

§ 43. Насыщенный и ненасыщенный пар. Влажность воздуха



Ключевые понятия: насыщенный пар, ненасыщенный пар, свойства насыщенных паров, свойства ненасыщенных паров, пересыщенный пар, относительная влажность воздуха, абсолютная влажность воздуха, точка росы.

На этом уроке вы: познакомитесь с насыщенным и ненасыщеннымарами, с их свойствами, абсолютной и относительной влажностью; научитесь описывать принципы действия волосного и конденсационного гигрометров, определять относительную влажность воздуха с помощью гигрометра и психрометра, применять формулу для нахождения относительной влажности.

Насыщенные и ненасыщенные пары. Когда свободная поверхность жидкости в сосуде граничит с атмосферой, то испарение преобладает над конденсацией и уровень жидкости с течением времени понижается. Происходит это потому, что движущийся воздух уносит пар и уменьшает его плотность над поверхностью жидкости.

Опыт показывает, что уровень жидкости в герметически закрытом сосуде со временем не меняется. Это означает, что в таком сосуде процесс испарения жидкости полностью компенсируется с конденсацией пара, т. е. сколько молекул вылетает из жидкости, столько же в нее возвращается. Иначе говоря, в этом случае число молекул как в жидкости, так и в паре над ней остается неизмененным, хотя между жидкостью и паром происходит непрерывный обмен молекулами. Такое равновесие между жидкостью и ее паром называют **динамическим**.

Пар, который находится в состоянии динамического равновесия со своей жидкостью, называется насыщенным паром. Пар, который находится над поверхностью жидкости, когда испарение преобладает над конденсацией, и пар при отсутствии жидкости называется ненасыщенным паром.

Чтобы проверить, зависят ли плотность и давление насыщенного пара от рода вещества, проведем такой опыт. Возьмем одинаковые закрытые колбы с водой, спиртом и эфиром, соединенные с манометрами (рис. 43.1). Кроме воздуха, давление в колбах будут создавать и насыщенные пары налитых жидкостей. Оказывается, что наибольшее давление будет в колбе с эфиром, а наименьшее — в колбе с водой, т. е. большее давление создает насыщенный пар той жидкости, которая быстрее испаряется. Такого рода опыты показали следующее: *чем меньше удельная теплота парообразования жидкости, тем быстрее*

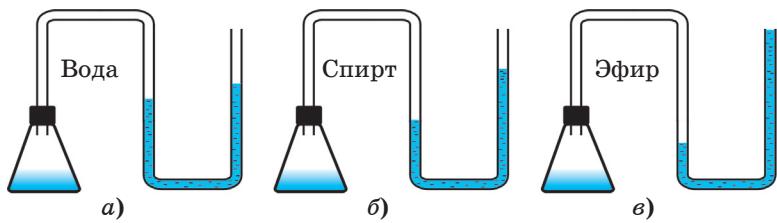


Рис. 43.1

она испаряется и тем больше давление и концентрация ее паров (при одинаковой температуре различных жидкостей).

Свойства насыщенных паров. Выясним поведение насыщенного пара при изохорическом процессе. Для этого возьмем герметически закрытый сосуд с манометром. Перед тем как закрыть сосуд, нальем в него жидкость и затем откачаем воздух. Пространство над жидкостью будет заполнено только ее парами. Поместив сосуд в водянную ванну (рис. 43.2), будем нагревать его и записывать температуру и давление в нем насыщенного пара. Закончив нагревание, начнем охлаждать сосуд и снова записывать температуру и давление пара в нем. Сравнив показания манометра при одинаковых температурах, мы увидим, что они одинаковы. Это доказывает, что *давление и плотность насыщенного пара однозначно определяются его температурой*.

Давление насыщенного пара зависит от его природы и быстро возрастает при повышении температуры. Если во время опыта наблюдать за уровнем жидкости в сосуде, то будет видно, что он при нагревании понижается, а при охлаждении повышается. Значит, масса и плотность пара при нагревании возрастают, а при охлаждении убывают. На основании изложенного делаем вывод, что давление насыщенного пара при нагревании увеличивается по двум причинам: во-первых, вследствие увеличения кинетической энергии поступательного движения молекул пара и, во-вторых, из-за увеличения числа молекул в единице объема пара, т. е. из-за увеличения его плотности.

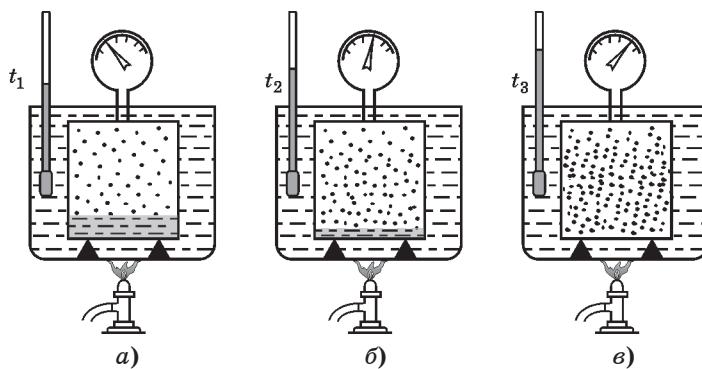


Рис. 43.2

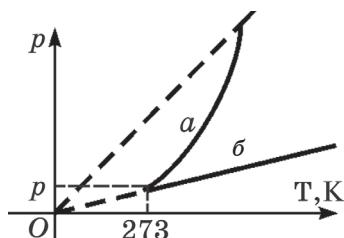


Рис. 43.3

При изохорическом нагревании идеального газа давление увеличивается только по первой причине, поскольку масса и плотность газа остаются постоянными. На рисунке 43.3 изображен типичный график зависимости давления насыщенного пара от температуры (кривая а), а ниже для сравнения показан график изохорического процесса для идеального газа, имеющего при 0°С такое же давление, как и пар (прямая б).

Из приведенных опытов следует, что *закон Шарля не применим к насыщенным парам*. В основном это объясняется тем, что масса насыщенного пара при изохорическом процессе изменяется.

Рассмотрим теперь изотермический процесс. Для этого воспользуемся сосудом цилиндрической формы с небольшим количеством жидкости, устроенным так же, как и в предыдущем опыте, но с подвижным поршнем (рис. 43.4, а). Если перемещать поршень вниз или вверх (рис. 43.4, б, в), то можно заметить, что пока в сосуде остается жидкость, давление пара остается постоянным. Это означает, что *при постоянной температуре давление насыщенного пара не зависит от объема*. Следовательно, *закону Бойля — Мариотта насыщенный пар не подчиняется*.

