

В. П. Замураев, А. П. Калинина

МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА ЗАДАЧИ

УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ ДЛЯ СПО

Рекомендовано Учебно-методическим отделом среднего профессионального образования в качестве учебного пособия для студентов образовательных учреждений среднего профессионального образования

**Книга доступна в электронной библиотеке biblio-online.ru,
а также в мобильном приложении «Юрайт.Библиотека»**

Москва ■ Юрайт ■ 2019

УДК 539.1(075.32)
ББК 22.36я723
3-26

Авторы:

Замураев Владимир Павлович — кандидат физико-математических наук, доцент кафедры общей физики физического факультета Новосибирского государственного университета;

Калинина Анна Павловна — доктор физико-математических наук, доцент кафедры информатики Высшего колледжа информатики Новосибирского государственного университета.

Рецензент:

Кацнельсон С. С. — доктор физико-математических наук, профессор.

Замураев, В. П.

3-26 Молекулярная физика. Задачи : учеб. пособие для СПО / В. П. Замураев, А. П. Калинина. — М. : Издательство Юрайт, 2019. — 191 с. — (Серия : Профессиональное образование).

ISBN 978-5-534-11094-4

В учебном пособии приведены задачи с ответами по курсу «Молекулярная физика» с добавлением необходимого для их решения теоретического материала. Пособие охватывает вопросы по статистической физике (распределения Максвелла, Больцмана, Максвелла — Больцмана, Гиббса; теория теплоемкости), физической кинетике (явления переноса в плотных и ультраразреженных идеальных газах) и термодинамике (1-е и 2-е начала термодинамики, энтропия, теория термодинамических потенциалов, процесс Джоуля — Томсона, фазовые превращения и др.).

Содержание пособия соответствует программе практических занятий по дисциплине «Молекулярная физика». Ряд задач взят из литературы, приведенной в конце сборника. Некоторые задачи являются оригинальными. Часть из них предложена С. С. Кацнельсоном, А. А. Киприяновым, А. Ф. Курбацким, А. М. Оришичем, В. А. Толкачевым и др.

Соответствует актуальным требованиям Федерального государственного образовательного стандарта среднего профессионального образования и профессиональным требованиям.

Предназначено для преподавателей и студентов образовательных учреждений среднего профессионального образования.

УДК 539.1(075.32)
ББК 22.36я723



Все права защищены. Никакая часть данной книги не может быть воспроизведена в какой бы то ни было форме без письменного разрешения владельцев авторских прав. Правовую поддержку издательства обеспечивает юридическая компания «Дельфи».

© Замураев В. П., Калинина А. П., 2012
© Новосибирский государственный университет, 2012
© ООО «Издательство Юрайт», 2019

ISBN 978-5-534-11094-4

ПРЕДИСЛОВИЕ ОТ ИЗДАТЕЛЬСТВА

Изучив материалы пособия, студент должен освоить:

трудовые действия

- владения навыками расчетов в рамках термодинамического и статистического методов описания;
- навыками работы с простейшей измерительной аппаратурой;
- навыками работы с учебной и научной литературой.
- методами решения задач, связанных с атомарно-корпускулярным строением вещества
- навыками эксплуатировать современную физическую аппаратуру и оборудование;

необходимые умения

- применять статистические и термодинамические методы к описанию явлений, связанных с атомарно-корпускулярным строением вещества;
- использовать методы физических исследований для изучения термодинамических процессов;
- устанавливать взаимосвязь молекулярных явлений с другими разделами физики, и особо, в пограничных областях — физической химии и химической физики;
- использовать современные образовательные и информационные технологии для приобретения новых знаний;

необходимые знания

- физических основ явлений, связанных с атомарно-корпускулярным строением вещества;
- основных классических и современных экспериментальных результатов в области тепловых явлений, явлений переноса, фазовых переходов;
- основных законов термодинамики, методов термодинамического и статистического описания многочастичных систем;

- принципов работы и устройства современной экспериментальной аппаратуры для исследования тепловых явлений, явлений переноса, фазовых переходов.

