

Министерство образования и науки Российской Федерации

Государственное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Тамбовский государственный технический университет»

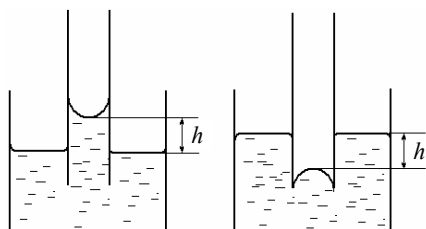
СТАТИСТИЧЕСКАЯ ФИЗИКА И ТЕРМОДИНАМИКА

Методические рекомендации
по изучению курса



Тамбов
Издательство ТГТУ
2005

СТАТИСТИЧЕСКАЯ ФИЗИКА И ТЕРМОДИНАМИКА



• Издательство ТГТУ •

УДК В3(07)
ББК В317
С78

Рецензент
Доктор физико-математических наук,
заведующий кафедрой общей физики ТГУ им. Г.Р. Державина
В.А. Федоров

Статистическая физика и термодинамика: Методические рекомендации / Сост.: Ю.Ю. Громов, М.А. Желтов, Н.А. Земской, О.Г. Иванова, Ю.А. Костылев, А.В. Лагутин. Тамбов: Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2005. 48 с.

Методические рекомендации по изучению курса знакомят иностранных учащихся с молекулярно-кинетическими закономерностями поведения твердых тел, жидкостей и газов. Содержат тексты, лексико-грамматические материалы, вопросы и упражнения, позволяющие студентам овладеть основными понятиями и определениями статистической физики и термодинамики. Структура и содержание рекомендаций обеспечивают преимущество в обучении на предвузовском этапе подготовки и первых курсах высших учебных заведений.

Предназначены для студентов-иностранцев, проходящих предвузовскую подготовку.

УДК В3(07)
ББК В317

© Тамбовский государственный
технический университет
(ТГТУ), 2005

Учебное издание

СТАТИСТИЧЕСКАЯ ФИЗИКА
И ТЕРМОДИНАМИКА

Методические рекомендации

Составители:

ГРОМОВ Юрий Юрьевич,
ЖЕЛТОВ Михаил Александрович,
ЗЕМСКОЙ Николай Александрович,
ИВАНОВА Ольга Геннадьевна,
КОСТЫЛЕВ Юрий Александрович,
ЛАГУТИН Андрей Владимирович

Редактор Т.М. Федченко

Компьютерное макетирование И.В. Евсеевой

Подписано к печати 24.11.2005.

Гарнитура Times New Roman. Формат 60 × 84/16. Бумага газетная.

Печать офсетная. Объем: 2,79 усл. печ. л.; 2,80 уч.-изд. л.

Тираж 100 экз. С. 825

Издательско-полиграфический центр ТГТУ
392000, Тамбов, Советская, 106, к. 14

1 МОЛЕКУЛЯРНАЯ СТРУКТУРА ВЕЩЕСТВА

1.1 Масса атомов. Молярная масса

С древнейших времен люди пытались понять, как устроены тела, которые их окружали. Исторически существовали два подхода. Одни считали, что вещество непрерывно и не существует мельчайшей частицы вещества. Другие, наоборот, предполагали существование мельчайших частиц вещества и отстаивали дискретность вещества. Эти мельчайшие частицы вещества древние греки называли атомами. Такое идейное противостояние окончательно разрешилось в XX веке в пользу сторонников атомной структуры вещества. Атомы очень малы. Они недоступны наблюдению невооруженным глазом и неразличимы с помощью оптического микроскопа. Однако их изображение можно наблюдать с помощью ионного микроскопа.

Атом – наименьшая частица химического элемента, являющаяся носителем его свойств.

Все вещества по составу можно разделить на два класса: простые и сложные. Простые вещества состоят из атомов одного и того же химического элемента. Сложные вещества состоят из атомов разных химических элементов.

Строение атома напоминает структуру Солнечной системы. Вокруг ядра, находящегося в центре атома, движутся электроны. Электроны – отрицательно заряженные частицы. Заряд электрона очень мал. Его численное значение $1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл. Ядро состоит из частиц двух типов: нейтронов и протонов. Их массы очень близки, но нейтроны электрически нейтральны, тогда как протоны обладают электрическим зарядом. Заряд протона положителен и численно точно равен заряду электрона. Число электронов и протонов в атоме всегда равно. Поэтому атом в целом электрически нейтрален. Электроны удерживаются вблизи положительно заряженного ядра силами электромагнитного взаимодействия. Полный заряд ядра равен Ze , где Z – число протонов в ядре, а e – заряд электрона.

Другой основной характеристикой атома является его масса. Она складывается из массы ядра и суммарной массы электронов. Масса протона $m_p = 1,672623 \cdot 10^{-27}$ кг очень близка к массе нейтрона $m_n = 1,672623 \cdot 10^{-27}$ кг. Электрон в 1836 раз легче протона $m_e = 9,1093897 \cdot 10^{-31}$ кг и в 1839 раз легче нейтрона. Поэтому практически вся масса атома сосредоточена в его ядре. Протоны и нейтроны получили общее название – нуклоны. Массовое число A равно числу нуклонов в ядре атома, т.е. $A = Z + N$, где Z – число протонов, а N – число нейтронов в ядре. Количество нейтронов в ядре одного и того же химического элемента может быть разным.

Изотоп – разновидность одного и того же химического элемента, атом которого содержит одинаковое число протонов в ядре и разное число нейтронов.

В классической механике масса считается аддитивной величиной. Это означает, что масса целого равна сумме масс его частей. В микромире это неверно. Например, суммарная масса 6 протонов, 6 нейтронов и 6 электронов, составляющих один из изотопов углерода, равна $2,009 \cdot 10^{-26}$ кг. Измерение полной массы атома дает другой результат $1,992648 \cdot 10^{-26}$ кг.

Массу микрочастиц принято измерять в атомных единицах массы (а.е.м.). Атомная единица массы – это средняя масса нуклона в изотопе углерода, в котором содержится 12 нуклонов.

Атомная единица массы равна 1/12 массы атома углерода $^{12}_6\text{C}$, т.е. $1 \text{ а.е.м.} = 1,66 \cdot 10^{-27}$ кг.

Масса произвольного атома может быть выражена либо в атомных единицах массы, либо в килограммах:

$$m = M_{\text{отн}} \text{ а.е.м.} = M_{\text{отн}} \cdot 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ кг}, \quad (1.1.1)$$

где $M_{\text{отн}}$ – относительная атомная масса.

Относительная атомная масса – это число атомных единиц массы, содержащихся в массе атома.

Относительная атомная масса практически совпадает с числом нуклонов в его ядре, т.е. $M_{\text{отн}} \approx A$.

Количество вещества характеризуется числом молекул этого вещества. Макроскопические тела состоят из огромного числа частиц. Поэтому количество вещества удобно измерять в крупных единицах, содержащих большое число частиц. Единицей количества вещества является один моль.

Моль – это количество вещества, масса которого, выраженная в граммах, численно равна относительной атомной массе.

Массу одного моля называют молярной массой и обозначают M . Очевидно, что

$$M = M_{\text{отн}} \cdot 1 \text{ Г/моль}. \quad (1.1.2)$$

Единица молярной массы – килограмм на моль. Молярная масса может быть выражена через число атомов (или молекул) в моле вещества N_A и массу отдельного атома m_a :

$$M = m_a N_A. \quad (1.1.3)$$

Число N_A называют числом Авогадро или постоянной Авогадро. Постоянная Авогадро одинакова для всех веществ, т.е. моль любого вещества содержит одинаковое число атомов (или молекул). Это число равно $6,022 \cdot 10^{23}$ моль⁻¹.

Постоянная Авогадро – это число атомов, (или молекул), содержащихся в одном моле любого вещества.

1.2 Агрегатные состояния вещества

Объяснение свойств вещества, исходя из представлений о его молекулярном строении, составляет предмет молекулярно-кинетической теории вещества. Основу этой теории составляют следующие положения: а) все тела состоят из атомов и молекул; б) атомы и молекулы непрерывно движутся; в) между атомами (молекулами) действуют как силы притяжения, так и силы отталкивания. Взаимное расположение, характер движения и взаимодействие молекул одного и того же вещества, существенно зависящие от внешних условий, характеризуют его агрегатное состояние. Известны четыре агрегатных состояния вещества: твердое, жидкое, газообразное и плазменное. Между этими агрегатными состояниями (или фазами) наблюдаются переходы. Эти переходы называются фазовыми переходами.

Фазовый переход – это переход системы из одного агрегатного состояния в другое.

Наиболее часто наблюдаются фазовые переходы между агрегатными состояниями, у которых потенциальная энергия связи молекул наиболее близка друг к другу. Плавление – переход из твердого состояния в жидкое. Испарение – переход из жидкого состояния в газообразное. Ионизация – переход из газообразного состояния в плазменное. Однако известен и переход из твердого состояния в газообразное. Этот переход называется сублимацией. Сублимация – это переход из твердого состояния в газообразное минуя жидкое состояние. При фазовом переходе скачкообразно изменяется какая-либо физическая величина или симметрия системы. Вид агрегатного состояния, в котором находится вещество, зависит от соотношения кинетической и потенциальной энергии молекул, входящих в его состав. Потенциальная энергия молекулы характеризует интенсивность ее взаимодействия с другими молекулами. Между любыми двумя молекулами вещества на расстоянии, большем диаметра молекул, действуют силы притяжения. Эти силы имеют электромагнитную природу. Они стремятся объединить молекулы в одно целое. Кинетическая энергия молекул препятствует объединению молекул в единое целое.

В условиях Земли большинство тел находится в твердом состоянии.

Вещество находится в твердом состоянии, если средняя потенциальная энергия молекул существенно больше их средней кинетической энергии.

Силы электрического отталкивания ядер молекул препятствуют уменьшению расстояния между молекулами. Заметим, что силы отталкивания между молекулами становятся значительными лишь на малых расстояниях. Силы притяжения преобладают на больших расстояниях. Каждая молекула занимает определенный объем в пространстве, притягивая соседние молекулы и одновременно отталкивая их, не позволяя занять то место, где она находится. Благодаря такому взаимодействию молекулы плотно заполняют пространство.

Молекулы в твердом теле располагаются упорядоченно. Как показали рентгенографические исследования, для твердых тел характерен дальний порядок расположения их молекул. Частицы твердого тела, образуя кристаллическую решетку, колеблются около некоторых средних положений равновесия. Эти средние положения равновесия называются узлами кристаллической решетки. Молекулы колеблются во всевозможных направлениях и могут иметь различную амплитуду. Значительная средняя потенциальная энергия взаимодействия препятствует изменению среднего расстояния между молекулами. Следствием этого является сохранение твердыми телами формы и объема. При деформации в твердом теле возникают силы, стремящиеся восстановить его форму и объем.

При нагревании твердого тела средняя кинетическая энергия молекул возрастает. Это приводит к увеличению амплитуды их колебаний. Расстояние между молекулами увеличивается. Поэтому энергия связи при нагревании уменьшается. Уменьшение энергии связи позволяет молекулам перескакивать из

одного положения равновесия в другое. Дальний порядок, характерный для кристаллической решетки твердого тела, нарушается. Происходит фазовый переход вещества из твердого состояния в жидкое.

Вещество находится в жидком состоянии, если средняя кинетическая энергия молекул соизмерима со средней потенциальной энергией их притяжения.

В жидкости при температуре плавления молекулы расположены почти так же плотно, как в твердом теле. Поэтому плотность жидкости при температуре плавления немного меньше плотности твердого тела при той же температуре. В расположении молекул жидкости наблюдается только ближний порядок. Он наблюдается в пределах двух-трех слоев. Это означает, что при плавлении происходит нарушение симметрии системы. Относительные положения молекул в жидкости не фиксированы. Молекулы, хотя и медленно, изменяют положение друг относительно друга. Под действием внешней силы жидкость течет. Она сохраняет свой объем, но принимает форму сосуда. Переходы молекул из одного положения в другое осуществляется скачкообразно. Такие переходы принято называть трансляционными скачками. Текучесть жидкости объясняется тем, что перескоки молекул из одного положения равновесия в другое происходят преимущественно в направлении действия внешней силы.

Сжимаемость жидкости невелика, но тем не менее выше, чем сжимаемость кристаллических твердых тел.

При нагревании жидкости кинетическая энергия молекул может возрасти настолько, что окажется достаточной для преодоления энергии связи между молекулами.

Вещество находится в газообразном состоянии, если средняя кинетическая энергия молекул превышает их среднюю потенциальную энергию взаимодействия.

При атмосферном давлении плотность газа примерно в 1000 раз меньше плотности жидкости. Поэтому расстояние между молекулами газа существенно больше, чем в жидкостях. Силы притяжения между молекулами незначительны, поэтому газы могут неограниченно расширяться, занимая весь предоставленный им объем. Наличие большого межмолекулярного пространства приводит к значительной сжимаемости газов. При сжатии газа уменьшается среднее расстояние между его молекулами. Но силы взаимного отталкивания на таких расстояниях малы и практически не препятствуют сжатию.