Наблюдения за уровнем жидкости в сосуде показывают, что *при изотермическом расширении масса насыщенного пара возрастает, а при сжатии — убывает*. Учитывая, что давление пара при этом остается неизменным, можно сделать следующие выводы:

1. При изотермическом расширении испаряется ровно столько жидкости, сколько нужно для заполнения насыщенным паром прироста объема сосуда.

2. При изотермическом сжатии конденсируется ровно столько насыщенного пара, сколько его было в отнятом у пара объеме.

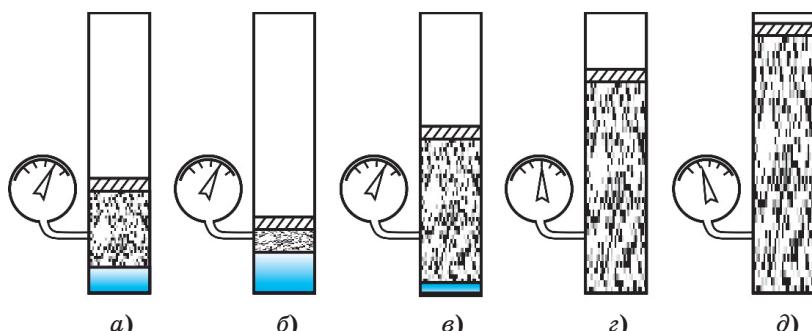


Рис. 43.4

3. Плотность насыщенного пара при изотермическом процессе не изменяется.

4. Давление и плотность насыщенного пара зависят только от температуры и рода вещества.

Из всего изложенного следует, что законы для идеального газа к насыщенным парам неприменимы. Объясняется это в основном тем, что при любом процессе, происходящем с насыщенным паром, масса пара изменяется.

Свойства ненасыщенных паров. Если нагревать сосуд с жидкостью, изображенный на рис. 43.2, до тех пор, пока жидкость в нем не исчезнет (рис. 43.2, *в*), то пар станет ненасыщенным. Его плотность при дальнейшем нагревании остается постоянной и давление будет уже не так быстро возрастать с увеличением температуры (рис. 43.3, верхняя часть кривой *а*). Однако пока пар недалек от насыщения, влияние взаимодействия молекул все же заметно, и только при значительном нагревании ненасыщенный пар начнет подчиняться закону Шарля.

При изотермическом расширении (рис. 43.4, *г, д*), описанном выше, явно видно изменение давления пара, когда он становится ненасыщенным. Плотность ненасыщенного пара близка к плотности насыщенного, но велико влияние взаимодействия молекул пара и их собственного объема. При этом зависимость давления пара от его объема расходится с законом Бойля — Мариотта. При малых плотностях ненасыщенный пар подчиняется закону Бойля — Мариотта. *Следовательно, к ненасыщенному пару можно применить законы для идеального газа лишь в тех случаях, когда пар далек от насыщения.*

Анализируя полученные выводы, легко установить, что насыщенный пар можно превратить в ненасыщенный — либо изохорическим нагреванием, либо изотермическим расширением, либо одновременно и нагреванием, и расширением. Наоборот, ненасыщенный пар всегда можно превратить в насыщенный — либо изохорическим охлаждением, либо изотермическим сжатием, либо одновременно и охлаждением, и сжатием.

Опыт показывает, что если пар не соприкасается с жидкостью, его можно охладить ниже температуры, при которой он становится насыщенным, но жидкость при этом еще не образуется. Такой пар называется *пересыщенным*. Объясняется это тем, что для превращения пара в жидкость нужны центры конденсации, которые могли бы стать зародышами капелек жидкости. Ими обычно служат пылинки или ионы: они притягивают к себе молекулы пара, образуя мельчайшие капельки, которые служат центрами дальнейшей конденсации.

Оказывается, что собственный объем молекул пара практически всегда ничтожно мал по сравнению с объемом, занятым паром. Поэтому

если в пространстве находится пар какой-либо жидкости (даже и насыщенный), то это не мешает испаряться в нем другой жидкости. Общее давление в этом случае равно сумме давлений паров обеих жидкостей.

Относительная влажность воздуха. *Величина, характеризующая содержание водяных паров в различных частях атмосферы Земли, называется влажностью воздуха.* Для количественной оценки влажности воздуха используют *абсолютную* или *относительную влажность*. Абсолютную влажность воздуха измеряют плотностью водяного пара ρ_a , находящегося в воздухе, или его давлением p_a . Более ясное представление о степени влажности воздуха дает относительная влажность ϕ , которую измеряют числом, показывающим, сколько процентов составляет абсолютная влажность ρ_a от плотности водяного пара ρ_n , нужной для насыщения воздуха при имеющейся у него температуре:

$$\phi = \frac{\rho_a}{\rho_n} \cdot 100\%. \quad (43.1)$$

Таким образом, относительная влажность определяется не только абсолютной влажностью, но и температурой воздуха. При вычислении относительной влажности значения ρ_a и ρ_n надо брать из таблиц.

Температура, при которой воздух в процессе своего охлаждения становится насыщенным водяными парами, называется точкой росы. При известной точке росы абсолютную влажность воздуха ρ_a можно найти по таблице, так как она равна плотности насыщенного пара ρ_n при точке росы. Найдя затем по этой же таблице ρ_n для данной температуры воздуха, можно по формуле (43.1) вычислить относительную влажность ϕ .

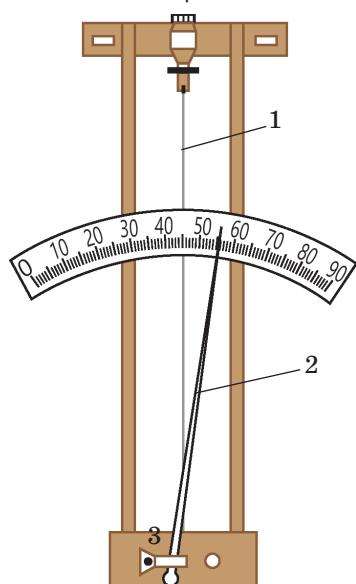


Рис. 43.5

Большинство приборов для определения влажности воздуха называются *гигрометрами* (от греч. *гигрос* — “влажный”) и *психрометрами* (от греч. *психриа* — “холод”).