ЧАСТЬ 1

СТАТИСТИЧЕСКАЯ ФИЗИКА

Элементы теории вероятностей (теория)

Совокупность огромного числа молекул (в одном моле содержится $N_A = 6 \cdot 10^{23}$ молекул) является системой, качественно отличной от систем из небольшого числа частиц. В ней проявляются закономерности, несвойственные простой механической системе. Движение отдельной молекулы, ее траектория, последовательное изменение состояния становятся несущественными и не влияют на характеристики системы как целого. Из опыта известно, что свойства газа в состоянии равновесия не зависят от предыстории (от того, каким образом был заполнен сосуд) и не изменяются с течением времени. Поведение системы из большого числа частиц подчиняется статистическим закономерностям. Изучение их основано на законах теории вероятности.

Вероятность данного события определяется относительной частотой его появления или, другими словами, как отношение числа благоприятных случаев к полному числу опытов (измерений). Вероятностные суждения являются тем более достоверными, чем к большему числу событий они относятся.

Если некоторая (произвольная) физическая система находится в различных состояниях, образующих дискретный ряд, и L – взаимно однозначная функция состояния (например энергия, объем системы и пр.), то вероятность i -го состояния системы или вероятность того, что величина L имеет значение L_i , определяется как предел отношения числа измерений, дающих значение $L = L_i$, к полному числу измерений, когда последнее неограниченно возрастает:

$$w_i = w_{L_i} = \lim_{N \rightarrow \infty} N_i / N$$

(предполагается, что измерения величины L проводятся через промежуток времени Δt). Из этого определения следует, что вероятность i -го состояния равна пределу отношения времени t_i , в течение которого система находится в этом состоянии, к полному времени наблюдения T при неограниченном возрастании последнего:

$$w_{L_i} = w_i = \lim_{T \rightarrow \infty} t_i / T.$$

Это определение вероятности остается в силе, если спектр состояний системы непрерывный. В этом случае вероятность вводится для интервала значений функции $L: L \div L + dL$.

Теорема сложения вероятностей. Вероятность того, что система находится в одном из взаимоисключающих состояний i, j, k, \dots , равна

$$w_{i+j+k+\dots} = \sum_{l=i,j,k,\dots} w_l.$$

Важное следствие теоремы. Пусть состояние системы характеризуется двумя не зависящими друг от друга величинами L и M . Величина L может пробегать дискретный ряд значений L_1, L_2, \dots , а M – значения M_1, M_2, \dots . Пусть известна вероятность $w_{L_i M_j}$ того, что система находится в состоянии, в котором $L = L_i$ и $M = M_j$. Тогда вероятность w_{L_i} того, что система имеет значение L_i при любом значении величины M , равна

$$w_{L_i} = w_{L_i M_1} + w_{L_i M_2} + \dots = \sum_j w_{L_i M_j},$$

где суммирование ведется по всем значениям величины M .

Закон (теорема) умножения вероятностей. Пусть для двух совершенно независимых физических систем w_{L_i} и w_{M_j} – вероятности того, что первая система находится в состоянии,

характеризуемом величиной L_i , и вторая – в состоянии, характеризуемом M_j . Тогда вероятность одновременной реализации состояний с $L = L_i$ и $M = M_j$ равна

$$w_{L_i M_j} = w_{L_i} w_{M_j} .$$

Закон умножения вероятностей представляет строгое определение статистической независимости двух систем.

Статистическое среднее. Статистическим средним (математическим ожиданием) величины L называют предел отношения (предел среднего арифметического):

$$\bar{L} = \lim_{N \rightarrow \infty} \sum L_i N_i / N , \text{ или } \bar{L} = \lim_{N \rightarrow \infty} \sum L_i t_i / T = \sum L_i w_i .$$

Суммирование ведется по всем состояниям системы.

В случае систем, состояния которых изменяются непрерывно,

$$\bar{L} = \int L dw = \int L \rho(L) dL ,$$

где $\rho(L)$ – плотность вероятности.

Средний квадрат разности

$$\overline{(\Delta L)^2} = \overline{(L - \bar{L})^2}$$

называется квадратичной флуктуацией (дисперсией распределения w_L). Она равна

$$\overline{\Delta L^2} = \overline{L^2} - \bar{L}^2 .$$

Относительная флуктуация

$$\delta_L = \sqrt{(\Delta L^2)/L}$$

дает возможность оценить относительную погрешность, которая возникает при замене L ее средним значением \bar{L} . Если $\delta_L \ll 1$, то такая замена не вносит сколько-нибудь заметной ошибки.

