

УТВЕРЖДАЮ
Проректор по учебной работе
_____ Д.А.Зубцов
10 декабря 2013 г.

ПРОГРАММА

по дисциплине: Общая физика: молекулярная физика и термодинамика
по направлению подготовки 010900 «Прикладные математика и физика»
факультеты: для всех факультетов
кафедра ОБЩЕЙ ФИЗИКИ
курс I
семестр 2

Трудоёмкость: теор. курс: обязательная часть – 3 зачет. ед.;
вариативная часть – 1 зачет. ед.,
доп. за сложность – 1 зачет. ед.;

физ. практикум: обязательная часть – 2 зачет. ед.; доп. за сложность – 1
зачет. ед.

Лекции – 34 часа

Экзамен – 2 семестр

Практические (семинарские)

занятия – 34 часа

Диф. зачёт – 2 семестр

лабораторные занятия – 68 часов

Самостоятельная работа

– 2 часа в неделю

ВСЕГО ЧАСОВ – 136

Программу и задание составили:

д.ф.-м.н., проф. Э.В. Прут

д.ф.-м.н., проф. Н.А. Кириченко

к.ф.-м.н., проф. В.С. Булыгин

к.ф.-м.н., доц. А.В. Гавриков

к.ф.-м.н., доц. П.В. Попов

Программа принята на заседании кафедры общей физики
21 ноября 2013 г.

Заведующий кафедрой

А.В. Максимычев

МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА И ТЕРМОДИНАМИКА

Основные понятия молекулярной физики и термодинамики: предмет исследования, его характерные особенности. Задачи молекулярной физики. Макроскопические параметры. Агрегатные состояния вещества. Уравнения состояния (термическое и калорическое). Идеальный и неидеальный газы. Давление идеального газа как функция кинетической энергии молекул. Соотношение между температурой идеального газа и кинетической энергией его молекул. Законы идеальных газов. Уравнения состояния идеального газа.

Законы термодинамики

Термодинамическая система. Термодинамические параметры. Нулевое начало термодинамики. Определение температуры идеального газа. Равновесное и неравновесное состояния. Квазистатические, обратимые и необратимые термодинамические процессы.

Работа, теплота, внутренняя энергия. Функции состояния. Термическое и калорическое уравнения состояния. Первое начало термодинамики. Циклические процессы. Работа при циклическом процессе.

Теплоёмкость. Теплоёмкость идеальных газов при постоянном объёме и постоянном давлении, уравнение Майера.

Адиабатический и политропический процессы. Уравнения адиабаты и политропы для идеального газа. Независимость внутренней энергии идеального газа от объёма.

Скорость звука в газах. Энтальпия. Зависимость энтальпии идеального газа от давления. Скорость истечения газа из отверстия.

Второе начало термодинамики. Формулировки второго начала. Тепловая машина. Определение КПД тепловой машины. Цикл Карно. Теорема Карно. Неравенство Клаузиуса. Максимальность КПД цикла Карно по сравнению с другими термодинамическими циклами.

Холодильная машина. Эффективность холодильной машины. Тепловой насос. Эффективность теплового насоса, работающего по циклу Карно. Связь между коэффициентами эффективности теплового насоса и холодильной машины.

Термодинамическое определение энтропии. Закон возрастания энтропии. Энтропия идеального газа. Энтропия в обратимых и необратимых процессах. Адиабатическое расширение идеального газа в вакуум.

Объединённое уравнение первого и второго начал термодинамики.

Третье начало термодинамики. Изменение энтропии и теплоёмкости при приближении температуры к абсолютному нулю.

Термодинамические функции. Свойства термодинамических функций. Максимальная и минимальная работа. Преобразования термодинамических функций. Соотношения Максвелла. Зависимость внутренней энергии от объёма. Зависимость теплоёмкости от объёма. Соотношение между C_p и C_v .

Теплофизические свойства твёрдых тел. Термодинамика деформации твёрдых тел. Изменение температуры при адиабатическом растяжении упругого стержня. Тепловое расширение как следствие ангармоничности колебаний в решётке. Коэффициент линейного расширения стержня.