Различают гигрометры *волосной* (рис. 43.5) и *конденсационный* (рис. 43.6). Принцип действия первого основан на свойстве человеческого (конского) волоса удлиняться при повышении влажности окружающего воздуха. С удлинением волоса (1) меняется угол отклонения стрелки (2) прибора, закрепленной через пружину (3). Действие второго основано на определении точки росы, по которой находят в таблицах абсолютную влажность. Нагнетая в коробку (1) с налитым в нее эфиром с помощью груши (5) воздух, добиваются усиленного испарения эфира. Это приводит

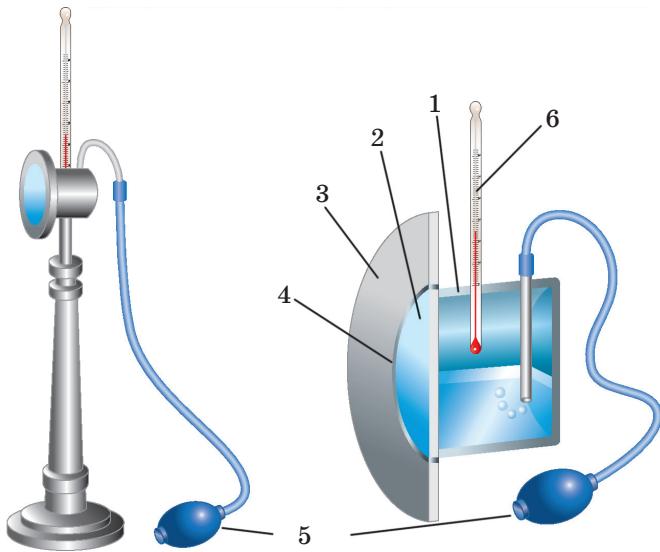


Рис. 43.6

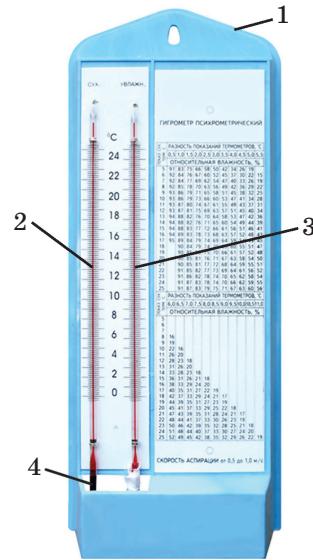


Рис. 43.7

к охлаждению самой коробки и ее лицевой отполированной металлической поверхности (2), на которой будет конденсироваться водяной пар, находящийся в окружающем воздухе. Лицевая поверхность (2) отделена от поверхности (3) контактирующей с воздухом резиновой прокладкой (4), поэтому на поверхности (3) не появляется роса. С помощью термометра (6), укрепленного на корпусе гигрометра, замечают температуру окружающего воздуха и температуру появления росы. Потом по таблице зависимости давления насыщенного водяного пара от температуры находят давления, соответствующие этим температурам. Затем по формуле (43.1) вычисляют относительную влажность воздуха.

Психрометр (рис. 43.7) состоит из корпуса 1, на котором закреплены два термометра: сухой 2 и влажный 3; к корпусу прикреплен сосуд с водой 4. Шарик термометра 3 обмотан тканью, конец которой опущен в сосуд с водой. Вода, испаряясь, охлаждает термометр 3. По разности температур термометров с помощью психометрических таблиц находят относительную влажность воздуха.



Вопросы для самоконтроля

1. Что понимают под *насыщенными и ненасыщенными парами?*
2. Каковы свойства насыщенных паров?
3. Подчиняются ли насыщенные пары законам идеального газа? Объясните.
4. В чем особенность ненасыщенных паров?
5. Что такое *абсолютная и относительная влажность воздуха?*
6. Как работают гигрометр и психрометр?
7. Чем объяснить, что в сухом воздухе человек выдерживает температуру 100°C и выше?



Творческая мастерская

Экспериментируйте

Определите относительную влажность воздуха с помощью гигрометра и психрометра.

Объясните

- Почему давление насыщенного пара увеличивается с ростом температуры, причем быстрее, чем у идеального газа при постоянном объеме?
- Для чего нужно знать влажность воздуха?

Исследуйте

Как можно изменить влажность воздуха в помещении?

Анализируйте

- Какая влажность воздуха наиболее благоприятна для человека? Ответ обоснуйте.
- При температуре воздуха 15°C относительная влажность равна 55%. Выпадет ли роса, если температура воздуха упадет до 10°C? Приведите расчеты.

Решайте

- Температура в комнате 16°C. Относительная влажность воздуха 50%. Найдите абсолютную влажность.

(Ответ: $6,8 \cdot 10^{-3}$ кг/м³)

- Точка росы 7°C, относительная влажность 50%. Какова температура воздуха?

(Ответ: 18°C)

- Какова относительная влажность воздуха в комнате, в каждом кубическом метре которого содержится $7,7 \cdot 10^{-3}$ кг водяных паров при температуре 15°C?

(Ответ: 61,4%)

- Относительная влажность воздуха в комнате 60%, температура 16°C. До какой температуры надо охладить блестящий металлический предмет, чтобы на его поверхности появилась роса?

(Ответ: 8°C)

- *5. В сосуде находится воздух, температура которого 17°C и относительная влажность 70%. Насколько уменьшится влажность воздуха, если его нагреть до 100°C и в два раза уменьшить объем?

(Ответ: 57%)



Рефлексия

- На каком уровне усвоен вами материал? Обоснуйте ответ.
- Какие разделы параграфа особенно вас заинтересовали?
- Не задумывались ли вы над тем, какие эксперименты можно провести для подтверждения изученного материала?

§ 44. Фазовые диаграммы. Тройная точка. Критическое состояние вещества



Ключевые понятия: фазовая диаграмма, сублимация, тройная точка, критическая точка, критическое состояние, критическая температура.

На этом уроке вы: познакомитесь с фазовыми состояниями вещества и их диаграммами, научитесь читать диаграммы состояний вещества.

Фазовые диаграммы. На рисунке 44.1 изображены диаграммы трех фазовых состояний вещества. Равновесному состоянию между жидкостью и ее паром соответствует кривая испарения AK . Фазовая диаграмма вещества: K — критическая точка, A — тройная точка.