Нагревание газа приводит к увеличению скорости движения молекул и, следовательно, к возрастанию их средней кинетической энергии. Большая кинетическая энергия молекул в нагретом газе оказывается достаточной для выбивания из атомов валентных электронов. При этом нейтральный атом превращается в положительный ион. Происходит ионизация газа.

Ионизация – это процесс образования ионов из нейтральных атомов.

В процессе ионизации качественно изменяется состав газа. Наряду с электронейтральными атомами появятся электроны и положительные ионы. Полный электрический заряд газа сохраняется. Изменение качественного состава газа приводит к образованию нового агрегатного состояния. Это состояние называется плазмой.

Плазма – это электронейтральная совокупность нейтральных и заряженных частиц.

Плазма – это наиболее распространенное состояние вещества во Вселенной. Около 99,9 % вещества во Вселенной находится в состоянии плазмы. Гигантскими скоплениями плазмы являются туманности и звезды. В земных условиях плазму можно наблюдать при северном сиянии и атмосферных электрических разрядах (молния). Солнечный ветер – это поток плазмы, испускаемый Солнцем. Он заметно влияет на магнитное поле Земли.

1.3 Идеальный газ

Простейшей моделью газа является модель идеального газа. Условия, накладываемые на идеальный газ, следующие: 1) среднее расстояние между молекулами l значительно больше диаметра молекул d , т.е. $l \gg d$; 2) средняя кинетическая энергия молекул много больше средней потенциальной энергии их взаимодействия; 3) столкновения молекул газа между собой и со стенками сосуда абсолютно упругие. Газ, удовлетворяющий этим трем условиям, называется идеальным. Первое условие означает, что идеальный газ – это достаточно разреженный газ. Другими словами собственный объем молекул пренебрежимо мал по сравнению с объемом газа. Поэтому собственным объемом молекул идеального газа можно пренебречь и считать, что молекулы не имеют собственных размеров. Идеальный газ – это газ точечных частиц. Второе условие означает, что расстояние между частицами велики и между столкновениями молекулы движутся как свободные частицы по прямолинейным траекториям. Третье условие означает, что структура электронных оболочек атомов в процессе столкновения не нарушается. Обобщим сказанное.

Идеальный газ – это газ материальных точек, между которыми отсутствуют силы взаимодействия и которые сталкиваются между собой и со стенками сосуда как упругие частицы.

Несмотря на свою простоту, модель идеального газа довольно хорошо описывает свойства разреженных газов. Это означает, что свойства различных газов не отличаются существенно друг от друга.

Свойства различных разреженных газов не зависят от специфики сил взаимодействия между отдельными молекулами.

Атмосферный воздух является примером идеального газа.

Из-за столкновений друг с другом молекулы газа постоянно изменяют направление своего движения. Большое число частиц в газе и хаотичность их движения приводит к тому, что информация о газе носит статистический характер.

Статистическая закономерность – это закон поведения совокупности большого числа частиц.

Система, состоящая из большого числа частиц, характеризуется микроскопическими и макроскопическими параметрами.

Микроскопические параметры – это параметры малых частиц (масса молекулы, ее скорость, импульс, энергия), характеризующие движение отдельной частицы.

Макроскопические параметры – это параметры, характеризующие свойства газа как целого (масса газа, давление, объем, температура).

Молекулярно-кинетическая теория выясняет связь между макроскопическим и микроскопическими параметрами. Ее цель – объяснить макроскопические свойства, исходя из характерных особенностей его молекулярной структуры.

1.4 Температура

В результате большого числа столкновений между молекулами устанавливается стационарное равновесное состояние газа. Важнейшим макроскопическим параметром, характеризующим стационарное равновесное состояние любого тела, является температура.

Температура тела – это мера средней кинетической энергии хаотического движения его молекул.

Температура – статистическая величина, характеризующая достаточно большую совокупность частиц. Средняя кинетическая энергия хаотического движения молекул тела пропорциональна абсолютной температуре, т.е.

$$\overline{mv^2} = \frac{3}{2} kT, \quad (1.4.1)$$

где $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К – постоянная Больцмана. Единица абсолютной или термодинамической температуры – кельвин (К).

Кинетическая энергия существенно положительная величина. Поэтому термодинамическая температура не может быть отрицательной. Она обращается в нуль, когда средняя кинетическая энергия молекул становится равной нулю.

Абсолютный нуль температуры – это температура, при которой должно прекратиться движение молекул.

На практике наиболее употребима шкала температур Цельсия. В этой шкале за 0°C принята температура таяния льда, а температура кипения воды принята равной 100°C . При этом оказывается, что градус шкалы Цельсия в точности равен градусу термодинамической шкалы температур. Связь между двумя этими температурными шкалами определяется соотношениями:

$$T = t^\circ\text{C} + 273 \quad \text{и} \quad t^\circ\text{C} = T - 273. \quad (1.4.2)$$

Абсолютный нуль термодинамической температуры по шкале Кельвина равен $-273,15^\circ\text{C}$.

1.5 Основное уравнение молекулярно-кинетической теории

Мы хорошо знаем, что молекулы газа совершают хаотическое тепловое движение. Это движение никогда не прекращается. Средняя квадратичная скорость молекул очень большая. Так, например, у молекул азота при 20°C она составляет более 500 м/с. У более легких молекул среднеквадратичная скорость еще больше. Двигаясь с такими большими скоростями молекулы сталкиваются со стенками сосуда и оказывают на них давление. Расчеты показывают, что это давление определяется по формуле

$$p = \frac{1}{3} n m_0 \bar{v}^2, \quad (1.5.1)$$

где n – концентрация молекул, а m_0 – масса одной молекулы. Это так называемое основное уравнение молекулярно-кинетической теории идеального газа. Если в него ввести среднюю кинетическую энергию, тогда

$$p = \frac{2}{3} n \bar{E}_k. \quad (1.5.2)$$

Давление идеального газа равно двум третям средней кинетической энергии поступательного движения молекул, содержащихся в единице объема.

Часто газ является смесью нескольких газов. Молекулы каждого газа взаимодействуют со стенками сосуда независимо друг от друга. В результате каждый газ оказывает на стенки сосуда определенное давление. Это давление называется парциальным давлением. Все парциальные давления складываются.

Давление смеси идеальных газов равно сумме парциальных давлений, составляющих ее газов.

1.6 Уравнение Менделеева–Клапейрона

Воспользовавшись уравнением, связывающим среднюю кинетическую энергию молекулы газа и термодинамическую температуру, основное уравнение запишем так

$$p = nkT. \quad (1.6.1)$$

По определению $n = N/V$, где N – число частиц в объеме V . Поэтому

$$pV = NkT. \quad (1.6.2)$$

Умножим и разделим правую часть (1.6.2) на $M = m_0 N_A$ и учтем, что $m = m_0 N$ – масса газа, $kN_A = R$ – универсальная газовая постоянная ($R = 8,31$ Дж/(моль·К)). Получим

$$pV = \frac{m}{M} RT. \quad (1.6.3)$$

Это уравнение называется уравнением Менделеева–Клапейрона. Оно выполняется для идеального газа. Из него видно, что состояние данной массы газа однозначно определяется заданием любых двух параметров p , V и T . Третий параметр вычисляется по уравнению Менделеева–Клапейрона. Специфику газа характеризует молярная масса.

1.7 Изопроцессы

Изопроцесс – это процесс, протекающий при одном постоянном параметре. В зависимости от того, какой из трех параметров p , V или T является фиксированным, говорят об изобарном, изохорном или изотермическом процессе.

Изотермический процесс – это процесс изменения состояния данной массы газа при постоянной температуре.

Из определения следует, что в изотермическом процессе $T = \text{const}$ и $m = \text{const}$. При этих условиях из уравнения Менделеева–Клапейрона следует:

$$pV = \text{const}. \quad (1.7.1)$$

Отсюда следует, что произведение начального давления газа p_0 на его первоначальный объем V_0 равно произведению этих параметров

Для данной массы газа в произведение давления газа на его

$$p_0 V_0 = pV.$$

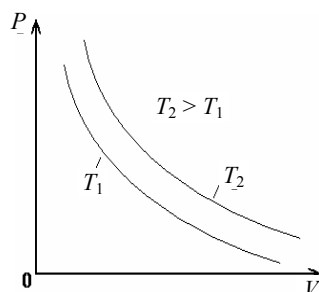


Рис. 1.7.1

в произвольном состоянии. В этом

изотермическом процессе

объем постоянно

$$(1.7.2)$$

Давление газа в изотермическом процессе обратно пропорционально его объему. Графически обратно пропорциональная зависимость изображается гиперболой (рис. 1.7.1). Для изотермического процесса она называется изотермой. Чем выше температура газа, тем выше расположена изотерма.

Изобарный процесс – это процесс изменения состояния данной массы газа при постоянном давлении.

Из определения следует, что в изобарном процессе $m = \text{const}$ и $p = \text{const}$. При этих условиях из уравнения Менделеева–Клапейрона получаем:

$$\frac{V}{T} = \text{const} \quad (1.7.3)$$

или

$$\frac{V_0}{T_0} = \frac{V}{T}. \quad (1.7.4)$$

Формулы (1.7.3) и (1.7.4) выражают закон Гей-Люссака.

Для данной массы газа при постоянном давлении отношение объема газа к его термодинамической температуре постоянно

Из закона Гей-Люссака следует, что при постоянном давлении пропорционально температуре. На рис. 1.7.2 приведен график зависимости объема от температуры. Это прямая линия. Она продолжена изобару в область низких температур, то она пройдет

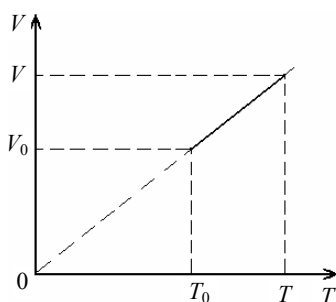


Рис. 1.7.2

что объем данной массы газа пропорционален термодинамической температуре. Этот график зависимости объема от температуры называется изобарой. Если продолжить изобару в область низких температур, то она пройдет

процесс изменения состояния данной массы газа при постоянном объеме.

Из определения следует, что при изохорном процессе $m = \text{const}$ и $V = \text{const}$. При этих условиях из уравнения Менделеева–Клапейрона следует

$$\frac{p}{T} = \text{const} \quad (1.7.5)$$

Изохорный процесс – это процесс изменения состояния данной массы

Из

изохорном

условиях из уравнения Менделеева–Клапейрона следует

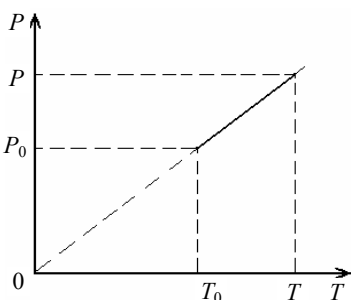


Рис. 1.7.3

Для данной массы газа отношение давления газа к его термодинамической температуре постоянно.

Это утверждение носит название закона Шарля. Из него следует, что давление данной массы газа в изохорном процессе зависит от температуры по линейному закону. На рис. 1.7.3. приведен график этой зависимости. Он представляет собой прямую, продолжение которой в область отрицательных температур проходит через начало координат. Сам график называется изохорой.

Слова и словосочетания

Вещество

Атом

Молекула

Изотоп

Количество вещества

Постоянная Авогадро

Агрегатное состояние

Фаза вещества

Твердое состояние

Жидкое состояние

Газообразное состояние

Плазма

Фазовый переход

Упорядоченность

Нарушение симметрии

Идеальный газ

Простые вещества

Сложные вещества

Строение атома

Взаимодействие молекул

Атомная единица массы (а.е.м.)

Относительная атомная масса

Молярная масса

Молекулярное строение вещества

Молекулярно-кинетическая теория

Плавление

Испарение

Ионизация

Сублимация

Дальний порядок

Ближний порядок

Абсолютно упругие столкновения

Статистика	Статистическая закономерность
Хаотическое движение	Макроскопические параметры
Постоянная Больцмана	Микроскопические параметры
Параметр	Абсолютная температура
Температура	Абсолютный нуль температуры
Шкала температур	Термодинамическая шкала
Хаотическое тепловое движение	Средняя квадратичная скорость
Кинетическая энергия	Средняя кинетическая энергия
Поступательное движение молекул	Парциальное давление
Концентрация молекул	Уравнение Менделеева–Клапейрона
Смесь газов	Изотермический процесс
Изопроцессы	Изобарный процесс
Изотерма	Изохорный процесс
Гипербола	
Изобара	
Изохора	
Линейный закон	

Вопросы для самопроверки

- Перечислите основные положения молекулярно-кинетической теории
- Приведите известные Вам доказательства существования молекул.
- Что называется относительной атомной массой?
- Что называют количеством вещества?
- Дайте определение единицы количества вещества – моля.
- Чему равна постоянная Авогадро?
- Дайте определение молярной массы.
- Как силы взаимодействия между молекулами зависят от расстояния между ними?
- В чем различие молекулярного строения газов, жидкостей и твердых тел?
- Что называют дальним и ближним порядком?
- Что называют идеальным газом?
- Что отражает основное уравнение молекулярно-кинетической теории?
- Какие преимущества имеет абсолютная шкала температур по сравнению с другими шкалами?
- Каков физический смысл абсолютного нуля температур?
- Чему равен абсолютный нуль температуры по шкале Цельсия?
- Сформулируйте уравнение Менделеева–Клапейрона.
- Чему равна универсальная газовая постоянная?
- Перечислите изопроцессы. Как называются соответствующие графики этих процессов.