Фазовые превращения. Фазовые переходы I и II рода. Химический потенциал. Условие равновесия фаз. Кривая фазового равновесия. Уравнение Клапейрона–Клаузиуса. Диаграмма состояния двухфазной системы «жидкость–пар». Зависимость теплоты фазового перехода от температуры. Критическая точка. Тройная точка. Диаграмма состояния «лёд–вода–пар». Метастабильные состояния. Перегретая жидкость и переохлаждённый пар.

Газ Ван-дер-Ваальса как модель реального газа. Изотермы газа Ван-дер-Ваальса. Уравнение адиабаты газа Ван-дер-Ваальса. Правило Максвелла и правило рычага. Критические параметры и приведённое уравнение состояния газа Ван-дер-Ваальса. Внутренняя энергия газа Ван-дер-Ваальса. Адиабатическое расширение газа Ван-дер-Ваальса в вакуум. Энтропия газа Ван-дер-Ваальса.

Эффект Джоуля–Томсона. Адиабатическое расширение, дросселирование.

Поверхностные явления. Термодинамика поверхности. Свободная энергия поверхности. Краевые углы. Смачивание и несмачивание. Формула Лапласа.

Зависимость давления пара от кривизны поверхности жидкости. Кипение. Роль зародышей при образовании новой фазы.

Элементы статистической физики идеальных систем

Динамические и статистические закономерности. Макроскопические и микроскопические состояния. Фазовое пространство.

Элементы теории вероятностей. Условие нормировки. Средние величины и дисперсия. Биномиальный закон распределения. Распределение Пуассона. Распределение Гаусса.

Распределения Максвелла. Распределение частиц по компонентам скорости и абсолютным значениям скорости. Доля молекул, лежащих в заданном интервале скоростей. Наиболее вероятная, средняя и среднеквадратичная скорости.

Распределения Максвелла по энергиям. Среднее число ударов молекул, сталкивающихся в единицу времени с единичной площадкой. Средняя энергия молекул, вылетающих в вакуум через малое отверстие в сосуде.

Распределение Больцмана в однородном поле сил. Барометрическая формула.

Распределение Максвелла–Больцмана.

Представление о распределении Гиббса. Микро- и макросостояния. Статистический вес макросостояния. Статистическая сумма и её использование для нахождения внутренней энергии. Энергия, теплоёмкость, энтропия газа, молекулы которого имеют два дискретных энергетических уровня.

Статистическое определение энтропии. Аддитивность энтропии. Закон возрастания энтропии. Статистическая температура.

Энтропия при смешении газов. Парадокс Гиббса.

Флуктуации. Средние значения энергии и дисперсии (среднеквадратичной флуктуации) энергии частицы. Флуктуации и распределение Гаусса.

Флуктуации термодинамических величин. Флуктуация температуры в фиксированном объёме. Флуктуация объёма в изотермическом и адиабатическом процессах. Флуктуации аддитивных физических величин. Зависимость флуктуаций от числа частиц, составляющих систему. Влияние флуктуаций на чувствительность измерительных приборов (на примере пружинных весов).

Теплоёмкость. Классическая теория теплоёмкостей. Закон равномерного распределения энергии теплового движения по степеням свободы. Теплоёмкость кристаллов (закон Дюлонга–Пти). Элементы квантовой теории теплоёмкостей. Характеристические температуры. Зависимость теплоёмкости от температуры.

Элементы физической кинетики

Столкновения. Эффективное газокинетическое сечение. Длина свободного пробега. Распределение молекул по длинам свободного пробега. Число столкновений молекул между собой.

Явления переноса: вязкость, теплопроводность и диффузия. Законы Фика и Фурье. Коэффициенты вязкости, теплопроводности и диффузии в газах.

Броуновское движение. Подвижность. Закон Эйнштейна–Смолуховского. Связь подвижности частицы и коэффициента диффузии.