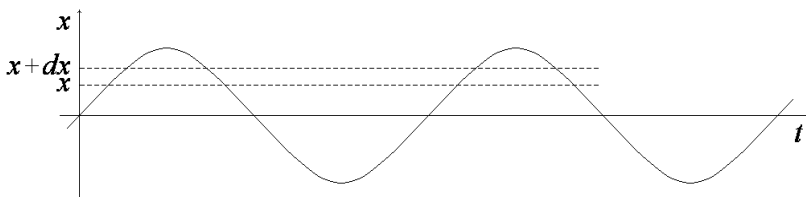
Теорема: если имеется система, состоящая из N независимых частей, то относительная флуктуация любой аддитивной функции состояния L системы обратно пропорциональна квадратному корню из числа N :

$$\delta_L \sim 1/\sqrt{N}.$$

Задачей теоретической физики является изучение свойств макроскопических систем, состоящих из огромного числа атомов или молекул. Из приведенной теоремы следует, что относительные флуктуации всех физических величин, значение которых для всей системы равно сумме значений их для всех частиц, обратно пропорционально квадратному корню из числа частиц. Поскольку число частиц в макроскопических системах выражается огромными числами (в одном моле число частиц $N_A = 6 \cdot 10^{23}$), относительная флуктуация любой аддитивной величины (например, энергии) оказывается практически равной нулю (для моля $\delta_l \sim 10^{-12}$). Это означает, что все аддитивные величины имеют значения, весьма близкие к средним. Поэтому замена истинных величин их средними значениями может быть произведена с очень большой точностью. Таким образом, вероятностные предсказания приобретают практически достоверный характер.

Элементы теории вероятностей (задачи)

1.1. Материальная точка колеблется по закону $x = \sin \omega t$. Найти вероятность того, что при случайном измерении ее положения она будет обнаружена в интервале $x, x + dx$.



Ответ: $dw = dx/(\pi(1-x^2)^{1/2})$.

1.2. Найти среднее значение величины x , ее среднее квадратичное значение, среднюю квадратичную флуктуацию и относительную флуктуацию, если $dw = \text{const} \cdot \exp(-\alpha x)dx$, $\alpha > 0$.

Ответ: $\bar{x} = 1/\alpha$, $\sqrt{\overline{x^2}} = \sqrt{2}/\alpha$, $\overline{\Delta x^2} = 1/\alpha^2$, $\delta_x = 1$.

1.3. Показать, что для системы, состоящей из N независимых одинаковых частей, относительная флуктуация любой аддитивной функции состояния системы $A = \sum_{k=1}^N a_k$ равна

$$\delta_A = \sqrt{\overline{\Delta a^2}} / (N^{1/2} \bar{a}).$$

1.4. Распределение вероятностей для двух случайных величин имеет вид

$$dw(x, y) = \text{const} \cdot (x + y)^2 dx dy, 0 \leq x, y \leq 1.$$

Найти распределение вероятностей для величины x .

Ответ: $dw(x) = 6/7 \cdot (x^2 + x + 1/3)dx$.

1.5. Идеальный газ содержит N молекул, заключенных в объеме V . Найти вероятность того, что в выделенной мысленно части объема v содержится n молекул.



Чему равна относительная флуктуация? Рассмотреть предельные случаи:

а) $N \gg n$ (малый объем: $v \ll V$);

б) среднее число частиц в выделенном объеме велико (малый, но макроскопический объем): $\bar{n} \sim n \gg 1$, $|\Delta n| = |\bar{n} - n| \ll \bar{n}$.

Ответ: $w_N(n) = N!/(n!(N-n)!)\cdot(v/V)^n(1-v/V)^{N-n}$ – биномиальный закон, $\delta_n = ((V/v-1)/N)^{1/2}$;

а) $w_N(n) = \bar{n}^n \cdot \exp(-\bar{n})/n!$, $\bar{n} = Nv/V$ – формула Пуассона;

б) $w_N(n) = (2\pi\bar{n})^{-1/2} \cdot \exp(-(n-\bar{n})^2/2\bar{n})$ – распределение Гаусса.