2 ТЕРМОДИНАМИКА

Научно-техническая революция, начавшаяся в XIX веке, характеризуется прежде всего переходом от применения механической энергии к использованию внутренней энергии, за счет которой может совершаться существенно большая работа.

Термодинамика – это раздел физики, изучающий возможности использования внутренней энергии тел для совершения механической работы.

Термодинамика изучает тепловые свойства макроскопических тел без учета их молекулярного строения. В основе термодинамики лежат подтвержденные всем совокупным опытом человечества законы. Поэтому выводы термодинамики чрезвычайно надежны.

2.1 Внутренняя энергия

Одной из основных термодинамических величин является внутренняя энергия.

Внутренняя энергия тела – это сумма кинетической энергии хаотического движения молекул тела и потенциальной энергии их взаимодействия между собой.

Для идеального газа потенциальная энергия взаимодействия частиц пренебрежимо мала по сравнению с их кинетической энергией теплового движения. Поэтому внутренняя энергия идеального газа практически полностью определяется кинетической энергией теплового движения молекул.

Средняя кинетическая энергия одной молекулы определяется по формуле

$$\bar{E}_k = \frac{3}{2} kT . \quad (2.1.1)$$

У точечной частицы имеется три возможных направления движения. Чтобы зафиксировать точечную частицу достаточно задать три координаты: x , y и z . В этом смысле говорят, что у частицы имеется три степени свободы поступательного движения. Вращательных степеней свободы у точечной частицы нет, так как понятие вращения точечной частицы около оси, проходящей через саму частицу, лишено смысла.

Число степеней свободы – это число независимых направлений движения молекулы.

В силу хаотичности движения на каждую степень свободы одноатомной молекулы (атома) приходится одинаковая энергия $kT/2$. Кинетическая энергия молекулы идеального газа складывается из кинетической энергии поступательного и вращательного движения. Считается, что кинетическая энергия, приходящаяся на одну степень свободы вращательного движения также равна $kT/2$.

Внутренняя энергия одноатомного газа U равна

$$U = \frac{3}{2} kT . \quad (2.1.2)$$

Разделив и умножив правую часть этого выражения на молярную массу $M = m_0 N_A$, получим

$$U = \frac{3}{2} \frac{m}{M} RT . \quad (2.1.3)$$

Используя уравнение Менделеева–Клапейрона, выражение (2.1.3) можно записать в виде

$$U = \frac{3}{2} pV . \quad (2.1.4)$$

Газ называется двухатомным, если каждая его молекула состоит из двух атомов. У двухатомной молекулы имеется три степени поступательного движения и две степени вращательного движения. Поэтому средняя кинетическая энергия двухатомной молекулы равна

$$\bar{E}_k = \frac{5}{2} kT . \quad (2.1.5)$$

Следовательно, внутренняя энергия идеального двухатомного газа равна

$$U = \frac{5}{2} \frac{m}{M} RT \quad (2.1.6)$$

или

$$U = \frac{5}{2} pV . \quad (2.1.7)$$

Если молекула состоит из трех и более атомов, то она имеет шесть степеней свободы: три степени поступательного движения и три степени вращательного движения. Формулы для внутренней энергии многоатомного газа имеют вид

$$U = 3 \frac{m}{M} RT \quad (2.1.8)$$

или

$$U = 3 pV . \quad (2.1.9)$$

Формулы для внутренней энергии идеального газа объединяются в одну

$$U = \frac{i}{2} \frac{m}{M} RT = \frac{i}{2} pV , \quad (2.1.10)$$

где i – число степеней свободы молекул газа.

2.2 Способы изменения внутренней энергии

Существуют только два способа изменения внутренней энергии тела. Первый способ заключается в изменении температуры тела. Этого можно достичь либо нагревом, либо охлаждением этого тела. При этом соответственно внутренняя энергия либо возрастет, либо уменьшится. Первый способ изменения внутренней энергии тела связан с теплообменом.

Теплообмен – это процесс передачи энергии от одного тела к другому без совершения механической работы.

Мерой передачи энергии посредством теплообмена служит количество теплоты.

Количество теплоты, получаемое телом – это энергия, передаваемая телу от других тел в процессе теплообмена.

При нагревании тела увеличивается его температура и внутренняя энергия. При охлаждении тела его температура и внутренняя энергия уменьшаются. За счет изменения внутренней энергии тела при теплообмене не может совершаться механическая работа.

Второй способ изменения внутренней энергии тела заключается в совершении над телом механической работы. При этом его температура и внутренняя энергия увеличиваются. В этом легко убедиться, потерев руки друг о друга. Мы очень быстро ощущаем тепло. Можно, наоборот, дать возможность телу совершить механическую работу. При этом его температура и внутренняя энергия уменьшатся.

2.3 Работа газа в изопроцессах

Внутреннюю энергию газа в механическую работу преобразуют тепловые машины. Первоначально увеличивают внутреннюю энергию газа, сжигая то или иное топливо. Для преобразования внутренней энергии газа в механическую работу хаотическое движение его молекул нужно превратить в упорядоченное движение другого тела. Таким телом служит поршень в цилиндре (рис. 2.3.1). Поршень перемещается под давлением газа, заполняющего цилиндр. Сила давления газа совершает работу при его расширении за счет уменьшения внутренней энергии газа.

Вычислим работу расширения газа. Пусть F – сила давления газа на стенки цилиндра и поршень. Будем считать, что в процессе расширения газа эта сила не изменяется. Предположим, что поршень переместился на высоту h , и обозначим площадь поршня S . Кроме того, будем считать поршень невесомым, а его перемещение внутри цилиндра свободным. По определению механическая работа такого перемещения будет равна

$$A = Fh \cos 0^\circ = \frac{F}{S} Sh. \quad (2.3.1)$$

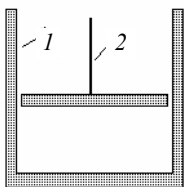


Рис. 2.3.1

Очевидно, что $Sh = \Delta V = V_2 - V_1$, а $\frac{F}{S} = p$. Поэтому получаем

$$A = p(V_2 - V_1). \quad (2.3.2)$$

Работа, совершаемая газом, равна произведению давления газа на изменение его объема.

Формула (2.3.2) выполняется при давлении изменяется, то выбирают давление практически остается при расширении ($\Delta V > 0$) газ совершает внутренняя энергия уменьшается. При газом, отрицательна, а его внутренняя

При изобарном процессе $\Delta V = 0$ и совершается. Соответственно его энергия и температура остаются

При изобарном расширении газа прямоугольника (рис. 2.3.2) под Другими словами, работа изобарного формуле (2.3.2).

При изотермическом расширении гиперболическому закону. Поэтому для от состояния 1 до состояния 2 (рис.

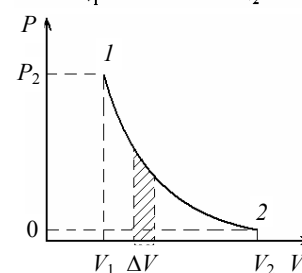
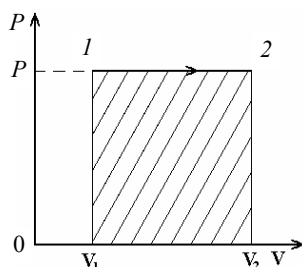


Рис. 2.3.3

условии постоянства давления. Если такое изменение объема, при котором неизменным. Из (2.3.2) следует, что положительную работу, при этом его сжатии ($\Delta V < 0$) работа, совершаемая энергия увеличивается.

работа газом не внутренняя неизменными.

механическая работа равна площади изобарой со сторонами p и $V_2 - V_1$. расширения газа вычисляется по

газа его давление изменяется по вычисления работы расширения газа 2.3.3) разобьем площадь под

Рис. 2.3.2

изотермой на небольшие участки. В пределах каждого бесконечно малого участка давление будет изменяться столь незначительно, что его можно считать постоянным. Полную работу находят суммируя все работы на бесконечно малых участках. При этом получается

$$A = \frac{m}{M} RT \ln \frac{V_2}{V_1}. \quad (2.3.3)$$

2.4 Первый закон термодинамики

Мы уже знаем, что внутреннюю энергию системы можно изменить двумя способами. Это теплообмен и совершение работы над системой. Первый закон термодинамики устанавливает количественное соотношение между изменением внутренней энергии системы ΔU , количеством подведенной к ней теплоты Q и работой внешних сил A' , действующих на систему.

Изменение внутренней энергии системы при ее переходе из одного состояния в другое равно сумме количества теплоты, подведенного к системе, и работы внешних сил, действующих на нее.

Это утверждение носит название первого закона термодинамики. Количество теплоты, поглощаемое системой, считают положительным, а выделяемое – отрицательным. Математически первый закон термодинамики записывают в виде

$$\Delta U = Q + A'. \quad (2.4.1)$$

Если система изолирована, то теплообмен с окружающими телами отсутствует и не совершается работа внешних сил. Тогда $\Delta U = U_2 - U_1 = 0$ или $U_2 = U_1$. Это означает, что внутренняя энергия замкнутой, изолированной системы сохраняется.

В термодинамике наибольший интерес представляет преобразование внутренней энергии в работу, совершаемую газом. Она отличается от работы внешних сил только знаком, т.е. $A = -A'$. С учетом этого первого закону термодинамики можно дать следующую формулировку.

Тепло, подведенное к системе, идет на изменение ее внутренней энергии, на совершение системой работы над внешними телами, т.е. $Q = \Delta U + A$.

Первый закон термодинамики – это закон сохранения энергии, примененный к тепловым процессам. Все выводы, сделанные из него, обладают высокой степенью достоверности.

При изохорном процессе газ не совершает работы, поэтому изменение его внутренней энергии происходит только посредством теплообмена с окружающими телами, т.е. $Q = \Delta U$. Если начальная температура газа равна T_1 , а конечная T_2 , то

$$\Delta U = U_2 - U_1 = \frac{i}{2} \frac{m}{M} RT_2 - \frac{i}{2} \frac{m}{M} RT_1 = \frac{i}{2} \frac{m}{M} R \Delta T. \quad (2.4.2)$$

Следовательно, количество теплоты, подведенное к газу при изохорном процессе, равно

$$Q = \frac{i}{2} \frac{m}{M} R \Delta T. \quad (2.4.3)$$

При изохорном нагревании давление газа растет вследствие увеличения средней кинетической энергии молекул. Если от газа изохорно отводится тепло ($Q < 0$), то газ охлаждается и его давление уменьшается.

При изотермическом процессе температура постоянна, поэтому внутренняя энергия газа не изменяется. Другими словами, в изотермическом процессе количество теплоты, переданное газу от нагревателя, полностью расходуется на совершение работы, т.е. $Q = A$.

При изобарном расширении газа подведенное к нему тепло расходуется на увеличение его внутренней энергии и на совершение работы газом.

Таким образом, количество теплоты, сообщаемое газу для изменения его состояния, зависит от способа перехода газа из одного состояния в другое. Количество теплоты и механическая работа являются функциями процесса. Внутренняя энергия газа является функцией состояния.

2.5 Адиабатный процесс

Термодинамическая система, не обменивающаяся с окружающими телами теплом, называется адиабатной. На практике адиабатная система – это достаточно хорошо теплоизолированная система.

Адиабатный процесс – это процесс в теплоизолированной термодинамической системе.

К адиабатным процессам относятся все быстропротекающие процессы. В этом случае теплообмен с окружающими телами не успевает произойти из-за малости промежутка времени.

Первый закон термодинамики для адиабатных процессов имеет вид

$$A = -\Delta U. \quad (2.5.1)$$

При адиабатном расширении газа $A > 0$. Следовательно

$$\Delta U = \frac{i}{2} \frac{m}{M} R \Delta T < 0. \quad (2.5.2)$$

Это означает, что $\Delta T < 0$, т.е. температура газа уменьшается по сравнению с первоначальной. Понижение температуры газа при адиабатном расширении приводит к более резкому уменьшению давления, чем при изотермическом процессе. Уравнение адиабаты имеет вид

$$PV^\gamma = \text{const}, \quad (2.5.3)$$

где γ – постоянная, зависящая от газа, но всегда существенно большая единицы. Для одноатомных газов $\gamma = 1,67$, для двухатомных $\gamma = 1,4$ и для многоатомных (три атома и более) $\gamma = 1,33$, что хорошо подтверждается экспериментом.

2.6 Тепловые двигатели

В настоящее время большинство машин и механизмов производят механическую работу за счет внутренней энергии различных видов топлива. Наибольшее значение из них имеет тепловой двигатель.

Тепловой двигатель – это устройство, преобразующее внутреннюю энергию топлива в механическую энергию.