Явления переноса в разреженных газах. Эффект Кнудсена. Эффузия. Течение разреженного газа через прямолинейную трубу.

ЛИТЕРАТУРА

Основная литература

1. *Сивухин Д.В.* Общий курс физики. Т. II. Термодинамика и молекулярная физика. — М.: Физматлит, 2006.
2. *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.
3. *Белонучкин В.Е.* Краткий курс термодинамики. — М.: МФТИ, 2010.
4. *Кириченко Н.А.* Термодинамика, статистическая молекулярная физика. — М.: Физматкнига, 2012.
5. *Щёголев И.Ф.* Элементы статистической механики, термодинамики и кинетики. — М.: Янус, 1996.
6. Лабораторный практикум по общей физике. Т. 1 / под ред. А.Д. Гладуна. — М.: МФТИ, 2012.
7. Сборник задач по общему курсу физики. Ч. 1 / под ред. В.А. Овчинкина. — М.: Физматкнига, 2013.

Дополнительная литература

8. *Рейф Ф.* Статистическая физика (Берклеевский курс физики). Т. 5. — М.: Наука, 1972.
9. *Ландау Л.Д., Ахиезер А.И., Лифшиц Е.М.* Курс общей физики. — М.: Наука, 1965.
10. *Базаров И.П.* Термодинамика. — М.: Высшая школа, 1983.
11. *Пригожин И., Конденуди Д.* Современная термодинамика. От тепловых двигателей до диссипативных структур. — М.: Мир, 2009.
12. *Коротков П.Ф.* Молекулярная физика и термодинамика. — М.: МФТИ, 2009.
13. *Корявов В.П.* Методы решения задач в общем курсе физики. Термодинамика и молекулярная физика. — М.: Высшая школа, 2009.
14. *Прут Э.В., Кленов С.Л., Овсянникова О.Б.* Введение в теорию вероятностей в молекулярной физике. — М.: МФТИ, 2002.
15. *Прут Э.В., Кленов С.Л., Овсянникова О.Б.* Элементы теории флуктуаций и броуновского движения в молекулярной физике. — М.: МФТИ., 2002.
16. *Прут Э.В.* Теплофизические свойства твёрдых тел. — М.: МФТИ, 2009.
17. *Заикин Д.А.* Энтропия. — М.: МФТИ, 2003.
18. *Булыгин В.С.* Теоремы Карно. — М.: МФТИ, 2012.
19. *Булыгин В.С.* Теплоёмкость и внутренняя энергия газа Ван-дер-Ваальса. — М.: МФТИ, 2012.

20. Булыгин В.С. Некоторые задачи теории теплопроводности. — М.: МФТИ, 2006.

Электронные ресурсы:

http://physics.mipt.ru/S_II/Method_TD/

ПЛАН ЛЕКЦИЙ

| Дата | Темы лекций |
|----------------------|--|
| 7–13 февр. | Предмет молекулярной физики. Уравнение состояния. Нулевое начало термодинамики. Работа, теплота, внутренняя энергия. Первое начало термодинамики. Скорость звука в газах. Энтальпия. Истечение газа из отверстия. |
| 14–20 февр. | Второе начало термодинамики. Цикл Карно. Абсолютная температура. Термодинамическое определение энтропии. Энтропия идеального газа. |
| 21–27 февр. | Необратимые процессы. Изменение энтропии в необратимых процессах. Третье начало термодинамики. |
| 28 февр.– 6 марта | Термодинамические функции и их свойства. Преобразование термодинамических функций. Теплофизические свойства твёрдых тел. |
| 7–13 марта | Условия фазового равновесия. Фазовые превращения. Уравнение Клайперона–Клаузиуса. Зависимость теплоты фазового перехода от температуры. |
| 14–20 марта | Газ Ван-дер-Ваальса. Критическая точка. Метастабильные состояния. Эффект Джоуля–Томсона. Получение низких температур. |
| 21–27 марта | Элементы теории вероятностей. Статистические распределения: биномиальное, Гаусса. |
| 28 марта – 3 апр. | Распределения Максвелла и Больцмана. |
| 4–10 апр. | Распределение Гиббса. Статистическая сумма и внутренняя энергия. Статистическое определение энтропии. Аддитивность энтропии. Закон возрастания энтропии. Статистическое определение температуры. Возрастание энтропии при смешении газов. Парадокс Гиббса. |
| 11–17 апр. | Теория теплоёмкостей. Флуктуации. |