Распределение Максвелла (теория)

Модель идеального газа. Особенно значительные успехи в применении статистического подхода были достигнуты при изучении газов. Более того, успех в изучении других сред часто был связан с возможностью сведения их к модели газа. Например, твердое тело успешно моделируют двумя газами – электронным и фононным.

Очень простой, но играющей большую роль в исследованиях является модель идеального газа. Она хорошо описывает разреженные газы. При низком давлении расстояние между молекулами газа велико по сравнению с их размерами, а силы межмолекулярного взаимодействия быстро убывают с расстоянием. По этой причине мал промежуток времени, в течение которого взаимодействие молекул значительно. При столкновении их можно

считать недеформируемыми. Большую часть времени они движутся свободно (прямолинейно и равномерно).

Статистическую систему, частицы которой взаимодействуют друг с другом настолько слабо, что этим можно пренебречь, называют идеальным газом.

Гипотеза молекулярного хаоса. Возможность применения статистического подхода связана с громадным числом молекул, из которых состоит рассматриваемая система. Любая ее характеристика с течением времени флуктуирует около своего среднего значения. Однако эти флуктуации весьма малы, а сколь угодно значительные отклонения маловероятны. Измеренные значения характеристик практически не отличаются от средних статистических. Поэтому в дальнейшем под давлением газа, его внутренней энергией и другими параметрами будут подразумеваться средние величины.

Для вычисления параметров газа необходимо знать распределение молекул в пространстве и по скоростям. Оно определяется гипотезой о молекулярном хаосе. В отсутствие внешних массовых сил газ в сосуде равномерно распределяется по всему объему. Это подтверждается опытом.

Молекулы газа движутся с различными скоростями. По указанной гипотезе все направления движения равноправны. Это предположение также соответствует опытным данным. Если бы существовало направление преимущественного движения молекул, то в замкнутом сосуде возник бы стационарный поток газа. Установление молекулярного хаоса обусловлено существованием взаимодействия между молекулами. При столкновении молекул друг с другом изменяются направления их движения и величины скоростей; суммарные импульс и энергия сохраняются. В газе, заключенном в сосуд и предоставленном самому себе, устанавливается стационарное распределение молекул по скоростям. Для идеального газа оно было получено Максвеллом в 1859 г. и названо его именем.

Распределение Максвелла. Из предположения о хаотическом характере молекулярного движения следует, что возможно появление молекул с любой скоростью и искомое распределение будет характеризоваться непрерывной функцией. В связи с этим имеет смысл говорить не о числе молекул со строго заданной

скоростью, а о числе молекул $dn(\vec{v})$, имеющих скорость в некотором элементе объема пространства скоростей:

$$v_x \div v_x + dv_x, \quad v_y \div v_y + dv_y, \quad v_z \div v_z + dv_z,$$

и о распределении вероятностей $dw(\vec{v})$ с плотностью $g(\vec{v})$, так что

$$dw(\vec{v}) = g(\vec{v})d\vec{v},$$

где $d\vec{v} = dv_x dv_y dv_z$ – элемент объема пространства скоростей в декартовых координатах. Из принципа равноправности направлений движения следует, что плотность вероятности не зависит от угловых переменных, указывающих направление вектора скорости, а должна быть лишь функцией его модуля:

$$g(\vec{v}) \equiv g(v).$$

Аналогично можно ввести вероятность того, что молекула имеет компоненту скорости v_ξ в дифференциально малом интервале $v_\xi \div v_\xi + dv_\xi$:

$$dw(v_\xi) = dn(v_\xi)/n = f(v_\xi)dv_\xi, \quad \xi = x, y, z,$$

где в силу хаотичности молекулярного движения каждая из плотностей вероятностей зависит только от «своей» компоненты скорости и не зависит от других; больше того, вид этих функций распределения один и тот же независимо от выбора аргумента v_x, v_y или v_z .