Механическая работа в тепловом двигателе совершается при расширении рабочего вещества, которое перемещает поршень в цилиндре. Подавляющее большинство тепловых машин работает по замкнутому циклу. Но для циклической работы двигателя нужно возвращать поршень в исходное положение. Это предполагает сжатие рабочего вещества. Поэтому работа теплового двигателя состоит из периодически повторяющихся процессов расширения и сжатия рабочего вещества. Хорошо расширяются и легко сжимаются газы. Поэтому рабочим веществом в тепловом двигателе служит газ. На сжатие газа затрачивается определенная энергия. Полученная механическая работа A равна разности работы расширения газа A_p и работы его сжатия A_c , т.е.

$$A = A_p - A_c = (p_p - p_c) \Delta V. \quad (2.6.1)$$

Отсюда следует, что давление газа при расширении должно быть как можно больше давления сжатия. Но при одном и том же объеме давление газа тем меньше, чем ниже его температура. Другими словами, при циклическом процессе расширение газа должно происходить при более высокой температуре, чем сжатие. Таким образом, необходимым условием получения механической работы в циклическом тепловом двигателе является наличие нагревателя и холодильника.

Тепловой двигатель должен содержать три основных элемента: рабочее тело, нагреватель, сообщающий энергию рабочему телу, и холодильник, поглощающий часть энергии от рабочего тела.

Чтобы двигатель непрерывно совершал механическую работу, нужно чтобы термодинамический цикл был замкнутым. Для оценки эффективности замкнутого цикла используют коэффициент полезного действия.

Коэффициент полезного действия μ (кпд) – это отношение работы, совершаемой за один цикл, к количеству теплоты, полученному от нагревателя, т.е.

$$\mu = \frac{A}{Q_1}. \quad (2.6.2)$$

Поскольку часть тепла рабочее тело отдает холодильнику, работа двигателя за один цикл не превосходит величину $A = Q_1 - Q_2$. С учетом этого (2.6.2) принимает вид

$$\mu = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{Q_2}{Q_1}. \quad (2.6.3)$$

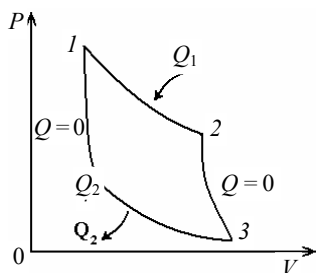


Рис. 2.6.1

Отсюда следует, что коэффициент полезного действия теплового двигателя не может быть равен или больше единицы. Он всегда меньше единицы.

Естественно поставить следующий вопрос. Каким должен быть замкнутый цикл, чтобы двигатель имел максимальный коэффициент полезного действия? Ответ на этот вопрос получил французский инженер Сади Карно. Он показал, что этот цикл должен состоять из двух изотерм и двух адиабат (рис. 2.6.1). Цикл Карно наиболее эффективный цикл. Он имеет самый большой коэффициент полезного действия. Рассмотрим термодинамические процессы этого цикла. На участке 1–2 происходит изотермическое расширение. Работа совершается в результате подведения к рабочему телу некоторого количества теплоты Q_1 от нагревателя. На участке 2–3 происходит адиабатическое расширение. При этом понижается температура газа до температуры холодильника T_2 и уменьшается его внутренняя энергия. Все изменение внутренней энергии преобразуется в механическую работу. На участке 3–4 газ изотермически сжимается, передавая холодильнику количество теплоты Q_2 . Работа сжатия равна этому количеству теплоты. Цикл завершается адиабатическим сжатием на участке 4 – 1. При этом газ нагревается до температуры T_1 . Коэффициент полезного действия цикла Карно вычисляется по формуле

Из этой формулы следует, что для повышения коэффициента полезного действия двигателя нужно повышать температуру нагревателя и понижать температуру холодильника. В качестве холодильника обычно используется атмосфера. Поэтому реально увеличить КПД двигателя можно увеличивая температуру нагревателя. У различных тепловых двигателей КПД очень сильно отличается. Так у первых паровых машин он был около 1 %, а у ракетных двигателей на жидком топливе он близок к 50 %.

$$\mu = \frac{T_1 - T_2}{T_1}. \quad (2.6.4)$$

Из этой формулы следует, что для повышения коэффициента полезного действия двигателя нужно повышать температуру нагревателя и понижать температуру холодильника. В качестве холодильника обычно используется атмосфера. Поэтому реально увеличить КПД двигателя можно увеличивая температуру нагревателя. У различных тепловых двигателей КПД очень сильно отличается. Так у первых паровых машин он был около 1 %, а у ракетных двигателей на жидком топливе он близок к 50 %.

2.7 Второй закон термодинамики

Первый закон термодинамики допускает много процессов, которые в действительности никогда не происходят. Другими словами, многие процессы, наблюдаемые в природе, необратимы. Они всегда протекают в одном направлении и без воздействия внешних тел не протекают в обратном направлении. Камень падает на землю. Его кинетическая энергия при ударе о землю переходит во внутреннюю энергию камня и грунта. Первый закон термодинамики допускает обратный процесс. Внутренняя энергия камня и почвы переходит в кинетическую энергию камня, и он поднимается на некоторую высоту. Но в действительности такого процесса никогда не происходит.

Макроскопические процессы протекают в определенном направлении. В обратном направлении они протекать не могут. Такие процессы называются необратимыми. Таким образом, падение камня – это необратимый процесс. Необратимость характерна лишь для макроскопических систем.

Другим примером необратимого процесса может служить теплообмен. Тепло самопроизвольно передается от тела с большей температурой к телу с меньшей температурой. Переход тепла от тела с меньшей температурой к телу с большей температурой никогда не наблюдается. Хотя первый закон термодинамики такой процесс допускает.

Молекулы красителя равномерно распределяются по объему воды в стакане и окрашивают воду. Никогда растворенный в воде краситель не собирается в какой-то части воды, хотя это не противоречит первому закону термодинамики. Чтобы из всех возможных, с точки зрения первого закона термодинамики, процессов выделить реально самопроизвольно протекающие вводится второй закон термодинамики. Одна из его формулировок звучит так.

В циклически действующем тепловом двигателе невозможно преобразовать все количество теплоты, полученное от нагревателя, в механическую работу.

Второй закон термодинамики определяет направление протекания процессов в макросистемах. Он является статистическим законом. Замкнутая система многих частиц самопроизвольно переходит из более упорядоченного состояния в менее упорядоченное. Это связано с тем, что число микросостояний, отвечающих неупорядоченному состоянию, гораздо больше числа микросостояний упорядоченного состояния. Таким образом, изолированная система самопроизвольно переходит из менее вероятного состояния в более вероятное.

Второй закон термодинамики так же, как и первый имеет высокую степень достоверности. Оба закона вместе образуют очень прочный фундамент термодинамики. Поэтому выводы термодинамики чрезвычайно надежны.

Слова и словосочетания

Термодинамика	Термодинамические пара-
Внутренняя энергия	метры
	Потенциальная энергия
Степени свободы	взаимодействия молекул
Одноатомный газ	Число степеней свободы
Многоатомный газ	Поступательное движение
Теплообмен	Вращательное движение
Работа газа	Количество теплоты
Адиабатный процесс	Работа расширения газа
Тепловые двигатели	Быстропротекающие про-
Циклический процесс	цессы
Коэффициент полезного дейст-	Рабочее вещество
вия	Нагреватель
Адиабатическое расширение	Холодильник
Обратимый (необратимый) про-	Изотермическое сжатие
цесс	Упорядочение

Вопросы для самопроверки

- Что называют степенями свободы молекул?
- От каких величин зависит внутренняя энергия тела?
- Чему равна внутренняя энергия идеального одноатомного газа?
- Почему газ при сжатии нагревается?
- Чему равна работа, совершаемая внешними силами при сжатии и расширении тел?
- Что называют количеством теплоты?
- Как формулируется первый закон термодинамики?
- Какой процесс называют адиабатным?
- Какие процессы называют необратимыми?
- Сформулируйте второй закон термодинамики.
- Какое устройство называют тепловым двигателем?
- Какова роль нагревателя, холодильника и рабочего тела теплового двигателя?
- Что называется коэффициентом полезного действия теплового двигателя?
- Как можно повысить коэффициент полезного действия теплового двигателя?

3 ЖИДКОСТЬ И ПАР

3.1 Парообразование. Конденсация. Испарение

Наблюдения показывают, что жидкости могут переходить в газообразное состояние. Процесс перехода вещества из жидкого состояния в парообразное называется парообразованием. Совокупность молекул, вышедших из жидкости, называют паром. При определенных условиях наблюдается обратный процесс – переход пара в жидкость. Этот процесс называется конденсацией. Парообразование с открытой поверхности жидкости называется испарением. Рассмотрим физический механизм процессов испарения и конденсации. Молекула жидкости выходит в воздух, если ее кинетическая энергия больше потенциальной энергии притяжения к другим молекулам. Испарение происходит при любой температуре. При любой температуре в жидкости есть молекулы, скорость движения которых значительно превышает

ет среднюю скорость. Их кинетическая энергия достаточна для выхода из жидкости. С увеличением температуры доля быстро движущихся молекул возрастает. Соответственно возрастает число испарившихся молекул. Так как при испарении жидкость покидают наиболее быстрые молекулы, температура жидкости уменьшается. Чтобы поддерживать температуру жидкости постоянной, нужно к жидкости подвести тепло. Количество теплоты, необходимое для испарения жидкости при постоянной температуре, пропорционально массе испарившейся жидкости

$$Q = rm. \quad (3.1.1)$$

где r – удельная теплота испарения (парообразования). Если в (3.1.1) положить $m = 1$, то $r = Q$.

Удельная теплота испарения (парообразования) – это количество теплоты, необходимое для испарения (парообразования) 1 кг жидкости при постоянной температуре.

Удельная теплота испарения зависит от рода жидкости и температуры. Это связано с тем, что для каждого вещества существует своя работа выхода молекул. Работа выхода – это работа, которую совершает молекула, чтобы преодолеть силы молекулярного притяжения. С повышением температуры расстояние между молекулами в жидкости увеличивается. Соответственно силы притяжения между молекулами уменьшаются. Следовательно, работа выхода с повышением температуры уменьшается. Поэтому удельная теплота испарения с повышением температуры уменьшается.

При конденсации пара в жидкость выделяется тепло. Количество теплоты, которое выделяется при конденсации 1 кг пара в жидкость, называется удельной теплотой конденсации. Удельная теплота конденсации и удельная теплота парообразования для данной жидкости всегда совпадают по значению. Обе эти величины в системе СИ измеряются в джоулях на килограмм (Дж/кг).

3.2 Насыщенный пар

Возьмем некоторое количество жидкости и поместим ее в сосуд и закроем его. Если температура остается неизменной, то спустя некоторое время количество жидкости уменьшится, и в дальнейшем будет оставаться неизменным. Объясняется это тем, что часть жидкости перешла в пар. Сначала число молекул, вылетающих из жидкости за одну секунду, больше числа молекул, возвращающихся в жидкость за это же время. Поэтому плотность пара над поверхностью жидкости возрастает. Это приводит к увеличению числа молекул, возвращающихся обратно в жидкость. Спустя некоторое время из жидкости вылетает столько же молекул, сколько возвращается в нее. Между паром и жидкостью устанавливается динамическое равновесие. Пар, находящийся в состоянии динамического равновесия со своей жидкостью, называется насыщенным. Число молекул в насыщенном паре имеет максимально возможное значение. Так как давление насыщенного пара пропорционально концентрации его молекул, то при данной температуре давление пара бóльшим быть не может.

Давление насыщенного пара при данной температуре – это максимальное давление, которое может иметь пар при данной температуре.

При увеличении температуры жидкости растет число молекул, выходящих из жидкости, и, соответственно, молекул, возвращающихся в жидкость. Поэтому давление насыщенного пара возрастает при увеличении температуры жидкости.

Мы знаем, что молекула испаряется с поверхности жидкости, если ее кинетическая энергия больше потенциальной энергии притяжения к другим молекулам. Потенциальная энергия взаимодействия молекул зависит как от условий, в которых находится жидкость, так и от молекулярной структуры жидкости. Давление насыщенного пара жидкости, состоящей из сильно взаимодействующих друг с другом молекул, меньше, чем давление насыщенного пара жидкости, состоящей из слабо взаимодействующих молекул.

Опыт показывает, что давление насыщенного пара зависит только от рода жидкости и от температуры, но не зависит от объема свободной от жидкости части сосуда, в котором находится пар. Независимость давления насыщенного пара от объема объясняется тем, что при изменении объема динамическое равновесие между жидкостью и паром восстанавливается. При увеличении объема усиливается процесс испарения жидкости, а при уменьшении объема преобладает процесс конденсации пара.

3.3 Ненасыщенный пар

Если объем сосуда, в котором находится жидкость, достаточно большой, то процесс испарения преобладает над процессом конденсации. Жидкость может полностью испариться, прежде чем пар достигнет состояния насыщения. Пар, не находящийся в динамическом равновесии со своей жидкостью, назы-

вается ненасыщенным. Опыт показывает, что давление и плотность ненасыщенного пара зависят от вещества, из которого состоит пар, от температуры и объема. При данной температуре давление ненасыщенного пара всегда меньше давления насыщенного пара. Это означает, что наибольшее давление при данной температуре пар оказывает в состоянии насыщения.