| | |
|---------------|--|
| 18–24 апр. | Основные понятия физической кинетики. Диффузия, вязкость, теплопроводность. Длина свободного пробега. Коэффициенты переноса в газах. |
| 25–30 апр. | Броуновское движение. Явления переноса в разреженных газах. |
| 1–9 мая | Поверхностные явления. Термодинамика поверхности. Зависимость давления пара от кривизны поверхности жидкости. |

ЗАДАНИЕ ПО ФИЗИКЕ

для студентов 1-го курса на весенний семестр 2013/2014 учебного года

| Дата | № сем | Тема семинарских занятий | Задачи | | |
|-------------------|----------|--|-------------------|---|------------------|
| | | | 0 гр. | I гр. | II гр. |
| 7–13 фев. | 1 | Уравнение состояния. Первое начало термодинамики. | 1, 2, 3; | 1.3, 1.56, 2.6, 1.38, 1.86, 2.15; | 1.41, 2.23; |
| 14–20 фев. | 2 | Второе начало термодинамики. Термодинамическое определение энтропии. | 4, 5, 6; | 3.27, 3.46, 4.58, 3.44, 4.22, 4.72; | 4.36, 4.83; |
| 21–27 фев. | 3 | Изменение энтропии в необратимых процессах. | 7, 8, 9; | 4.47, 4.56, 4.75, 4.53, 4.69, 5.39; | 4.44, 5.40; |
| 28фев– 6мар. | 4 | Термодинамические функции. Термодинамические тождества. | 10, 11; | 5.18, 5.32, 5.55, 5.29, 5.54, 5.61; | 5.31, 5.75; |
| 7–13 мар. | 5 | Фазовые превращения. Уравнение Клапейрона–Клаузиуса. | 12, 13, 14; | 11.2, 11.29, 11.36, 11.13, 11.34, 11.72; | 11.84, 11.90; |
| 14–20 мар. | 6 | Газ Ван-дер-Ваальса. Эффект Джоуля–Томсона. | 15, 16; | 6.39, 6.52, 6.69, 6.48, 6.68, 6.73; | 6.86, 6.87; |
| 21–27 мар. | 7 | Контрольная работа по 1-му заданию (по группам). | | | |
| 28 мар. –3 апр | 8 | Сдача 1-го задания | | | |

| | | | | | |
|--------------------|-----------|--|-------------------|--|-------------------|
| 4–10 апр. | 9 | Биномиальное распределение. Распределения Максвелла. | 17, 18; | 8.75, 7.14, 7.19, 7.20, 7.24, 7.30; | 7.39, 7.78; |
| 11–17 апр. | 10 | Распределения Больцмана и Гиббса. Статистическое определение энтропии. | 19, 20, 21; | 8.7, 8.11, 8.15, 8.51, 8.55, 9.45; | 8.72, 9.46; |
| 18–24 апр. | 11 | Теория теплоёмкостей. Флуктуации. | 22, 23; | 8.25, 8.52, 8.59, 9.6, 9.8, 9.35; | 9.11, 9.23; |
| 25 апр. – 1 мая | 12 | Процессы переноса. Длина свободного пробега. Коэффициенты переноса в газах. | 24, 25, 26; | 10.15, 10.32, 10.36, 10.82, 10.83, 10.106; | 10.16, 10.134; |
| 2–8 мая | 13 | Броуновское движение. Явления в разрежённых газах. | 27, 28, 29; | 10.77, 10.79, 10.98, 10.117, 10.159, T-1; | 10.81, 10.119; |
| 9–15 мая | 14 | Поверхностные явления. Зависимость давления пара от кривизны поверхности жидкости. | 30, 31, 32; | 12.8, 12.17, 12.38, 12.50, T-2, 12.58; | 12.27, 12.59. |
| 16–22 мая | 15 | Контрольная работа по 2-му заданию (по группам). | | | |
| 23–29 мая | 16 | Сдача 2-го задания. Зачёт. | | | |