Равновесие между твердым и жидким состояниями вещества характеризует кривая плавления AB . При давлениях и температурах, соответствующих точкам этой кривой, твердое тело и расплав, приведенные в соприкосновение, находятся в динамическом равновесии. Число молекул, переходящих в единицу времени из жидкости в твердое тело, равно числу молекул, переходящих границу раздела между ними в противоположном направлении.

Кривая плавления идет почти вертикально, поскольку температура плавления слабо зависит от давления (на рис. 44.1 она немножко отклонена вправо). Этим иллюстрируется повышение температуры плавления с увеличением давления, наблюдаемое у большинства веществ.

Кривая CA на диаграмме состояний вещества отвечает значениям давления и температуры, при которых устанавливается равновесие между процессами испарения молекул (атомов) твердого тела и конденсации их на поверхность твердого тела. Процесс испарения твердых тел называется *сублимацией*. Конечно, сублимации сопутствует и обратный процесс — кристаллизация из пара. При определенных сочетаниях температуры и давления система “кристалл — пар” находится в динамическом равновесии. С уменьшением температуры кристалла уменьшается и давление его насыщенного пара (см. кривую сублимации CA).

Тройная точка. Кривые плавления и парообразования пересекаются в точке A . Эту точку называют *тройной точкой*, так как если при давлении $p_{\text{тр}}$ и температуре $T_{\text{тр}}$ некоторые количества вещества в твердом, жидком и газообразном состояниях находятся в контакте,

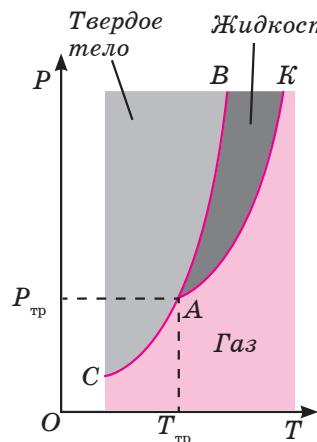


Рис. 44.1

то без подведения или отвода тепла количество вещества, находящегося в каждом из трех состояний, не изменяется.

Из диаграммы состояний вещества видно, что переход вещества при нагревании из твердого состояния в газообразное может совершиться, минуя жидкое состояние. Переход кристалл — жидкость — газ при нормальном атмосферном давлении происходит лишь у тех веществ, у которых давление в тройной точке ниже этого давления. Те же вещества, у которых давление в тройной точке превышает атмосферное, в результате нагревания при атмосферном давлении не плавятся, а переходят в газообразное состояние (сублимируют).

Например, при атмосферном давлении твердая углекислота при нагревании не плавится, а сублимирует. Это объясняется тем, что тройной точке соединения CO_2 соответствует давление, примерно в пять раз большее нормального атмосферного давления.

Поскольку тройной точке соответствует вполне определенная температура, она может служить опорной (основной) точкой термометрической шкалы. Оказывается, что температура тройной точки воды равна 273,16 К (т. е. $0,01^\circ\text{C}$). Это позволило ввести в Международной системе единиц следующее определение единицы термодинамической (абсолютной) температуры (1 К): Кельвин равен 1/273,16 части термодинамической температуры тройной точки воды.

Критическое состояние. Вы уже знаете, что для превращения пара в жидкость нужно повышать давление и понижать температуру.

В 1861 г. Д. И. Менделеев установил, что для каждой жидкости должна существовать такая температура, при которой исчезает всякое различие между жидкостью и ее паром. Экспериментально исследовал процесс превращения пара в жидкость (и обратно) при различных давлениях английский химик Томас Эндрюс (1813—1885). Он показал, что такая температура для каждой жидкости действительно существует, и ввел для нее термин — *критическая температура*, который используется и в настоящее время.

Критической температурой $t_{\text{кр}}^$ вещества называется такая температура, при которой плотность жидкости и плотность ее насыщенного пара становятся одинаковыми.*

График изменения плотности воды и ее насыщенного пара в зависимости от температуры показан на рисунке 44.2, а. Поскольку не только плотность, но и давление насыщенного пара однозначно определяются его температурой, можно построить график зависимости давления от температуры t для насыщенного пара (рис. 44.2, б).

Из рисунка 44.2, а видно, что с повышением температуры горизонтальный участок графика сокращается, стягиваясь в точку K при критической температуре $t_{\text{кр}}^*$. Соответственно уменьшается различие в удельных объемах, а следовательно, и в плотностях жидкости и насы-

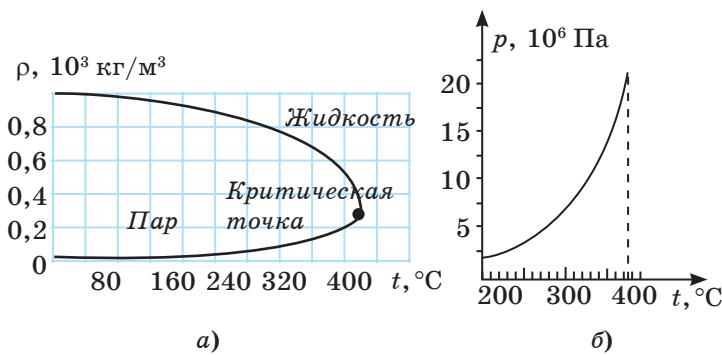


Рис. 44.2

щенного пара. При критической температуре это различие полностью исчезает. Одновременно исчезает всякое различие между жидкостью и паром.

Точка K , являющаяся пределом, к которому приближаются горизонтальные отрезки графика при стремлении температуры к критическому значению $t_{\text{кр}}$, именуется *критической точкой*. Состояние, изображаемое точкой K , называется *критическим состоянием* вещества. Объем $V_{\text{кр}}$, давление $p_{\text{кр}}$ и температура $t_{\text{кр}}$, отвечающие критическому состоянию, называются *критическими величинами*.

Давление насыщенного пара растет с температурой, достигая при критической температуре значения $p_{\text{кр}}$. При температурах выше критической понятие насыщенного пара теряет смысл. Поэтому кривая зависимости давления насыщенного пара от температуры заканчивается в критической точке K .

При температурах выше критической вещество при любом давлении оказывается однородным. При таких температурах никаким сжатием не может быть осуществлено охлаждение вещества.