По теореме умножения вероятностей для независимых событий имеем:

$$dw(\vec{v}) = dw(v_x)dw(v_y)dw(v_z).$$

В результате можно получить искомые вероятности:

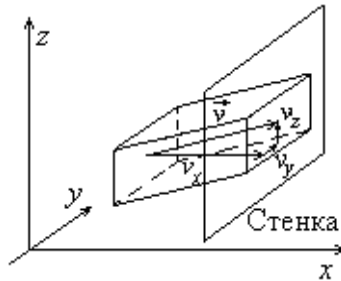
$$dw(v_{\xi}) = \sqrt{\alpha / \pi} \exp(-\alpha v_{\xi}^2) dv_{\xi}, \quad \xi = x, y, z;$$

$$dw(\vec{v}) = (\alpha / \pi)^{3/2} \exp(-\alpha v^2) d\vec{v},$$

где α – положительный параметр. Его можно найти, если рассчитать давление газа p и сравнить его с давлением идеального газа:

$$p = \nu RT/V.$$

В процессе движения молекулы газа, заключенные в сосуд, испытывают соударения с его стенками. При этом каждая молекула передает отражающей ее стенке некоторый импульс. Давление газа на стенку сосуда равно суммарному импульсу, передаваемому единице площади стенки в единицу времени множеством ударяющихся о нее молекул. Если считать, что отражение молекул от стенки происходит совершенно упруго, то импульс, передаваемый при одном соударении, равен $2mv_x$ (ось x направлена перпендикулярно стенке, см. рисунок).



Пусть $dj(v_x)$ – число молекул, падающих на единицу площади стенки в единицу времени и имеющих x -ю компоненту скорости в интервале $v_x \div v_x + dv_x$. Тогда давление газа равно

$$p = \int_0^{\infty} 2mv_x dj(v_x).$$

Величина $dj(v_x)$ равна числу молекул с данной компонентой скорости v_x , находящихся в параллелепипеде высотой v_x и основанием, равным единице площади:

$$dj(v_x) = v_x dn(v_x) = v_x ndw(v_x).$$

Подстановка $dj(v_x)$, интегрирование и сравнение двух выражений для давления дает величину

$$\alpha = m/(2kT),$$

где $k = R/N_A = 1,38 \cdot 10^{-16}$ эрг/К – постоянная Больцмана.

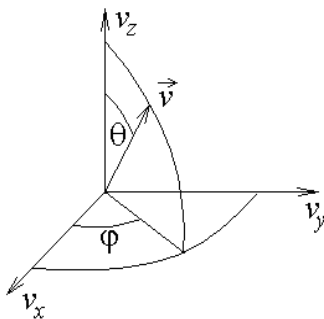
Наряду с распределением по компонентам скорости в декартовых координатах часто используется распределение в сферических координатах

$$dw(\vec{v}) = (\alpha / \pi)^{3/2} \exp(-\alpha v^2) v^2 dv d\Omega,$$

где $d\Omega$ – элемент телесного угла, равный

$$d\Omega = \sin \theta d\theta d\varphi,$$

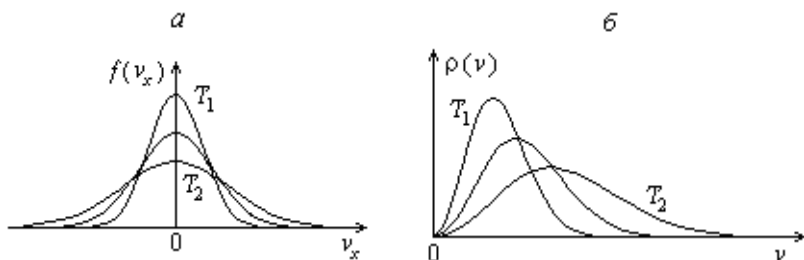
если угловые координаты θ и φ выбраны, как показано на рисунке.



Распределение по величине скорости получается, если вероятность проинтегрировать по телесному углу:

$$dw(v) = f(v)dv = 4\pi(\alpha/\pi)^{3/2} \exp(-\alpha v^2)v^2 dv.$$

Графики плотности вероятности для распределений по компоненте скорости v_x и по величине скорости представлены на рисунке ($T_1 < T_2$).