Примечание

1. Номера задач указаны по “Сборнику задач по общему курсу физики. Ч. 1. Механика, термодинамика и молекулярная физика” / под ред. В.А. Овчинкина (3-е изд., испр. и доп.). — М.: Физматкнига, 2013.

2. При выполнении заданий предусмотрена следующая вариативность — в каждой теме семинара задачи разбиты на 3 группы:

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

I — задачи, которые обязательны для сдачи задания, их решения должны быть оформлены студентами в своих тетрадях;

II — задачи повышенного уровня, которые студент может решать для получения дополнительной зачетной единицы. Они должны быть оформлены студентами в своих тетрадях.

Часть задач по усмотрению преподавателя разбирается на семинаре. На семинарах преподаватель может разбирать и другие задачи по своему выбору.

Задачи 0 группы

(в скобках указаны номера аналогичных задач из
«Сборника» под ред. В.А. Овчинкина)

1. В комнате объёмом V в течение некоторого времени был включен нагреватель. В результате температура воздуха увеличилась от T_1 до T_2 . Давление в комнате не менялось. Найти изменение внутренней энергии ΔU .

Ответ: $\Delta U = 0$.

2. (1.83) Найти, какая часть α молекул парообразного йода (I_2) диссоциирована на атомы при температуре 600°C , если удельная теплоемкость C_p , измеренная при этой температуре, оказалась равной $0,14$ Дж/(г·К)? Относительная атомная масса йода $A = 127$.

Ответ: $\alpha \sim 0,5$.

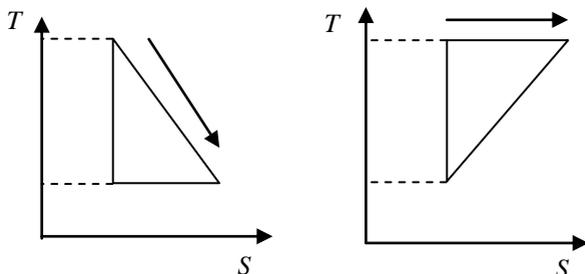
3. Температура воздуха равна 273 К. Найти изменение скорости звука при изменении температуры на 1 К.

Ответ: $0,61$ м/(с·К).

4. (3.5) Найти КПД цикла, состоящего из двух изотерм и двух изобар, предполагая, что рабочим веществом является идеальный газ. Параметры цикла и теплоёмкость газа считать известными.

Ответ: $\eta = (T_1 - T_2) \left(T_1 + \frac{C_p}{R} \frac{T_1 - T_2}{\ln(P_1/P_2)} \right)^{-1}$, где $T_1 > T_2$, $P_1 > P_2$

5. (4.8) Тепловые машины с произвольным веществом в качестве рабочего тела совершают обратимые термодинамические циклы, представленные на рисунках. Выразить КПД этих циклов через максимальную T_1 и минимальную T_2 температуры.



Ответ: $\eta = (T_1 - T_2) / (T_1 + T_2)$, $\eta = (T_1 - T_2) / 2T_1$.

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

Ответ: 260 К.

7. Теплоизолированный сосуд разделен на две равные части перегородкой, в которой имеется закрывающееся отверстие. В одной половине содержится 10 г водорода, вторая половина откачана до высокого вакуума. Отверстие в перегородке открывают, и газ заполняет весь объём. Считая газ идеальным, найти изменение его энтропии.

Ответ: 28,8 Дж/К.

8. В теплоизолированном сосуде в 1 л воды при 300 К положили кусок железа массой 0,1 кг, нагретый до 500 К. Определить суммарное изменение энтропии системы из воды и железа. Теплоёмкость воды и железа равны соответственно 4,18 и 0,45 Дж/(г·К).