Из всего сказанного следует, что принципиальной разницы между газом и паром нет. Обычно *газом* называют вещество в газообразном состоянии, когда его температура выше критической, а *паром* — когда температура ниже критической.



Вопросы для самоконтроля

- Где быстрее закипает вода — в открытом или в закрытом сосуде?
- Что называют *тройной точкой*?
- Что понимают под термином “*критическая температура*”? Кто ввел термин “*критическая температура*”?
- Что называется *сублимацией*? Какой процесс сопутствует сублимации?
- Кто установил *температуру абсолютного кипения*?
- Какое состояние вещества называется *критическим состоянием*?
- Что именуется *критической точкой*? Что называют *критическими величинами*?



Творческая мастерская

Наблюдайте

Перед носиком чайника с кипящей водой поместите стеклянную полоску (держите ее рукавичкой). Какое явление вы наблюдаете? Что появится в тарелке, находящейся под полоской? Почему?

Экспериментируйте

Отлейте из бутылки газированной воды примерно 3/4 напитка. Закройте крышкой оставшуюся воду. Взболтайте содержимое бутылки. Что будете наблюдать? Объясните.

Анализируйте

1. Используя ваши знания по географии, укажите места на Земле и в Казахстане, в частности, где наблюдаются: а) повышенная влажность; б) сухой климат. Почему? Каковы особенности живой природы, характерные для этих мест?

2. Где в повседневной жизни нам приходится сталкиваться с помещениями, где влажность либо высокая, либо низкая? Как с этим бороться?

3. Из-за чего в критическом состоянии жидкость и ее пар имеют одинаковую плотность, а теплота парообразования равна нулю?

4. Почему газ при температуре выше критической не может быть превращен в жидкость?

Творите

Изготовьте простейший волосянной гигрометр. Для этого липкой лентой прикрепите свой волос к центру зубочистки или спичке. Один конец спички подкрасьте, второй кончик волоса прикрепите к середине карандаша. Карандаш положите на горлышко банки так, чтобы спичка свисала внутрь банки, не доставая дна. В течение недели наблюдайте отклонения спички. Сравните эти отклонения с прогнозом погоды. Связаны ли изменения влажности воздуха с показаниями вашего "гигрометра"?



Рефлексия

1. На каком уровне усвоен вами материал? Обоснуйте ответ.
2. Какие разделы параграфа особенно заинтересовали вас?
3. Не задумывались ли вы над тем, какие эксперименты можно провести для подтверждения изученного материала?

§ 45. Свойства поверхностного слоя жидкости



Ключевые понятия: поверхностный слой жидкости, поверхностное натяжение, сила поверхностного натяжения.

На этом уроке вы: познакомитесь с основными понятиями молекулярной физики, научитесь описывать связь температуры со средней кинетической энергией поступательного движения молекул; описывать модель идеального газа; применять основное уравнение молекулярно-кинетической теории при решении задач.

Поверхностный слой жидкости. Выясним, чем отличаются действия молекулярных сил внутри жидкости и на ее поверхности. Среднее значение равнодействующих молекулярных сил притяжения, приложенных к молекуле M_1 , которая находится внутри жидкости (рис. 45.1), близко к нулю. Случайные флуктуации этой равнодействующей заставляют молекулу M_1 совершать лишь хаотическое движение внутри жидкости. Несколько иначе обстоит дело с молекулами M_2 и M_3 , находящимися в поверхностном слое жидкости.

Опишем вокруг молекул *сферы молекулярного действия радиусом r_m* (порядка 10^{-9} м). Тогда для молекулы M_2 в нижней полусфере окажется много молекул, а в верхней — значительно меньше, так как снизу находится жидкость, а сверху — пар и воздух. Поэтому для молекулы M_2 равнодействующая молекулярных сил притяжения в нижней полусфере F_n много больше равнодействующей молекулярных сил в верхней полусфере F_∞ . Отметим, что сила F_n так мала, что ею можно пренебречь. Равнодействующая молекулярных сил притяжения, приложенных к молекуле M_3 , меньше, чем для молекулы M_2 , так как определяется только действием молекул в темно-синей области. Существенно, что равнодействующие для молекул M_2 и M_3 направлены внутрь жидкости перпендикулярно ее поверхности.

Таким образом, все молекулы жидкости, находящиеся в поверхностном слое, толщиной, равной радиусу молекулярного действия (рис. 45.1), втягиваются внутрь жидкости. Но пространство внутри жидкости занято другими молекулами, поэтому поверхностный слой создает давление на жидкость, которое называют *молекулярным давлением*.

Теоретические расчеты показали, что молекулярное давление очень велико. Например, для воды оно порядка $11 \cdot 10^8$ Па, для эфира — $1,4 \cdot 10^8$ Па.

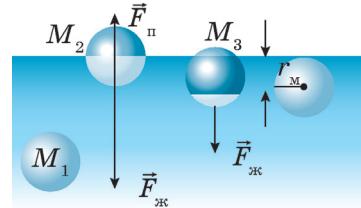


Рис. 45.1

Поверхностное натяжение. Поскольку молекулы жидкости, находящиеся в ее поверхностном слое, втягиваются внутрь жидкости, их потенциальная энергия больше, чем у молекул внутри жидкости. К этому выводу можно также прийти, если вспомнить, что потенциальная энергия взаимодействия молекул отрицательна, и учесть, что молекулы в поверхностном слое жидкости взаимодействуют с меньшим числом молекул, чем молекулы внутри жидкости.

Эту дополнительную потенциальную энергию молекул поверхностного слоя жидкости называют *поверхностной энергией*. За счет нее может быть произведена работа, связанная с изменениями свободной поверхности жидкости. Наоборот, для того, чтобы вывести молекулы, находящиеся внутри жидкости, на ее поверхность, нужно преодолеть противодействие молекулярных сил. То есть произвести работу, которая нужна для увеличения поверхностной энергии ΔE прямо пропорционально изменению площади свободной поверхности жидкости ΔS :

$$\Delta W = \sigma \Delta S. \quad (45.1)$$

Так как $\Delta W = A$, то имеем

$$A = \sigma \Delta S. \quad (45.2)$$

Итак, работа молекулярных сил A при уменьшении площади свободной поверхности прямо пропорциональна ΔS . Но эта работа должна еще зависеть от рода жидкости и внешних условий, например, от температуры. Эту зависимость и выражает коэффициент σ .

