой и улицей составляет $\Delta T = 30^\circ\text{C}$. 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/м².

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/м³. Толщина барьера между воздухом и кровью $h = 1$ мкм, коэффициент диффузии в нём $D = 10^{-7}$ см²/с.



Ответ: 60м^2

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} см²/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: 10^2 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 .

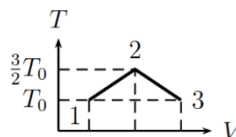
Ответ: $\sqrt{2}$.

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: $\sim 1,6 \text{ м}^2/\text{с}$.

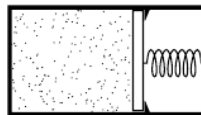
Текстовые задачи

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 молу воздуха при $T_0 = 300 \text{ К}$. 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 $T_1 = 200 \text{ К}$. Какова будет конечная температура газа во втором сосуде? Теплоёмкостью сосудов и зависимостью теплоёмкости воздуха от температуры пренебречь.



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

Т-3. (2018) Горизонтально расположенный теплоизолированный цилиндрический сосуд разделён на две части поршнем, прикреплённым 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 β — постоянные величины.

Найти разность теплоёмкостей $C_P - C_V$ электронного газа как функцию V и T .

Ответ: $8\beta V^{2/3}T$

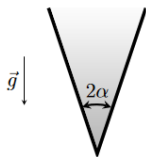
Т-5. (2019) Закрытый сосуд с жёсткими стенками полностью заполнен водой при нормальных условиях. После помещения сосуда в морозильную камеру и установления равновесия 10% воды превратилось в лёд. Найти температуру t в камере. Теплота плавления льда $q = 330 \text{ Дж/г}$, начальная плотность воды $\rho_{\text{в}} = 1,0 \text{ г/см}^3$, сжимаемость воды $\beta_{\text{в}} = 4,8 \cdot 10^{-5} \text{ атм}^{-1}$, плотность образовавшегося льда $\rho_{\text{л}} = 0,92 \text{ г/см}^3$. 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 μ , температура T , угол раствора конуса 2α , ускорение свободного падения g . Найдите наиболее вероятную высоту молекулы в сосуде.



Ответ: $2\pi P_0 \text{tg}^2 \alpha (RT)^2 / (\mu g)^3, 2RT/\mu g$

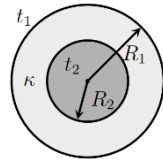
Т-8. (2017) Ионы солей иттербия имеют спин $s = 7/2$. Во внешнем магнитном поле B энергия иона зависит от ориентации спина и может принимать значения $E_m = m\mu B$, где μ — известная константа, и

$m = -s, -s + 1, \dots, s - 1, s$. Найти изменение энтропии ΔS и количество теплоты Q , поглощаемое 1 молеи соли при её квазистатическом изотермическом размагничивании от очень большого ($B_0 \gg kT/\mu$) до нулевого поля ($B_1 = 0$) при температуре $T = 1$ 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 $t_2 = 250^\circ\text{C}$, окружён слоем тепловой изоляции с наружным радиусом $R_1 = 0,7$ м и внутренним $R_2 = 0,5$ м. 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: $1,9 \text{ Вт/К}$

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

Т-12. (2018) Вертикально расположенная пробирка высотой $h = 5$ см заполнена водой, в которой диспергированы в небольшом количестве сферические наночастицы плотностью $\rho = 4 \text{ г/см}^3$ 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 $\eta = 10^{-3} \text{ Па}\cdot\text{с}$.

Ответ: $\sim 9 \text{ мес}$.