Ответ: 5,1 Дж/К.

9. Лед массой 2 кг, находящийся при температуре -10 °С, нагрели и превратили в пар. Определить изменение энтропии.

Ответ: $1,73 \cdot 10^4$ Дж/К.

10. Найти изменение термодинамического потенциала Гиббса 1 моля водяного пара при изотермическом увеличении давления от 1,0 до 2,0 бар. Температура водяного пара 298 К. Считать пар идеальным газом.

Ответ: 1710 Дж.

11. Уравнение состояния резиновой полосы имеет вид

$$f = aT \left[\frac{l}{l_0} - \left(\frac{l_0}{l} \right)^2 \right], \text{ где } f \text{ – натяжение, } a = 1,3 \cdot 10^{-2} \text{ Н/К, } l \text{ — длина полосы,}$$

длина недеформированной полосы $l_0 = 1$ м. Считая, что внутренняя энергия резиновой полосы зависит только от температуры, найти изменение энтропии при изотермическом растяжении полосы от 1 м до 2 м.

Ответ: $-0,013$ Дж/К.

12. Молярная теплота парообразования воды в точке кипения при $t = 100$ °С 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: $u_n - u_{жс} = 37,6$ кДж/моль.

13. (11.6) Уксусная кислота при атмосферном давлении плавится при температуре $16\text{ }^{\circ}\text{C}$. Разность удельных объёмов жидкой и твёрдой фаз кислоты равна $0,16\text{ см}^3/\text{г}$. При изменении давления на 40 атм температура плавления изменяется на 1 К . Найти удельную теплоту плавления уксусной кислоты.

Ответ: 186 Дж/г .

14. Определить температуру кипения воды на вершине Эвереста, где атмосферное давление составляет 250 мм рт. ст. Теплоту парообразования воды считать независимой от температуры и равной $\Lambda = 41\text{ кДж/моль}$.

Ответ: $71\text{ }^{\circ}\text{C}$.

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

Ответ: $\pi = 3,14$.

16. Два теплоизолированных сосуда с объёмами $V_1 = V_2 = 1\text{ л}$ соединены трубкой с краном. В объёме V_1 находится $\nu = 0,042\text{ моля}$ воздуха при атмосферном давлении и температуре 290 К , а баллон V_2 откачан до высокого вакуума. Кран открывается, и воздух расширяется на весь объём. Определить изменение температуры воздуха, если воздух считать газом Ван-дер-Ваальса с $a = 0,137\text{ Па}\cdot\text{м}^6/\text{моль}^2$.

Ответ: $-0,14\text{ К}$.

17. 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: $0,5V_0$; $V_0/\sqrt{3}$; $V_0/2\sqrt{3}$; $1/\sqrt{3}$.

18. Найти наиболее вероятную, среднюю и среднеквадратичную скорости молекул азота при $T = 300\text{ К}$. Сравнить полученные значения со скоростью звука.

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

19. Определить, на какой высоте в изотермической атмосфере плотность уменьшится в 5 раз , если известно, что на высоте $5,5\text{ км}$ она уменьшается в 2 раза .

Ответ: $12,8\text{ км}$.

20. Молекула может находиться на двух энергетических уровнях: с энергиями 0 или $6,0\cdot 10^{-21}\text{ Дж}$. Какова вероятность того, что при $250\text{ }^{\circ}\text{C}$ молекула будет находиться на верхнем энергетическом уровне?

Ответ: $0,3$.

21. Два тела с температурами 299 К и 300 К приведены в соприкосновение. От тела с большей температурой к телу с меньшей температурой перешло количество теплоты, равное 10^{-10} эрг. Оценить, во сколько раз отличаются вероятности начального и конечного состояний данной системы тел.

Ответ: $3 \cdot 10^3$.

22. Найти для двухатомной молекулы H_2 характеристическую вращательную температуру, если величина расстояние между атомами $d = 0,74 \cdot 10^{-8}$ см.