Величина σ , характеризующая зависимость работы молекулярных сил при изменении площади свободной поверхности жидкости от рода жидкости и внешних условий, называется коэффициентом поверхностного натяжения жидкости (или просто поверхностным натяжением). Он показывает, какую работу должны совершить молекулярные силы, чтобы уменьшить площадь свободной поверхности жидкости на единицу:

$$\sigma = \frac{A}{\Delta S}. \quad (45.3)$$

Выведем единицу измерения поверхностного натяжения σ в СИ:

$$\sigma = 1 \text{ Дж}/1 \text{ м}^2 = 1 \text{ Н}/\text{м}.$$

Так как всякая система самопроизвольно переходит в состояние, при котором ее потенциальная энергия минимальна, то жидкость должна самопроизвольно переходить в такое состояние, при котором площадь ее свободной поверхности имеет наименьшее значение. Это можно показать с помощью следующего опыта.

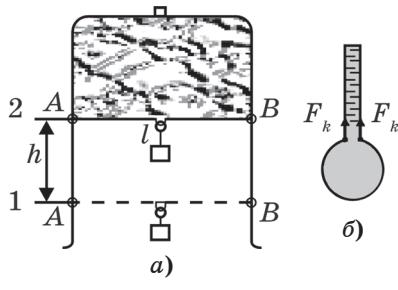


Рис. 45.2

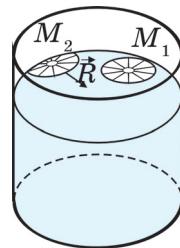


Рис. 45.3

На проволоке, изогнутой в виде буквы П, укрепляют подвижную перемычку AB (рис. 45.2, а). Полученную таким образом рамку затягивают мыльной пленкой, опуская рамку в мыльный раствор. После вынимания рамки из раствора перемычка AB перемещается вверх, т. е. молекулярные силы действительно уменьшают площадь свободной поверхности жидкости. Поскольку при одном и том же объеме наименьшая площадь поверхности имеется у шара, жидкость в состоянии невесомости принимает его форму. По этой же причине маленькие капли жидкости имеют шарообразную форму (рис. 45.2, б).

Сила поверхностного натяжения. Молекула M_1 , которая расположена на поверхности жидкости (рис. 45.3), взаимодействует не только с молекулами, находящимися внутри жидкости, но и с молекулами на поверхности жидкости, расположенными в пределах сферы молекулярного действия. Для молекулы M_1 равнодействующая R молекулярных сил, направленных вдоль поверхности жидкости, равна нулю, а для молекулы M_2 , расположенной у края поверхности, сила R отлична от нуля. Из рисунка 45.3 видно, что сила R направлена по нормали — к границе свободной поверхности и по касательной — к самой поверхности.

Молекулярные силы, направленные вдоль поверхности жидкости, действуют на любую замкнутую линию на свободной поверхности жидкости по нормали к этой линии таким образом, что стремятся сократить площадь поверхности жидкости, ограниченную замкнутой линией. Это можно показать на следующем опыте.

На проволочном кольце укрепляется нитка длиной l (рис. 45.4, а). Если затянуть кольцо мыльной пленкой, то нитка свободно расположится на этой пленке, так как молекулярные силы будут стремиться сократить площадь поверхности, ограниченную как верхним замкнутым контуром, так и нижним. Порвем мыльную пленку с нижней стороны нитки. Тогда молекулярные силы сократят поверхность, ограниченную верхним контуром, и натянут нитку (рис. 45.4, б).

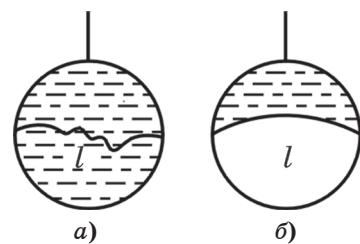


Рис. 45.4

Сила $F_{\text{н}}$, обусловленная взаимодействием молекул жидкости, вызывающая сокращение площади ее свободной поверхности и направленная по касательной к этой поверхности, называется силой поверхностного натяжения.

Покажем, что сила поверхностного натяжения $F_{\text{н}}$, действующая на перемычку (рис. 45.2, а), пропорциональна ее длине l . Работа, совершаемая силами поверхностного натяжения при перемещении поперечины l из положения 1 в положение 2, выражается формулой $A = \sigma\Delta S$. При этом суммарное сокращение площади ΔS свободной поверхности жидкости равно $2hl$, а так как свободных поверхностей две, то $A = 2\sigma hl$.

С другой стороны, работу A можно найти, умножив силу на путь. Поскольку в нашем примере у поверхности пленки две линии соприкосновения с перемычкой (рис. 45.2, б), то общая сила равна $2F_{\text{н}}$ и $A = 2F_{\text{н}} h$. Таким образом, $2F_{\text{н}} h = 2 \cdot \sigma hl$, или

$$F_{\text{н}} = \sigma l. \quad (45.4)$$

Теперь

$$\sigma = \frac{F_{\text{н}}}{l}. \quad (45.5)$$

Отсюда следует, что *коэффициент поверхностного натяжения σ определяется силой поверхностного натяжения, действующей на единицу длины границы свободной поверхности жидкости.*

Следует помнить, что $1 \text{ Дж}/\text{м}^2 = 1 \text{ Н} \cdot \text{м}/\text{м}^2 = 1 \text{ Н}/\text{м}$.

Теперь легко понять, почему жидкость принимает форму, при которой площадь ее свободной поверхности оказывается наименьшей: силы молекуларного давления втягивают молекулы с поверхности внутрь жидкости, а силы поверхностного натяжения сокращают площадь свободной поверхности, т. е. закрывают образовавшиеся “окна” на этой поверхности.

Итак, поверхностный слой жидкости всегда находится в состоянии натяжения. Однако это состояние нельзя сравнивать с натяжением упругой растянутой пленки. Упругие силы возрастают по мере увеличения площади растянутой пленки, а силы поверхностного натяжения от площади поверхности не зависят. Сила $F_{\text{н}}$ в положениях 1 и 2 на рисунке 45.4 одинакова, поскольку число молекул в единице площади свободной поверхности жидкости остается одинаковым.



Вопросы для самоконтроля

1. Какие процессы происходят в поверхностном слое жидкости?
2. Что такое *свободная энергия*?
3. Каков физический смысл коэффициента поверхностного натяжения?
4. Что называется *силой поверхностного натяжения*? Какова ее единица измерения?