3.4 Фазовый переход пар–жидкость

Переход ненасыщенного пара в насыщенный, а затем в жидкость, также как и обратный переход жидкости в насыщенный и ненасыщенный пар, происходит при изменении либо температуры, либо объема.

Рассмотрим условия при которых возможен переход между жидкостью и ее паром. Пусть у нас имеется ненасыщенный пар. Опыт показывает, что он ведет себя как идеальный газ. Молекулы ненасыщенного пара слабо взаимодействуют друг с другом. Средняя потенциальная энергия их взаимодействия много меньше средней кинетической энергии:

$$|E_n| \ll \frac{3}{2}kT. \quad (3.4.1)$$

Для образования жидкости из пара средняя потенциальная энергия притяжения молекул должна превышать среднюю кинетическую энергию:

$$|E_n| \geq \frac{3}{2}kT. \quad (3.4.2)$$

Потенциальная энергия притяжения молекул зависит от их взаимного расположения. Уменьшить расстояние между молекулами можно, уменьшая объем и температуру пара. Поэтому потенциальная энергия взаимодействия молекул увеличивается при уменьшении как объема, так и температуры. С уменьшением температуры уменьшается кинетическая энергия молекул. Все вышесказанное позволяет утверждать, что перевести пар в жидкость можно двумя путями. Первый путь связан с уменьшением объема. В этом случае потенциальная энергия увеличивается, а кинетическая энергия остается постоянной. При некотором значении объема мы достигнем условия (3.4.2). Второй путь связан с уменьшением температуры. В этом случае кинетическая энергия убывает, а потенциальная энергия взаимодействия молекул остается неизменной. Ясно, что при некоторой температуре будет достигнуто условие (3.4.2).

Физический смысл условия (3.4.2) состоит в том, что переход пара в жидкость возможен лишь при температуре меньшей некоторой критической температуры

$$T < T_{кр} = \frac{2}{3} \frac{E_n}{T}. \quad (3.4.3)$$

Пар, находящийся при температуре выше критической нельзя перевести в жидкость.

Критическая температура – это максимальная температура, при которой пар превращается в жидкость.

Критическая температура зависит от потенциальной энергии взаимодействия молекул и поэтому различна для различных веществ.

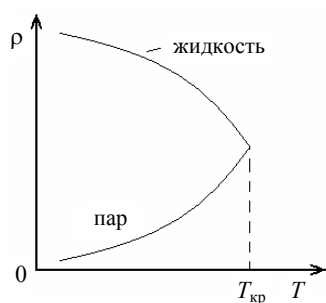


Рис. 3.4.1

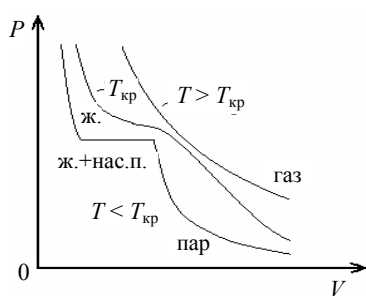


Рис. 3.4.2

К появлению критической температуры можно прийти опытным путем. При повышении температуры одновременно увеличиваются и давление пара и его плотность. Возьмем сосуд, в котором находится жидкость и ее насыщенный пар. Будем увеличивать температуру. Плотность пара будет увеличиваться, а плотность жидкости уменьшаться (рис. 3.4.1). При некоторой температуре обе кривые сходятся в одну точку. В этой точке плотности жидкости и пара становятся одинаковыми. Различие между жидкостью и ее паром исчезает. Такое состояние было названо критическим. Температура критического состояния называется критической температурой. Критическая температура у различных жидкостей различна.

Пусть в цилиндре под поршнем находится ненасыщенный пар при температуре ниже критической. При изотермическом сжатии пара возрастает концентрация частиц и увеличивается давление. Но средняя потенциальная энергия притяжения молекул еще недостаточна для объединения молекул пара и перехода его в жидкость. Дальнейшее уменьшение объема приводит к сближению молекул на столь малые расстояния, что потенциальная энергия их взаимодействия становится больше их кинетической энергии. Начинается конденсация пара, и появляются капельки жидкости. В цилиндре в динамическом равновесии находится жидкость и ее пар. При последующем сжатии жидкости и насыщенного пара увеличивается масса жидкости, а масса ее насыщенного пара уменьшается. Давление насыщенного пара при этом остается постоянным. После полной конденсации пара возможно лишь незначительное сжатие жидкости (рис. 3.4.2). Это связано с незначительной сжимаемостью жидкости.

3.5 Влажность воздуха

В результате испарения воды с поверхности многочисленных водоемов и с растительных покровов в атмосферном воздухе всегда содержится водяной пар. Пар в атмосфере редко бывает насыщенным из-за нарушения равновесия процессов испарения и конденсации. Водяные пары переносятся ветром на большие расстояния. Поэтому их конденсация обычно происходит вдали от того места где произошло испарение. При конденсации паров (дождь, снег и т.д.) выделяется большое количество теплоты. Это приводит к выравниванию климата на Земле. Количество водяного пара в воздухе существенно влияет на природные явления, на условия жизни растений и животных и трудовую деятельность человека. При одной и той же температуре содержание в воздухе водяного пара может изменяться от нуля до максимально возможного. В первой ситуации мы имеем дело с абсолютно сухим воздухом, во второй – с насыщенным паром. Содержание паров воды в воздухе характеризуют величиной, которую принято называть влажностью воздуха. Рассматривают абсолютную и относительную влажность воздуха.

Абсолютной влажностью воздуха называют величину, равную массе водяного пара в одном кубическом метре воздуха.

Абсолютную влажность воздуха в системе СИ измеряют в килограммах на метр кубический (1 кг/м^3).

Если водяной пар не насыщен, то он подчиняется уравнению Менделеева – Клапейрона. Из этого уравнения следует

$$p = \rho \frac{RT}{M}. \quad (3.5.1)$$

Мы видим, что парциальное давление водяного пара для данной температуры пропорционально плотности пара. Из определения абсолютной влажности следует, что она численно равна плотности водяного пара. Поэтому в метеорологии абсолютную влажность воздуха определяют через парциальное давление водяного пара. Парциальное давление водяного пара называют упругостью водяного пара. Упругость водяного пара в системе СИ измеряют в паскалях (1 Па).

По абсолютной влажности нельзя сказать, насколько сух или влажен воздух. Для определения степени влажности воздуха нужно знать, насколько близок к состоянию насыщения находящийся в нем пар. Поэтому вводят понятие относительной влажности.

Относительная влажность воздуха – это величина, равная отношению упругости водяного пара, находящегося в воздухе при данной температуре, к упругости насыщенного водяного пара при той же температуре.

Относительную влажность воздуха обозначают буквой φ и выражают в процентах

$$\varphi = \frac{P}{P_H} 100 \% . \quad (3.5.2)$$

В воздухе с малой относительной влажностью испарение происходит быстро. В воздухе с большой относительной влажностью испарение замедляется. С испарением связана способность человеческого организма к охлаждению. Для оптимального теплообмена человеческого организма при температуре 20...25 °С наиболее благоприятна относительная влажность около 50 %. При более высоких температурах предпочтительна более низкая влажность.

Если влажный воздух охладить, то при некоторой температуре водяной пар в нем становится насыщенным. При дальнейшем охлаждении он конденсируется, образуя росу. Температура, при которой водяной пар в воздухе становится насыщенным, называется точкой росы. При этой температуре относительная влажность воздуха равна 100 %.

3.6 Кипение жидкости

Испарение происходит со свободной поверхности жидкости при любой температуре. При определенных условиях процесс парообразования происходит и внутри жидкости.

Парообразование, происходящее одновременно с поверхности и по всему объему жидкости при определенной постоянной температуре, называется кипением.

Чтобы понять физические процессы, происходящие при кипении, и выяснить условия, при которых оно происходит, рассмотрим простой опыт. Возьмем воду в прозрачной колбе и будем ее нагревать. Мы заметим, что сначала дно колбы и стенки покрываются мелкими пузырьками. Это выделяется растворенный в воде воздух. В пузырьках содержится также насыщенный пар воды. Пузырьки воздуха всегда есть в жидкости, но при температурах, близких к комнатной, они не видны невооруженным глазом. При незначительном нагревании жидкости давление в пузырьках растет и их объем увеличивается. Сила Архимеда, действующая на пузырьки, возрастает, и они начинают подниматься вверх. Попав в верхние, еще не нагревшиеся, слои жидкости, пузырьки охлаждаются, уменьшаются в объеме и с шумом схлопываются. С течением времени вода полностью прогревается, и пузырьки уже не исчезают в верхних слоях воды. Наоборот, они увеличиваются в размерах. Количество пара в них растет непрерывно по мере приближения к поверхности воды. Наконец пузырьки достигают поверхности и лопаются. Содержащийся в них пар выбрасывается в воздух.

Кипение начинается, когда давление насыщенного пара внутри пузырьков становится равным или большим внешнего давления. Внешнее давление имеет три составляющих. Это атмосферное давление, гидростатическое давление и давление, связанное с силами поверхностного натяжения. Внутреннее давление равно сумме давления воздуха и давления насыщенного пара. Исследования показали, что основную роль играют атмосферное давление и давление насыщенного пара в пузырьках. Всплывающие пузырьки лопаются, когда давление насыщенного пара, которым они заполнены, превосходит атмосферное давление. Отсюда следует, что температура кипения жидкости зависит от давления. С повышением внешнего давления температура кипения жидкости увеличивается, а понижение внешнего давления приводит к уменьшению температуры кипения.

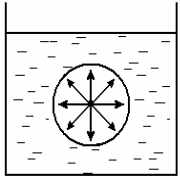
Температура кипения зависит от наличия примесей в жидкости. Например, вода, содержащая 12 % поваренной соли, кипит при атмосферном давлении при 102 °С, а вода, содержащая 40 % поваренной соли, кипит при 108 °С. Опыт показывает, что температура кипения раствора всегда выше, чем температура кипения чистого растворителя при тех же условиях.

Температура кипения в процессе кипения не меняется. Чем больше теплоты подводится к жидкости, тем больше всплывает и лопается пузырьков. Это приводит к охлаждению жидкости. Таким образом, устанавливается баланс между подводимым извне теплом и отдаваемым теплом. Пары кипящей жидкости всегда имеют температуру этой жидкости. Это означает, что при переходе жидкости в пар кинетическая энергия молекул не изменяется. Вся подводимая к жидкости теплота идет на увеличение потенциальной энергии молекул. Это приводит к изменению агрегатного состояния вещества.

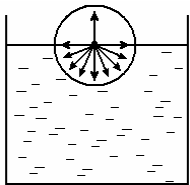
Жидкость, не содержащая газ и находящаяся в сосуде, со стенок которого удален газ, не закипает. Такую жидкость можно нагреть до температуры, более высокой, чем ее нормальная температура кипения. Если в такую жидкость поместить примеси, то она бурно вскипает. Дегазированная жидкость, нагретая до температуры, превышающей ее нормальную температуру кипения, называется перегретой жидкостью. Состояние перегретой жидкости является неустойчивым.

3.7 Поверхностное натяжение

В жидкости потенциальная энергия притяжения молекул близка к их средней кинетической энергии. Вследствие сильного притяжения молекул жидкость сохраняет объем. На границе с паром жидкость образует свободную поверхность. Молекулы на поверхности жидкости находятся в иных условиях по сравнению с молекулами внутри жидкости. Внутри жидкости результирующая сила притяжения, действующая на молекулу со стороны других молекул, равна нулю (рис. 3.7.1, а). На этом рисунке изображена сфера, в центре которой помещена молекула. Радиус сферы составляет несколько молекулярных диаметров. Так как концентрация молекул в жидкости одинакова, в верхней и нижней полусферах находится в среднем одинаковое количество молекул. Поэтому силы притяжения данной молекулы молекулами из нижней и верхней полусферы взаимно уравновешиваются.



а)



б)

Рис. 3.7.1

Если молекула находится на поверхности жидкости, то концентрация молекул в верхней полусфере существенно меньше концентрации молекул в нижней полусфере. Сила притяжения со стороны молекул в нижней полусфере существенно больше силы притяжения со стороны молекул пара (рис. 3.7.1, б). Поэтому молекулы, находящиеся на поверхности, под действием результирующей силы притяжения притягиваются внутрь жидкости.

На поверхности жидкости остается такое число молекул, при котором площадь поверхности жидкости оказывается минимальной при данном ее объеме. Поэтому жидкость принимает сферическую форму, имеющую минимальную поверхность среди всех тел с тем же объемом. При свободном падении, в состоянии невесомости, капли дождя практически имеют форму шара. В космическом корабле в отсутствие силы тяжести даже достаточно большая масса жидкости принимает шарообразную форму.

Молекулы поверхностного слоя оказывают молекулярное давление на жидкость. Этот эффект принято называть поверхностным натяжением.

Поверхностное натяжение – это явление молекулярного давления на жидкость, вызванного притяжением молекул поверхностного слоя к молекулам внутри жидкости.