Кривая плотности вероятности $f(v_x)$ (рис. а) симметрична по отношению к положительным и отрицательным значениям v_x , что является прямым следствием предположения о равноправности направлений молекулярного движения. Кривая $\rho(v)$ (рис. б) имеет максимум: наиболее вероятным состоянием молекулы является ее движение с отличной от нуля скоростью.

Распределение Максвелла (задачи)

1.6. Записать распределение Максвелла в сферической и цилиндрической системах координат. Получить отсюда частные распределения (распределение по абсолютным скоростям v , распределения по углам θ и φ).

Ответ: $dw(v, \theta, \varphi) = 4\pi(m/2\pi kT)^{3/2} \cdot \exp(-mv^2/2kT) v^2 dv \times$
 $\times (1/2) \sin\theta d\theta \cdot d\varphi 2\pi,$

$$dw(v_x, v_r, \varphi) = (m/2\pi kT)^{1/2} \cdot \exp(-mv_x^2/2kT) dv_x \times \\ \times (m/kT) \cdot \exp(-mv_r^2/2kT) v_r dv_r \cdot d\varphi/2\pi.$$

1.7. По распределению Максвелла найти средние значения x -й компоненты скорости \bar{v}_x , абсолютной величины скорости \bar{v} , среднеквадратичной скорости $\sqrt{\overline{v^2}}$; определить наиболее вероятную скорость v_m . Установить соотношения между найденными величинами. Рассчитать значения \bar{v} для молекул водорода и кислорода при комнатной температуре.

$$\text{Ответ: } \bar{v}_x = 0, \bar{v} = (8kT/\pi m)^{1/2}, \sqrt{\overline{v^2}} = (3kT/m)^{1/2}, v_m = (2kT/m)^{1/2};$$

$$\bar{v}_{\text{H}_2} = 1780 \text{ м/с}, \bar{v}_{\text{O}_2} = 445 \text{ м/с}.$$

1.8. Найти распределение частиц газа по энергиям $\varepsilon = mv^2/2$. Рассчитать наиболее вероятную и среднюю энергии. Сравнить их соответственно с величинами $mv_m^2/2$ и $m\bar{v}^2/2$ и объяснить различие.

$$\text{Ответ: } dw(\varepsilon) = 2/(\pi(kT)^3)^{1/2} \cdot \exp(-\varepsilon/kT) \varepsilon^{1/2} d\varepsilon,$$

$$\varepsilon_m = kT/2 \neq mv_m^2/2 = kT,$$

$$\bar{\varepsilon} = m\bar{v}^2/2 = 3kT/2 \neq m\bar{v}^2/2 = 4kT/\pi.$$

1.9. Найти относительную флуктуацию δ_ε энергии молекулы идеального газа и относительную флуктуацию δ_E энергии газа, состоящего из N молекул.

$$\text{Ответ: } \delta_\varepsilon = (2/3)^{1/2}, \delta_E = (2/3N)^{1/2}.$$

1.10. Определить долю частиц в газе, у которых:

а) компонента скорости v_x лежит в интервале $0 \leq v_x \leq v_0$;

б) абсолютная величина скорости $0 \leq v \leq v_0$. Результат выразить

через интеграл вероятности $\operatorname{erf}(x) = 2/\pi^{1/2} \cdot \int_0^x \exp(-t^2) dt$.

Ответ: а) $\Delta n/n = 1/2 \cdot \operatorname{erf}(v_0/v_m)$;

б) $\Delta n/n = \operatorname{erf}(y) - 2/\pi^{1/2} \cdot y \cdot \exp(-y^2)$, $y = v_0/v_m$.

1.11. Пользуясь табличными значениями и асимптотическим ($x \gg 1$) представлением интеграла $\operatorname{erf}(x) = 1 - 1/\pi^{1/2} x \cdot \exp(-x^2)$, рассчитать:

а) долю частиц, у которых $|v_x| \geq v_m$;

б) долю частиц, у которых $v \geq v_m$;

в) долю частиц в атмосфере Земли, скорость которых превосходит вторую космическую $v_2 = 11,2$ км/с; $T = 300$ К, $\mu = 29$.