Творческая мастерская

Наблюдайте

Швейную иголку, аккуратно взяв за края, положите на поверхность воды. Объясните явление.

Экспериментируйте

1. На поверхность стола капните капельку воды. Пронаблюдайте, какую форму она примет, если: а) поверхность стола сухая; б) часть поверхности смазана маслом. Объясните явление.

2. Капните жиром на кусок ткани. Попробуйте вывести жирное пятно с помощью бензина. Как вы будете это делать: начиная с центра пятна, или с его краев? Результат опыта объясните.

3. На поверхность воды, налитой в три широкие неглубокие тарелки, поместите мелкие куски пенопласта, спичку, кусок картона. Прикоснитесь к центру тарелки: а) в первой тарелке — мылом; б) во второй — сахаром рафинадом; в) в третью насыпьте немного перца. Объясните поведение тел, находящихся на поверхности воды.

Объясните

Почему с помощью утюга можно вывести пятно жира с костюма? Как это сделать?

Решайте

1. Какую работу нужно совершить, чтобы выдуть мыльный пузырь диаметром 0,14 м, если процесс раздувания изотермический?

(Ответ: 5 мДж)

2. На поверхность воды положили рамку со сторонами 6 см и 8 см. Какую силу нужно приложить, чтобы оторвать рамку от поверхности воды, если масса рамки 2 г?

(Ответ: 61 мН)

3. Чему равен коэффициент поверхностного натяжения воды, если с помощью пипетки, имеющей кончик диаметром 0,4 мм, можно дозировать воду с точностью до 10 мг?

(Ответ: 77 мН/м)

4. Каким усилием можно оторвать тонкое металлическое кольцо от мыльного раствора, если диаметр кольца 15,6 см, масса 7 г и кольцо соприкасается с раствором по окружности?

(Ответ: 109 мН)

*5. Рассчитайте, сколько воды можно унести в решете радиусом 10 см, если тонкие нити решета протянуты на расстоянии 1 мм друг от друга. Нити водой не смачиваются.

(Ответ: 460 г)

Рефлексия

- На каком уровне усвоен вами материал? Обоснуйте ответ.
- Какие разделы параграфа особенно заинтересовали вас?
- Не задумывались ли вы над тем, какие эксперименты можно провести для подтверждения изученного материала?

§ 46. Смачивание. Капиллярные явления



Ключевые понятия: смачивающая жидкость, краевой угол, несмачивающая жидкость, лапласове давление, капиллярность, капиллярные явления.

На этом уроке вы: познакомитесь со смачивающим и несмачивающим свойствами жидкостей, с капиллярными явлениями и их ролью в природе и технике, научитесь применять формулу, выражющую лапласове давление при решении задач.

Смачивание. Краевой угол. Если опустить стеклянную палочку в ртуть и затем вынуть ее, то ртути на ней не окажется. Но если эту же палочку опустить в воду, а затем вытащить, на ее конце остается капля воды. Этот опыт показывает, что молекулы ртути притягиваются друг к другу сильнее, чем к молекулам стекла, а молекулы воды притягиваются друг к другу слабее, чем к молекулам стекла.

Если молекулы жидкости притягиваются друг к другу слабее, чем к молекулам твердого вещества, то жидкость называют *смачивающей это вещество*. Например, вода смачивает чистое стекло и не смачивает парафин. Если молекулы жидкости притягиваются друг к другу сильнее, чем к молекулам твердого вещества, то жидкость называют *несмачивающей это вещество*. Ртуть не смачивает стекло, однако она смачивает чистые медь и цинк.

Расположим горизонтально плоскую пластинку из какого-либо твердого вещества и капнем на нее исследуемую жидкость. Тогда капля расположится либо так, как показано на рис. 46.1, *а*, либо так, как показано на рис. 46.1, *б*. В первом случае жидкость смачивает твердое вещество, а во втором — нет. Отмеченный на рис. 46.1 угол θ называют *краевым углом*. Он образуется плоской поверхностью твердого тела и плоскостью, касательной к свободной поверхности жидкости, проходящей через точку *A* (рис. 46.1), где граничат твердое тело, жидкость и газ. Внутри краевого угла всегда находится жидкость. Для смачивающих жидкостей краевой угол острый, а для несмачивающих — тупой. Чтобы действие силы тяжести не искажало краевой угол, каплю надо брать как можно меньше.

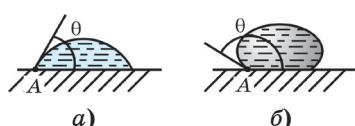


Рис. 46.1

Поскольку краевой угол θ сохраняется при вертикальном положении твердой поверхности, то смачивающая жидкость у краев сосуда, в который она налита, приподнимается (рис. 46.2, *а*), а несмачивающая — опускается (рис. 46.2, *б*).

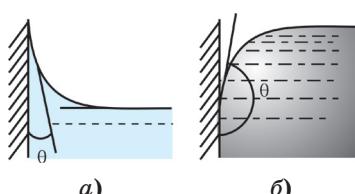


Рис. 46.2

Давление, создаваемое искривленной поверхностью жидкости. Искривление поверхности жидкости у краев сосуда легко обнаружить на опыте. Особенно отчетливо это видно в узких трубках, где искривляется вся свободная поверхность жидкости. В трубке с круглым сечением эта поверхность представляет собой часть поверхности сферы и называется **мениском** (от греч. *менискос* — “лунный серп”). У смачивающей жидкости мениск вогнутый, а у несмачивающей — выпуклый (рис. 46.3, *a*, *б*).

Так как площадь поверхности мениска больше, чем площадь внутреннего сечения трубы, то под действием молекулярных сил искривленная поверхность жидкости стремится выпрямиться и этим создает дополнительное давление $p_{\text{л}}$, которое при смачивании (вогнутый мениск) направлено от жидкости, а при несмачивании (выпуклый мениск) — внутрь жидкости. Это давление определил французский ученый (астроном, математик и физик) Пьер Лаплас (1749—1827), поэтому его часто называют **лапласовым давлением**.