Установлено опытным путем, что сила поверхностного натяжения пропорциональна длине l линии, находящейся в поверхностном слое жидкости

$$F_{\text{н}} = \alpha l, \quad (3.7.1)$$

где α – коэффициент поверхностного натяжения. Он численно равен силе поверхностного натяжения, с которой поверхностный слой жидкости действует на произвольную линию единичной длины, находящуюся в этом слое. Коэффициент поверхностного натяжения в системе СИ измеряют в ньютонах на метр (1 Н/м). Величина коэффициента поверхностного натяжения зависит от рода жидкости и от температуры. С ростом температуры поверхностное натяжение уменьшается. При критической для данной жидкости температуре ее поверхностное натяжение обращается в нуль. Примеси уменьшают поверхностное натяжение. Вещества, ослабляющие поверхностное натяжение жидкости, называются поверхностно активными для данной жидкости. Для воды поверхностно активными являются спирт, мыло, стиральные порошки.

Молекулы, находящиеся в поверхностном слое жидкости, обладают дополнительной потенциальной энергией по сравнению с молекулами, находящимися внутри жидкости. Энергия поверхностного слоя – это та часть внутренней энергии жидкости, которую можно превратить в механическую работу в изотермическом процессе. За счет совершается работа при уменьшении слоя.

Рассмотрим опыт, схема боковым сторонам п-образной без трения легкая перекладина. так чтобы на контуре 12341 Перекладина первоначально под действием сил поверхностного и займет положение 1' – 4'. Мыльная

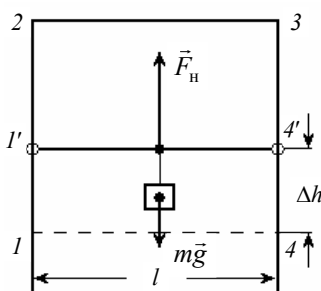


Рис. 3.7.2

энергии поверхностного слоя площади поверхности поверхностного

которого приведена на рис. 3.7.2. По проволочной рамке может скользить Опустим рамку в мыльный раствор, образовалась мыльная пленка. находится в положении 1 – 4, а затем натяжения поднимется на величину Δh пленка на контуре имеет две по-

верхности. Поэтому сила поверхностного натяжения, действующая на перекладину, равна $F_{\text{н}} = 2\alpha l$. В положении 1' – 4' сила поверхностного натяжения уравновешивается силой тяжести грузика. Зная силу поверхностного натяжения и расстояние Δh , можно вычислить работу

$$\Delta A = F_H \Delta h = 2\alpha l \Delta h = \alpha \Delta S, \quad (3.7.2)$$

где ΔS – общее уменьшение площади поверхностного слоя жидкости.

По закону сохранения энергии работа ΔA , совершенная силами поверхностного натяжения, равна изменению поверхностного слоя жидкости ΔE . Следовательно

$$\Delta E = \alpha \Delta S. \quad (3.7.3)$$

Если $\Delta S = 1$, то $\alpha = \Delta E$. Коэффициент поверхностного натяжения численно равен изменению энергии поверхностного слоя жидкости при сокращении поверхности жидкости на единицу.

3.8 Смачивание

В зависимости от характера взаимодействия между молекулами жидкости и твердого тела на границе их соприкосновения наблюдают явления смачивания и несмачивания. Так, например, на стекле капля растекается, а на поверхности парафина приобретает форму сплошного шара. Зависимость формы капли от материала подложки объясняется различием сил взаимодействия молекул жидкости F_{11} с молекулами твердого тела на границе раздела двух сред F_{12} . Если $F_{21} > F_{11}$, то жидкость смачивает твердое тело. Если жидкость находится внутри сосуда, образуется вогнутый мениск (рис. 3.8.1, а). Если жидкость находится на горизонтальной поверхности твердого тела (рис. 3.8.1, б), то происходит ее растекание по этой поверхности. Угол θ между поверхностью твердого тела и касательной, проведенной к поверхности жидкости в точке ее соприкосновения с твердым телом, называют краевым углом. При смачивании краевой угол является острым, т.е. $0 \leq \theta < \frac{\pi}{2}$. Случай, когда $\theta = 0$ называется полным смачиванием.

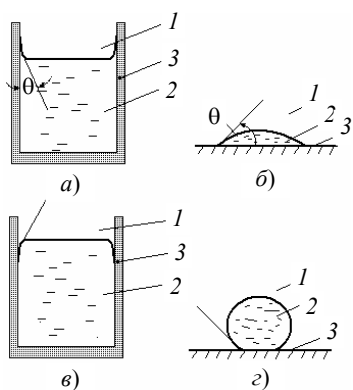


Рис. 3.8.1

Если $F_{21} < F_{11}$, то жидкость не смачивает твердое тело. Жидкость, находящаяся в сосуде, образует выпуклый мениск (рис. 3.8.1, в). Жидкость на горизонтальной поверхности имеет тем меньшую площадь соприкосновения, чем больше несмачивание. Краевой угол при несмачивании тупой, т.е. $\frac{\pi}{2} < \theta \leq \pi$. Случай $\theta = \pi$ соответствует полному несмачиванию.

Одно и то же твердое тело может смачиваться одними жидкостями, а другими – не смачиваться. Например, стекло смачивается водой, а ртуть стекло не смачивает.

3.9 Капиллярные явления

С явлениями смачивания и несмачивания связано явление капиллярности. Капилляр – это трубка очень малого диаметра. В достаточно широких сосудах короткодействующие силы притяжения между молекулами жидкости и твердого тела удерживают в форме мениска небольшое количество жидкости в сосуде. В капиллярах масса жидкости незначительна. Поэтому различие в силах притяжения между молекулами жидкости и твердого тела оказывает заметное влияние на жидкость.

Капиллярность – это явление подъема или опускания жидкости в капиллярах.

При смачивании жидкость в капилляре поднимается относительно уровня жидкости в сосуде. При несмачивании, наоборот, жидкость в капилляре опускается относительно уровня жидкости в сосуде (рис. 3.9.1).

Если жидкость смачивает капилляр, то силы притяжения между молекулами жидкости и твердого тела превосходят силы взаимодействия между молекулами жидкости. Жидкость втягивается внутрь капилляра. Подъем жидкости продолжается до тех пор, пока молекулярные силы, действующие вверх, уравновесятся силой тяжести столба жидкости высотой h . Определим эту высоту. Вес столба жидкости P по модулю равен

$$P = \rho g V = \rho g \pi r^2 h. \quad (3.9.1)$$

где ρ – плотность жидкости, V – объем столба жидкости, r – радиус

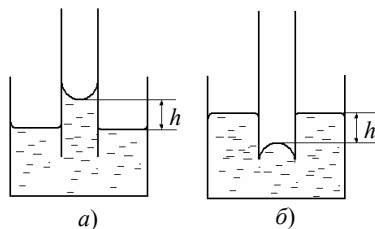


Рис. 3.9.1

капилляра, $g = 9,81 \text{ м/с}^2$. Сила поверхностного натяжения действует по длине окружности мениска, т.е. $l = 2\pi r$. Поэтому модуль силы поверхностного натяжения равен

$$F = 2\pi r\alpha . \quad (3.9.2)$$

Приравнивая правые части (3.9.1) и (3.9.2) находим для высоты поднятия жидкости

$$h = \frac{2\alpha}{\rho g r} . \quad (3.9.3)$$

Из этой формулы следует, что высота поднятия жидкости в капилляре обратно пропорциональна радиусу капилляра. С помощью этой формулы, зная плотность жидкости и радиус капилляра и измерив высоту поднятия жидкости, можно вычислить коэффициент поверхностного натяжения.

Если жидкость не смачивает капилляр, то силы притяжения между молекулами жидкости превосходят силы притяжения между молекулами твердого тела и жидкости. Жидкость в капилляре опускается (рис. 3.9.1, б) на величину h . Значение h находится по формуле (3.9.3).

Слова и словосочетания

Парообразование	Переходить в газообразное состояние
Конденсация	Открытая поверхность жидкости
Испарение	Удельная теплота испарения
Работа выхода	(парообразования)
Насыщенный (ненасыщенный) пар	Давление насыщенного пара
	Динамическое равновесие
Критическая температура	Критическое состояние
Влажность воздуха	Абсолютная влажность
Точка росы	Относительная влажность
Кипение жидкости	Перегретая жидкость
Поверхностное натяжение	Сила поверхностного натяжения
Поверхностный слой	Коэффициент поверхностного натяжения
Смачивание	Краевой угол
Несмачивание	Граница раздела сред
Мениск	Капиллярность
Капилляр	

Вопросы для самопроверки

- Что называют насыщенным паром?
- Почему температура кипения возрастает с увеличением давления?
- Что называют критической температурой?
- Дайте определения абсолютной и относительной влажности воздуха.
- Что называют точкой росы?
- Чем отличается состояние молекулы у поверхности жидкости от состояния молекулы внутри жидкости?
- Что называется коэффициентом поверхностного натяжения? От чего он зависит?
- В чем состоит явление несмачивания?
- Каковы причины капиллярных явлений?

4 ТВЕРДОЕ ТЕЛО

4.1 Кристаллические и аморфные твердые тела

Твердые тела делятся на кристаллические и аморфные. Как в кристаллических, так и в аморфных твердых телах молекулы колеблются около временных положений равновесия. Лишь очень незначительная часть молекул в твердых телах движется поступательно. Об этом свидетельствует явление диффузии, скорость которой чрезвычайно мала. В аморфных телах молекулы находятся около положе-

ний временного равновесия заметно меньше, чем в кристаллических телах. Основное отличие аморфных и кристаллических тел состоит в их внутренней структуре. Кристаллические твердые тела характеризуются наличием кристаллической решетки. Под кристаллической решеткой понимают упорядоченное и периодически повторяющееся в пространстве расположение молекул, атомов или ионов твердого тела. Частицы кристалла колеблются около узлов (временных положений равновесия) решетки. Если через произвольный узел провести прямую, то вдоль этой прямой на равном расстоянии будут встречаться другие узлы решетки. Это означает, что структура повторяется по всему объему кристаллического тела. Этот вид упорядоченности твердого тела называется дальним порядком. Существование дальнего порядка в кристаллических телах подтверждается рентгенографическими исследованиями. В аморфных телах нет дальнего порядка, что сближает их с жидкостями.

Для кристаллической решетки характерно существование такого элемента ее структуры, многократным повторением которого в пространстве можно построить всю кристаллическую решетку. Этот элемент решетки называют элементарной ячейкой. Для описания строения любого кристалла достаточно изучить строение его элементарной ячейки.

Кристаллические твердые тела, представляющие собой один кристалл, называют монокристаллами. Их физические свойства различны по различным направлениям внутри кристалла.

Анизотропия – это зависимость физических свойств вещества от направления.

Физические свойства аморфных тел по всем направлениям одинаковы. Аморфные тела изотропны.

Изотропия – это независимость физических свойств вещества от направления.

При низких температурах свойства аморфных тел более близки к твердым телам, а при высоких – к жидкостям.

На практике часто встречаются тела, представляющие собой множество мелких сросшихся между собой монокристаллов. Такие тела называются поликристаллическими. Кристаллические решетки составляющих их монокристаллов ориентированы в пространстве хаотически. Поэтому на достаточно больших расстояниях физические свойства поликристаллических тел не зависят от направления. Поликристаллические тела изотропны.

Некоторые вещества имеют одинаковый химический состав, но различные кристаллические решетки. Их физические свойства могут различаться очень значительно. Примером могут служить алмаз, графит и фуллерен. Это три разновидности углерода, имеющие разную кристаллическую структуру.

Полиморфизм – существование различных кристаллических структур у одного и того же вещества.

4.2 Плавление и отвердевание кристаллических тел

Плавлением называют процесс перехода вещества из твердого состояния в жидкое. Переход вещества из жидкого состояния в твердое называется отвердеванием или кристаллизацией. Опыты показывают, что кристаллические тела плавятся и отвердевают при определенной для каждого вещества температуре. Эту температуру называют температурой плавления. На рис. 4.2.1 приведен график зависимости температуры твердого тела от времени нагрева. На участке

AB идет нагрев твердого тела. В точке *B* начинается плавление. На участке плавления *BC* одновременно сосуществуют твердое тело и жидкость. В точке *C* процесс плавления заканчивается. Далее на участке *CD* идет нагрев жидкости.

На участке *BC* происходит разрушение кристаллической решетки твердого тела и увеличение потенциальной энергии молекул. На это расходуется вся подводимая теплота. Кинетическая энергия молекул при плавлении не меняется. Чем больше масса тела, тем больше теплоты требуется, чтобы его расплавить.

Количество теплоты, необходимое для плавления 1 кг вещества, называется удельной теплотой плавления.

Удельная теплота плавления обозначается буквой λ и измеряется в джоулях на килограмм (Дж/кг).