Ответ: а) $\Delta n/n = 0,160$;

б) $\Delta n/n = 0,576$;

в) $\Delta n/n \approx 10^{-316}$.

1.12. Оставаясь в рамках классической механики, оценить для электронного газа при температуре в 1 эВ (11 600 К) долю электронов, имеющих скорость больше скорости света. При какой температуре доля электронов будет порядка единицы? Как изменятся эти результаты для молекулярного азота?

Ответ: для электронного газа $\Delta n/n \sim 10^{-100000}$, $T \sim 6 \cdot 10^9$ К;

для молекулярного азота $\Delta n/n \sim 10^{-6 \cdot 10^9}$, $T \sim 3 \cdot 10^{14}$ К.

1.13. Пленки некоторых нерастворимых органических кислот и спиртов на воде можно моделировать идеальным двумерным газом.

Написать распределение по скоростям в таком газе в декартовых и полярных координатах. Определить среднюю энергию одной молекулы.

Ответ: $dw(v_x, v_y) = m/2\pi kT \cdot \exp(-m(v_x^2 + v_y^2)/2kT) dv_x dv_y,$

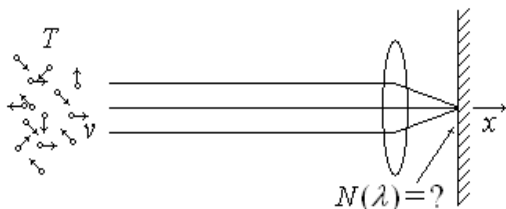
$$dw(v, \varphi) = m/kT \cdot \exp(-mv^2/2kT) v dv \cdot d\varphi/2\pi.$$

$$\bar{\varepsilon} = m \overline{v^2} / 2 = kT.$$

1.14. Найти среднюю скорость теплового движения молекул двумерного идеального газа.

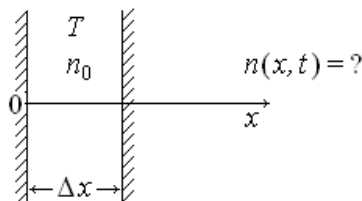
Ответ: $\bar{v} = (\pi kT/2m)^{1/2}.$

1.15. Газ состоит из атомов, излучающих свет с длиной волны λ_0 . Найти закон распределения измеряемой в спектроскопе интенсивности излучения газа $I(\lambda)$ в зависимости от длины волны. Учесть эффект Допплера.



Ответ: $I = I_0 \cdot \exp(-(\lambda - \lambda_0)^2/\delta^2), \delta = (2kT/m)^{1/2} \cdot \lambda_0/c.$

1.16. Между двумя стенками находится газ при температуре T с концентрацией n_0 . Внезапно одна стенка исчезает и газ начинает разлетаться. Найти, как меняется концентрация газа $n(x, t)$ на расстоянии x от стенки. Считать, что расстояние между стенками Δx много меньше x .



Ответ:
$$n(x, t) = \frac{n_0 \Delta x}{t} \sqrt{\frac{m}{2\pi kT}} \exp\left(-\frac{mx^2}{2kT t^2}\right).$$

1.17. Идеальный газ находится в неравновесном состоянии, в котором все молекулы имеют одинаковые по модулю скорости v и изотропно распределены по направлениям движения. Найти распределение для проекций скоростей на некоторую ось. С его помощью рассчитать давление газа и число ударов молекул о единицу площади стенки. Концентрация газа n , масса молекулы m .

Ответ: $p = mnv^2/3, j = nv/4.$

1.18. Пленки некоторых нерастворимых органических кислот и спиртов можно моделировать идеальным двумерным газом. Считая, что такой идеальный газ находится в неравновесном состоянии, в котором все молекулы имеют одинаковые по модулю скорости v и изотропно распределены по направлениям движения в плоскости пленки, найти распределение для проекций скоростей на некоторую ось в плоскости пленки. С его помощью рассчитать давление газа и число ударов молекул о единичный отрезок границы пленки. Концентрация газа n , масса молекулы m .

Ответ: $p = mnv^2/2, j = nv/\pi.$

1.19. По плоской поверхности из источника радиусом r разлетаются молекулы массой m и оседают на окружности радиуса R , расположенной концентрически с источником. Мощность