Ответ: 88 К.

23. Найти средний квадрат флуктуационного угла отклонения математического маятника от его положения равновесия.

Ответ: $kT / (mgl)$.

24. Считая газокинетический радиус молекул воздуха величиной порядка $r \sim 0,1$ нм, оцените коэффициенты теплопроводности κ , вязкости η и самодиффузии D воздуха при комнатной температуре и атмосферном давлении.

Ответ: $\kappa \sim 3 \cdot 10^{-2}$ Вт/м·К, $\eta \sim 40$ мкПа·с, $D \sim 0,4$ см²/с.

25. Оцените количество тепла в расчёте на 1 м², теряемое комнатой в единицу времени через однокамерный стеклопакет с расстоянием между стеклами $h_2 = 23$ мм, если разность температур между комнатой и улицей составляет $\Delta T = 50^\circ\text{C}$. Теплопроводность воздуха считать не зависящей от температуры и равной $\kappa \approx 2,3 \cdot 10^{-2}$ Вт/м.

Ответ: $q \approx 50$ Вт/м².

26. В трубке длиной $l = 5$ см, заполненной азотом при нормальных условиях (концентрация азота $n = 2,7 \cdot 10^{19}$ см⁻³), идёт стационарный процесс диффузии малой примеси гелия. Концентрация гелия на одном конце трубки поддерживается равной $n = 5 \cdot 10^{17}$ см⁻³, на другом — нулевой. Плотность потока частиц в трубке при этом оказалась равна $j = 4 \cdot 10^{16} \frac{\text{частиц}}{\text{с} \cdot \text{см}^2}$. Оценить длину свободного пробега молекул гелия в азоте и сечение столкновения атомов гелия с молекулами азота. Средняя тепловая скорость атомов гелия $\bar{v} = 1,2 \cdot 10^5$ см/с.

Ответ: $\lambda \sim 10^{-5}$ см, $\sigma \sim 4 \cdot 10^{-15}$ см².

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

Ответ: 10^2 с.

28. 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: $\sqrt{2}$.

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

Ответ: $1,6 \text{ м}^2/\text{с}$.

30. На какую высоту поднимается вода между двумя вертикальными пластинками, частично погружёнными в жидкость, если расстояние между ними $d = 0,5$ мм. Поверхностное натяжение воды $\sigma = 73 \cdot 10^{-3}$ Н/м, краевой угол смачивания $\theta = 60^\circ$.

Ответ: 1,5 см.

31. 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.

32. Найти относительное приращение (по сравнению с давлением насыщенных паров над плоской поверхностью) давления насыщенных паров воды над каплей диаметром $d = 1$ мкм при температуре 20°C . Поверхностное натяжение $\sigma = 73 \cdot 10^{-3}$ Н/м.

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

Текстовые задачи

Т-1. Движение молекулы в процессе диффузии может быть описано так называемой моделью случайных блужданий. Рассмотрим процесс одномерного случайного блуждания вдоль прямой x : частица совершает через равные промежутки времени τ скачки на расстояние $\Delta x = \pm\lambda$ влево или вправо с равной вероятностью. Найти среднеквадратичное смещение частицы от исходного положения $\overline{x^2}$ в зависимости от времени t при $t \gg \tau$. Определить коэффициент одномерной диффузии D ансамбля таких частиц, не взаимодействующих между собой.

$$\text{Ответ: } \overline{x^2} = \frac{\lambda^2}{\tau} t, \quad D = \frac{\lambda^2}{2\tau}.$$

Т-2. Работать в комнате с отравляющими веществами более опасно, когда они находятся в ней в виде мелких капель. Оценить, во сколько раз давление насыщенных паров над ртутью в виде капель с радиусом 10^{-6} см выше, чем над плоской поверхностью ртути. При температуре 293 К коэффициент поверхностного натяжения ртути $\sigma = 487$ дин/см, атомная масса $A = 200,6$, плотность $\rho = 13,55$ г/см³.

Ответ: 1,8.