Чтобы расплавить массу m , потребуется количество теплоты

$$Q = \lambda m. \quad (4.2.1)$$

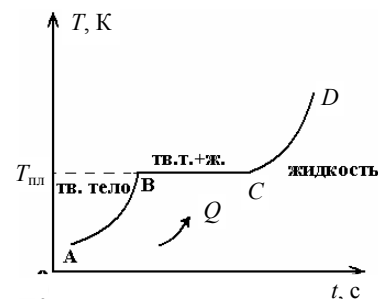


Рис. 4.2.1

Процесс отвердевания жидкости идет в обратном порядке. На участке кристаллизации формируется кристаллическая решетка и выделяется тепло. Это тепло называется теплотой кристаллизации. Температура перехода

жидкости в твердое тело называется температурой кристаллизации. Температура и теплота кристаллизации в точности равны температуре и теплоте плавления. Опыт показывает, что все эти величины зависят от давления.

Слова и словосочетания

Твердое тело	Кристаллические тела Аморфные тела
Колебательное движение	Колебания около временных положений равновесия Узлы кристаллической решетки
Кристаллическая решетка	Изотропия Анизотропия
Элементарная ячейка	Полиморфизм
Монокристалл	Удельная теплота плавления
Поликристалл	Разрушение кристаллической решетки
Плавление	
Отвердевание	Формирование кристаллической решетки
Кристаллизация	

Вопросы для самопроверки

Чем отличаются кристаллические тела от аморфных?

Что такое анизотропия?

Приведите примеры монокристаллических, поликристаллических и аморфных тел.

Что называют узлом кристаллической решетки?

Какая величина называется удельной теплотой плавления?

5 ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ТЕКСТЫ

5.1 На лед или под лед?

Желая нагреть воду, мы помещаем сосуд с водой над пламенем, а не сбоку от него. И поступаем вполне правильно, так как воздух, нагреваемый пламенем, становится более легким, вытесняется со всех сторон *вверх* и обтекает наш сосуд.

Следовательно, помещая нагреваемое тело над пламенем, мы используем теплоту источника самым выгодным образом.

Но как поступить, если мы хотим, напротив, *охладить* какое-либо тело с помощью льда? Многие, по привычке, помещают тело *над* льдом – ставят, например, кувшин молока *поверх* льда. Это нецелесообразно: ведь воздух *над* льдом, охладившись, *опускается* вниз и заменяется окружающим теплым воздухом. Отсюда практический вывод: если хотите остудить напиток или кушанье, помещайте его *не на лед, а под лед*.

Поясним подробнее. Если поставить сосуд с водой на лед, то охладится лишь самый нижний слой жидкости, остальная же часть будет окружена неохлажденным воздухом. Напротив, если положить кусок льда *поверх* крышки сосуда, то охлаждение его содержимого пойдет быстрее. Охлажденные верхние слои жидкости будут опускаться, заменяясь теплой жидкостью, поднимающейся снизу, пока не охладится вся жидкость в сосуде. С другой стороны, охлажденный воздух вокруг льда также будет опускаться вниз и окружит собой сосуд.

5.2 Почему дует от закрытого окна?

Часто дует от окна, которое закрыто совершенно плотно и не имеет ни малейшей щели. Это кажется странным. Между тем здесь нет ничего удивительного.

Воздух комнаты почти никогда не находится в покое; в нем существуют невидимые для глаза течения, порождаемые нагреванием и охлаждением воздуха. От нагревания воздух разрежается и, следовательно, становится легче; от охлаждения, напротив, уплотняется, становится тяжелее. Легкий нагретый

воздух от батареи центрального отопления или теплой печи вытесняется холодным воздухом вверх, к потолку, а воздух охлажденный, тяжелый, возле окон или холодных стен, стекает вниз, к полу.

Эти течения в комнате легко обнаружить с помощью детского воздушного шара, если подвязать к нему небольшой груз, чтобы шар не упирался в потолок, а свободно парил в воздухе. Выпущенный близ нагретой печи, такой шар путешествует по комнате, увлекаемый невидимыми воздушными течениями: от печи под потолком к окну, там опускается к полу и возвращается к печке, чтобы вновь путешествовать по комнате.

Вот почему зимой мы чувствуем, как дует от окна, особенно у ног, хотя рама как плотно закрыта, что наружный воздух не может проходить сквозь щели.

5.3 Таинственная вертушка

Из тонкой папиросной бумаги вырежьте прямоугольничек. Перегните его по средним линиям и снова расправьте: вы будете знать, где центр тяжести вашей фигуры. Положите теперь бумажку на острие торчащей иглы так, чтобы игла подпирала ее как раз в этой точке.

Бумажка останется в равновесии: она подперта в центре тяжести. Но от малейшего дуновения она начнет вращаться на острие.

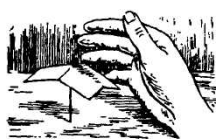


Рис. 1 Почему бумажка вертится?

Пока приборчик не обнаруживает ничего таинственного. Но приблизьте к нему руку, как показано на рис. 1. Приближайте осторожно, чтобы бумажка не была сметена током воздуха. Вы увидите странную вещь: бумажка начнет вращаться, сначала медленно, потом все быстрее. Отодвиньте руку – вращение прекратится. Приблизьте – опять начнется.

Это загадочное вращение одно время – в семидесятых годах XIX века – давало многим повод думать, что тело наше обладает какими-то сверхъестественными свойствами. Любители мистического находили в этом опыте подтверждение своим туманным учениям об исходящей из человеческого тела таинственной силе. Между тем причина вполне естественна и очень проста: воздух, нагретый снизу вашей рукой, поднимается вверх и, напирая на бумажку, заставляет ее вращаться, подобно всем известной спиральной «змейке» над лампой, потому что, перегибая бумажку, вы придали ее частям легкий уклон.

Внимательный наблюдатель может заметить, что описанная вертушка вращается в определенном направлении – от запястья, вдоль ладони, к пальцам. Это можно объяснить разницей температур названных частей руки: концы пальцев всегда холоднее, нежели ладонь; поэтому близ ладони образуется более сильный восходящий ток воздуха, который и ударяет в бумажку сильнее, чем ток, порождаемый теплотой пальцев.

5.4 Греет ли шуба?

Что сказали бы вы, если бы вас стали уверять, будто шуба несколько не греет? Вы подумали бы, конечно, что с вами шутят. А если бы вам стали доказывать это утверждение на ряде опытов? Проведите, например, такой опыт. Заметьте, сколько показывает термометр, и закутайте его в шубу. Через несколько часов выньте.

Вы убедитесь, что он не нагрелся даже и на четверть градуса: сколько показывал раньше, столько показывает и теперь. Вот и доказательство, что шуба не греет. Вы могли бы заподозрить, что шубы даже холодят. Возьмите два пузыря со льдом; один закутайте в шубу, другой оставьте в комнате незакрытым. Когда лед во втором пузыре растает, разверните шубу: вы увидите, что здесь он почти и не начал таять. Значит, шуба не только не согрела льда, но как будто даже охладила его, замедляя таяние!

Что можно возразить? Как опровергнуть эти доводы? Никак. Шубы действительно не греют, если под словом «греть» разуметь *сообщение теплоты*. Лампа греет, печка греет, человеческое тело греет, потому что все эти предметы являются источниками теплоты. Но шуба в этом смысле слова несколько не греет. Она *своего тепла не дает, а только мешает теплоте нашего тела уходить от него*. Вот почему теплокровное животное, тело которого само является источником тепла, будет чувствовать себя в шубе теплее, чем без нее. Но термометр не порождает собственного тепла, и его температура не изменится от того, что мы закутаем его в шубу. Лед, обернутый в шубу, дольше сохраняет свою низкую температуру, потому что шуба – весьма плохой проводник теплоты – замедляет доступ к нему тепла извне, от комнатного воздуха.

В таком же смысле, как шуба, снег греет землю; будучи, подобно всем порошкообразным телам, плохим проводником тепла, он мешает теплу уходить из покрытой им почвы. В почве, защищенной слоем снега, термометр показывает нередко градусов на десять больше, чем в почве, не покрытой снегом.

Итак, на вопрос, греет ли нас шуба?, надо ответить, что шуба только помогает нам греть самих себя. Вернее было бы говорить, что мы греем шубу, а не она нас.

5.5 Какое время года у нас под ногами?

Когда на поверхности земли лето, какое время года на глубине, например, трех метров под ее поверхностью? Вы думаете, что и там лето? Ошибаетесь! Времена года на поверхности земли и в почве вовсе не одни и те же, как можно подумать. Почва чрезвычайно плохо проводит теплоту. В Петербурге водопроводные трубы на глубине 2 м не замерзают в самые суровые морозы. Колебания температуры, происходящие на поверхности земли, распространяются вглубь почвы очень медленно и достигают разных слоев ее с большим опозданием. Непосредственные измерения, например, в Слуцке (Ленинградской области) показали, что на глубину трех метров самый теплый момент года приходит с опозданием в 76 дней, а самый холодный – с опозданием в 108 дней. Это значит, что если самый жаркий день над землей был, скажем 25 июля, то на глубине трех метров он наступит лишь 9 октября! Если самый холодный день был 15 января, то на указанной глубине он наступит в мае! Для более глубоких слоев почвы опоздания будут еще значительнее.

С углублением в почву температурные колебания не только опаздывают, но и ослабевают, а на некоторой глубине затухают совершенно: круглый год, в течение целых столетий, неизменно стоит там одна и та же постоянная температура, именно – средняя годовая температура данного места. В погребах Парижской обсерватории, на глубине 28 м, два столетия хранится термометр, помещенный сюда еще Лавуазье, и за двести лет он даже не дрогнул, неизменно показывая одну и ту же температуру (+11,7° по Цельсию).

Итак, в почве, которую мы попираем ногами, никогда не бывает того же времени года, какое стоит на ее поверхности. Когда над почвой зима, на глубине трех метров еще осень, – правда, не та осень, которая была раньше, на поверхности земли, а с более умеренным понижением температуры; когда же над землей лето, в глубину доходят слабые отголоски зимних морозов.

Это важно иметь в виду всякий раз, когда заходит речь об условиях жизни подземных животных (например, личинок майского жука) и подземных частей растений. Мы не должны удивляться, например, тому, что в корнях наших деревьев размножение клеточек совершается именно в холодную половину года и что деятельность так называемой камбиальной ткани замирает почти на весь теплый сезон, – как раз обратно, чем в стволе, над землей.

5.6 Бумажная кастрюля

Взгляните на рис. 2: яйцо варится в воде, налитой в бумажный колпак! «Но ведь бумага сейчас загорится, и вода зальет лампу», – скажете вы. Попробуйте же сделать опыт, взяв для него плотную пергаментную бумагу и надежно прикрепив ее к проволоке. Вы убедитесь, что бумага нисколько не пострадает от огня. Причина в том, что вода может быть нагрета в открытом сосуде только до температуры кипения, т.е. до 100°; поэтому нагреваемая вода, обладающая к тому же большой теплоемкостью, поглощая избыток теплоты бумаги, не дает ей нагреться заметно выше 100°, т.е. настолько, чтобы она могла воспламениться. (Практичнее будет пользоваться небольшой бумажной коробкой в форме, изображенной на рис. 3). Бумага не загорается, если даже пламя лижет ее. К тому же роду явлений относится и печальный опыт, который невольно проделывают рассеянные люди, ставящие самовар без воды: самовар распаивается. Причина понятна: припой сравнительно легкоплавок, и только тесное соседство воды спасает его от опасного повышения температуры. Нельзя также нагревать запаянные кастрюли без воды. В старых пулеметах Максима нагревание воды предохраняло оружие от расплавления.



Рис. 2

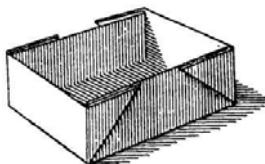


Рис. 3

Вы можете далее расплавить, например, свинцовую пломбу в коробочке, сделанной из игральной карты. Надо только подвергать действию пламени именно то место бумаги, которое непосредственно соприкасается со свинцом: металл, как сравнительно хороший проводник тепла, быстро отнимает от бумаги тепло, не давая ей нагреться заметно выше температура плавления, т.е. 335° (для свинца); такая температура недостаточна для воспламенения бумаги.

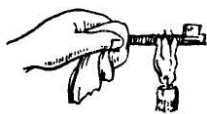


Рис. 4



Рис. 5 Несгораемая бумага

Хорошо удается также следующий опыт (рис. 4). Толстый гвоздь или железный (еще лучше медный) прут обмотайте *плотно* узкой бумажной полоской, наподобие винта. Затем внесите прут с бумажной полоской в пламя. Огонь будет лизать бумагу, закоптит ее, но не сожжет, пока прут не раскалится. Разгадка опыта в хорошей теплопроводности металла; со стеклянной палочкой подобный опыт не удался бы. Рисунок 5 изображает сходный опыт с «несгораемой» ниткой, *туго* намотанной на ключ.

5.7 Почему лед скользкий?

На гладко натертом полу легче поскользнуться, нежели на обыкновенном. Казалось бы, то же самое должно происходить на льду, т.е. *гладкий* лед должен быть более скользок, нежели лед бугорчатый, шероховатый.

Но если вам случалось везти нагруженные ручные санки через неровную, бугристую ледяную поверхность, вы могли убедиться, что, вопреки ожиданиям, сани проскальзывали по такой поверхности заметно легче, чем по гладкой. Шероховатый лед более скользок, чем зеркально гладкий! Это объясняется тем, что скользкость льда зависит главным образом не от гладкости, а от совершенно особой причины: от того, что температура плавления льда понижается при увеличении давления.

Разберем, что происходит, когда мы катаемся в санях или на коньках. Стоя на коньках, мы опираемся на очень маленькую площадь, всего в несколько квадратных миллиметров. И на эту небольшую площадь целиком давит вес нашего тела. Если вы вспомните сказанное в главе второй о давлении, то поймете, что конькобежец давит на лед со значительной силой. Под большим давлением лед тает при пониженной температуре; если, например, лед имеет температуру -5° , а давление коньков понизило точку плавления льда, попираемого коньками, более чем на 5° , то эти части льда будут таять.

Что же получается? Теперь между полозьями коньков и льдом находится тонкий слой воды, – не удивительно, что конькобежец скользит. И как только он переместит ноги в другое место, там произойдет то же самое. Всюду под ногами конькобежца лед превращается в тонкий слой воды.

Таковыми свойствами из всех существующих тел обладает только лед; один советский физик назвал его «единственным скользким телом в природе». Прочие тела гладки, но не скользки.

Теперь мы можем вернуться к вопросу о том, гладкий или шероховатый лед более скользок. Мы знаем, что один и тот же груз давит тем сильнее, чем на меньшую площадь он опирается. В каком же случае человек оказывает на опору большее давление: когда он стоит на зеркально гладком или на шероховатом льду? Ясно, что во втором случае: ведь здесь, он опирается лишь на немногие выступы и бугорки шероховатой поверхности. А чем больше давление на лед, тем обильнее плавление и, следовательно, лед тем более скользок (если только полоз достаточно широк; для узкого полоза коньков, врезающегося в бугорки, это неприменимо – энергия движения расходуется здесь на срезывание бугорков).

Понижением точки таяния льда под значительным давлением объясняется и множество других явлений обыденной жизни. Благодаря этой особенности льда отдельные куски его смерзаются вместе, если их сильно сдавливать. Мальчик, сжимая в руках комья снега при игре в снежки, бессознательно пользуется именно этим свойством ледяных крупинки (снежинок) смерзаться под усиленным давлением, понижающим температуру их таяния. Катая снежный ком для «снежной бабы», мы опять-таки пользуемся указанной особенностью льда: снежинки в местах соприкосновения, в нижней части кома, смерзаются под тяжестью надавливающей на них массы. Вы понимаете теперь, конечно, почему в сильные морозы снег образует рассыпающиеся снежки, а «баба» плохо лепится. Под давлением ног прохожих снег на тротуарах постепенно уплотняется в лед: снежинки смерзаются в сплошной пласт.

5.8 Задача о ледяных сосульках

Случалось ли вам задумываться над тем, как образуются ледяные сосульки, которые мы часто видим свешивающимися с крыш?

В какую погоду образовались сосульки: в оттепель или в мороз? Если в оттепель, то, как могла замерзнуть вода при температуре выше нуля? Если в мороз, то откуда могла взяться вода на крыше?

Вы видите, что задача не так проста, как кажется сначала. Чтобы могли образоваться ледяные сосульки, нужно в одно и то же время иметь *две температуры*: для таяния – выше нуля и для замерзания – ниже нуля.

На самом деле так и есть: снег на склоне крыши тает, потому что солнечные лучи нагревают его до температуры *выше* нуля, а стекающие капли воды у края крыши замерзают, потому что здесь температура *ниже* нуля.

(Конечно, мы говорим не о том случае образования сосулек, который обусловлен теплотой отапливаемого под крышей помещения.)



Рис. 6 Солнечные лучи греют наклонную крышу сильнее, чем горизонтальную поверхность земли

Представьте такую картину. Ясный день; мороз всего в один-два градуса. Солнце заливает все своими лучами; однако же эти косые лучи не нагревают землю настолько, чтобы снег мог таять. Но на склон крыши, обращенный к Солнцу, лучи падают *не полого, как на землю, а круче, под углом, более близким к прямому*. Известно, что освещение и нагревание лучами тем больше, чем больший угол составляют лучи с плоскостью, на которую они падают. (Действие лучей пропорционально синусу этого угла; для случая, изображенного на рис. 6, снег на крыше получает тепла в 2,5 раза больше, нежели равная площадь снега на горизонтальной поверхности, потому что синус 60° больше синуса 20° в 2,5 раза.) Вот почему скат крыши нагревается сильнее и снег на нем может таять. Оттаявшая вода стекает и каплями свисает с края крыши. Но под крышей температура *ниже* нуля, и капля, охлаждаемая к тому же испарением, замерзает. На замерзшую каплю натекает следующая, также замерзающая; затем третья капля, и т. д.; постепенно образуется маленький ледяной бугорок. В другой раз при такой же погоде эти ледяные наплывы еще удлиняются, и в результате образуются сосульки, вырастающие наподобие известковых сталактитов в подземных пещерах. Так возникают сосульки на крышах сараев и вообще неотапливаемых помещений.

Та же причина вызывает на наших глазах и более грандиозные явления: ведь различие в климатических поясах и временах года обусловлено в значительной степени изменением угла падения солнечных лучей. Солнце от нас зимой почти на таком же расстоянии, как и летом; оно одинаково удалено от полюсов и экватора (различия в расстоянии настолько ничтожны, что не имеют значения). Но наклон солнечных лучей к поверхности Земли близ экватора больше, чем у полюсов; летом этот угол больше, чем зимой. Это вызывает заметные различия в температуре дня и, следовательно, в жизни всей природы.

5.9 Безнаказанное хищение

На линии Петербург – Москва каждую зиму пропадает совершенно бесследно несколько сотен метров дорогой телефонной и телеграфной проволоки, и никто этим не обеспокоен, хотя виновник исчезновения хорошо известен. Конечно, и вы знаете его: похититель этот – мороз. То, что мы говорили о рельсах, вполне применимо и к проводам, с той лишь разницей, что медная телефонная проволока удлиняется от теплоты в 1,5 раза больше, чем сталь. Но здесь уже нет никаких пустых промежутков, и потому мы без всяких оговорок можем утверждать, что *телефонная линия Петербург – Москва зимой метров на 500 короче, нежели летом*. Мороз безнаказанно каждую зиму похищает чуть не полкиломет-

ра проволоки, не внося, впрочем, никакого расстройств в работу телефона или телеграфа и аккуратно возвращая похищенное при наступлении теплого времени.

Но, когда такое сжатие от холода происходит не с проводами, а с мостами, последствия бывают подчас весьма ощутимы. Вот что сообщали в декабре 1927 г. газеты о подобном случае:

«Необычайные для Франции морозы, стоящие в течение нескольких дней, послужили причиной серьезного повреждения моста через Сену, в самом центре Парижа. Железный остов моста от мороза сжался, отчего вздулись и затем рассыпались кубики на покрывающей его мостовой. Проезд по мосту временно закрыт».

5.10 Высота Эйфелевой башни

Если теперь нас спросят, какова высота Эйфелевой башни, то прежде чем ответить: «300 метров», вы, вероятно, осведомитесь:— В какую погоду – холодную или теплую? Ведь высота столь огромного железного сооружения не может быть одинакова при всякой температуре. Мы знаем, что железный стержень длиной 300 м удлинится на 3 мм при нагревании его на один градус. Приблизительно на столько же должна возрасти и высота Эйфелевой башни при повышении температуры на 1 °С. В теплую солнечную погоду железный материал башни может нагреться в Париже градусов до +40, между тем как в холодный, дождливый день температура его падает до +10°, а зимой до 0°, даже до – 10° (большие морозы в Париже редки). Как видим, колебания температуры доходят до 40 и более градусов. Значит, высота Эйфелевой башни может колебаться на $3 \times 40 = 120$ мм, или на 12 см (больше длины этой строки).

Прямые измерения обнаружили даже, что Эйфелева башня еще чувствительнее к колебаниям температуры, нежели воздух: она нагревается и охлаждается быстрее и раньше реагирует на внезапное появление солнца в облачный день. Изменения высоты Эйфелевой башни были обнаружены с помощью проволоки из особой никелевой стали, обладающей способностью почти не изменять своей длины при колебаниях температуры. Замечательный сплав этот носит название «инвар» (от латинского «неизменный»).

Итак, в жаркий день вершина Эйфелевой башни поднимается выше, чем в холодный, на кусочек, равный длине этой строки.

5.11 От чайного стакана к водомерной трубке

Прежде чем разлить чай по стаканам, опытная хозяйка, заботясь об их целостности, не забывает положить в них ложки, особенно если они серебряные. Житейский опыт выработал вполне правильный прием. На чем он основан?

Уясним себе прежде, почему вообще стаканы трескаются от горячей воды.

Причина – неравномерное расширение стекла. Горячая вода, налитая в стакан, прогревает его стенки не сразу: сначала нагревается внутренний слой стенок, в то время как наружный не успевает еще нагреться. Нагретый внутренний слой тотчас же расширяется, наружный же остается пока неизменным и испытывает, следовательно, сильный напор изнутри. Происходит разрыв – стекло лопается.

Не думайте, что вы защитите себя от таких «сюрпризов», если обзаведетесь толстыми стаканами. Толстые стаканы – как раз самые непрочные в этом отношении: они лопаются чаще, нежели тонкие. Это и понятно; тонкая стенка прогревается быстрее, в ней быстрее устанавливается равномерная температура и одинаковое расширение – не так, как в толстом медленно прогреваемом слое стекла.

Об одном только не надо забывать, выбирая тонкую стеклянную посуду: тонкими должны быть не только боковые стенки, но и дно стакана. При налинии горячей воды нагревается главным образом дно; если оно толсто, стакан растрескается, как бы тонки ни были его стенки. Легко лопаются также стаканы и фарфоровые чашки с толстым кольцеобразным выступом внизу.

Чем стеклянный сосуд тоньше, тем увереннее можно подвергать его нагреванию. Химики пользуются очень тонкими сосудами и кипятят в них воду прямо на горелке, не тревожась за целостность сосуда.

Конечно, идеальной посудой была бы такая, которая вовсе не расширялась бы при нагревании. Чрезвычайно мало расширяется *кварц*: в 15 – 20 раз меньше, чем стекло. Толстый сосуд из прозрачного кварца может быть как угодно нагрет – он не лопнет. Можно смело бросить кварцевый сосуд, нагретый до красного каления, в ледяную воду, не опасаясь за его целостность. Это связано отчасти и с тем, что теплопроводность у кварца значительно больше, чем у стекла.

Стаканы лопаются не только при быстром нагревании, но и при резком охлаждении. Причина – неравномерное сжатие: наружный слой, охлаждаясь, стягивается и сильно сдавливает внутренний слой, еще не успевший охладиться и сжаться. Поэтому не следует, например, банку с горячим вареньем выставлять на резкий холод, погружать в холодную воду и т.п.

Вернемся, однако, к чайной ложечке в стакане. На чем основано ее предохраняющее действие?

Резкое различие в нагревании внутреннего и наружного слоя стенок бывает лишь тогда, когда в стакан сразу наливается очень горячая вода; вода теплая не вызывает резкой разницы в нагревании, следовательно, и в натяжении различных частей стекла. От теплой воды посуда не лопается. Что же происходит, если в стакан положена ложечка? Попав на дно, горячая жидкость, прежде чем нагреть стекло (которое плохо проводит тепло), успевает отдать часть своей теплоты хорошему проводнику – металлу; температура жидкости понижается; из горячей она делается теплой и потому почти безвредной. Дальнейшее же приливание горячего чая не столь уже опасно для стакана, так как он успел немного прогреться.

Словом, металлическая ложка в стакане (особенно если она массивна) сглаживает неравномерность нагревания стакана и тем предотвращает растрескивание стекла.

Но почему лучше, если ложка серебряная? Потому что серебро – хороший проводник тепла; серебряная ложка быстрее отнимает теплоту от воды, нежели медная. Вспомните как серебряная ложка в стакане с горячим чаем обжигает руку! По этому признаку вы даже можете безошибочно определять материал ложки: медная ложка пальцев не обжигает.

Неравномерное расширение стеклянных стенок ставит под угрозу целостность не только чайных стаканов, но и ответственных частей парового котла – его водомерных трубок, по которым определяется высота воды в котле. Внутренние слои этих стеклянных трубок, нагреваемые горячим паром и водой, расширяются больше наружных. К натяжению, порождаемому этой причиной, прибавляется еще сильное давление пара и воды в трубке, отчего она легко может лопнуть. Чтобы предотвратить это, изготавливают иногда водомерные трубки из двух слоев стекла разных сортов: внутренний слой имеет меньший коэффициент расширения, нежели наружный.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Курочкина Л.Н, Каурова А.С., Шутенко Л.Д., Стасюк Б. П. Физика: Учеб. пособ. для студ.-иностранцев подгот. фак. вузов. М.: Высш. шк., 1983. 392 с.
- 2 Гурский И.П. Элементарная физика с примерами решения задач. М., 1984.
- 3 Алеева А.Я. Русский язык. Научный стиль речи: Учеб. пособ. Тамбов, 2004.