Для сферической формы свободной поверхности жидкости с радиусом R это давление выражается формулой:

$$p_{\text{л}} = \frac{2\sigma}{R}. \quad (46.1)$$

Капиллярные явления. Искривление поверхности жидкости в узких трубках приводит к кажущемуся нарушению закона сообщающихся сосудов. Если опустить в воду узкую стеклянную трубку (рис. 46.4, *а*), то вода втягивается в трубку, и ее уровень устанавливается на высоте h над уровнем воды вне трубы. Объясняется это тем, что лапласово давление $p_{\text{л}}$ в трубке направлено вверх. Оно и втягивает воду вверх до тех пор, пока не окажется уравновешенным гидростатическим давлением p_{r} столба воды в трубке высотой h , равным $p_{\text{r}} = \rho gh$. Поскольку

$p_{\text{л}} = \frac{2\sigma}{R}$, то при $p_{\text{л}} = p$ имеем $\frac{2\sigma}{R} = \rho gh$, откуда

$$h = \frac{2\sigma}{\rho g R}. \quad (46.2)$$

При полном смачивании ($\theta = 0$) мениск в узкой трубке имеет форму полусфера, и радиус сферической поверхности R равен внутреннему радиусу трубы r . Тогда

$$h = \frac{2\sigma}{\rho gr}. \quad (46.3)$$

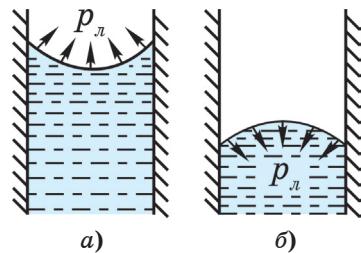


Рис. 46.3

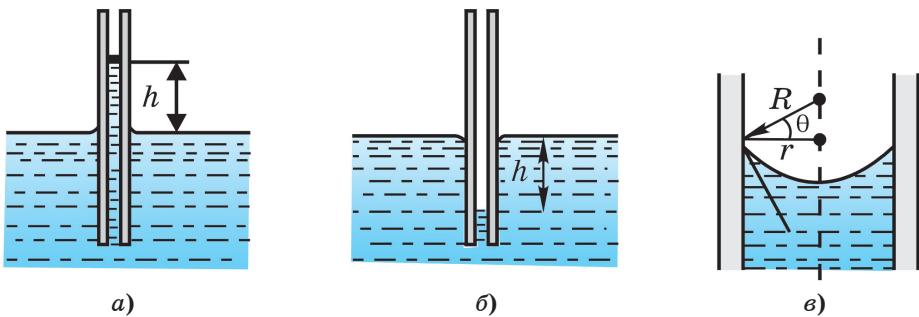


Рис. 46.4

При неполном смачивании ($\theta \neq 0$) радиус мениска $R = \frac{r}{\cos\theta}$ (рис. 46.4, *в*) и

$$h = \frac{2\sigma \cdot \cos\theta}{\rho gr}. \quad (46.4)$$

Из (рис. 46.4, *а*, *б*) видно, что высота h тем больше, чем меньше внутренний радиус трубки r . Подъем воды особенно значителен в трубках, внутренний диаметр которых соизмерим с диаметром волоса (или еще меньше); поэтому такие трубки называют *капиллярами* (от греч. *καπιλλάρις* — “волосной, тонкий”). Смачивающая жидкость в капиллярах поднимается вверх (рис. 46.4, *а*), а несмачивающая — опускается вниз (рис. 46.4, *б*). Явления, обусловленные втягиванием смачивающих жидкостей в капилляры или выталкиванием несмачивающих жидкостей из капилляров, называются *капиллярными явлениями*.

Капиллярные явления играют большую роль в природе и технике. Множество мельчайших капилляров имеется в растениях. По ним влага из почвы поднимается до вершин деревьев и через листья испаряется в атмосферу. В почве имеются капилляры, и чем они уже, тем плотнее почва. Вода по этим капиллярам поднимается до поверхности и быстро испаряется, а земля становится сухой. Ранняя весенняя вспашка земли разрушает капилляры, т. е. сохраняет подпочвенную влагу.

В технике также необходимо учитывать капиллярные явления.



Вопросы для самоконтроля

1. Каков механизм смачивания или несмачивания жидкостью твердого тела?
2. Что называется *лапласовым давлением*? Как оно направлено?
3. Как объяснить капиллярные явления?
4. Какие примеры капиллярных явлений вам известны?
5. Каковы преимущества осенней и весенней вспашки?
6. Почему считается, что вода — синоним жизни?



Творческая мастерская

Экспериментируйте

Положите в воду кусок мела. Из него во всех направлениях начнут выходить пузырьки. Объясните это явление.

Объясните

1. Если вечером образуется туман, ночью заморозков не будет. Почему?
2. Весной землю пашут и боронуют. Объясните, почему это способствует сохранению влаги в почве.
3. Почему сухие дрова горят лучше, чем сырье?

Исследуйте

Опустите в воду конец узкой полоски промокательной бумаги и измерьте, на какую максимальную высоту поднимется вода. По высоте подъема воды оцените диаметр капиллярных каналов волокон бумаги.

Решайте

1. Для определения коэффициента поверхностного натяжения воды была использована пипетка с диаметром выходного отверстия $d = 2 \text{ мм}$. Оказалось, что $n = 40$ капель имеют массу $m = 1,9 \text{ г}$. По этим данным каким получится коэффициент поверхностного натяжения s ?

$$(\text{Ответ: } 74 \frac{\text{мН}}{\text{м}})$$

2. В двух капиллярных трубках разного диаметра, опущенных в воду, установилась разность уровней $\Delta h_1 = 2,6$. При опускании этих же трубок в спирт разность уровней оказалась $\Delta h_2 = 1 \text{ см}$. Зная коэффициент поверхностного натяжения воды $\sigma_1 = 73 \text{ мН/м}$, найти коэффициент поверхностного натяжения спирта σ_2 .

$$(\text{Ответ: } 22 \text{ мН/н})$$

3. На какую высоту h поднимается вода между параллельными пластинами, находящимися на расстоянии $d = 0,2 \text{ мм}$ друг от друга? Коэффициент поверхностного натяжения воды $\sigma = 73 \text{ мН/м}$.

$$(\text{Ответ: } 7,3 \text{ см})$$



Рефлексия

1. На каком уровне усвоен вами материал? Обоснуйте ответ.
2. Какие разделы параграфа особенно заинтересовали вас?
3. Не задумывались ли вы над тем, какие эксперименты можно провести для подтверждения изученного материала?

§ 47. Кристаллические и аморфные тела



Ключевые понятия: аморфные тела, кристаллы, монокристаллы, поликристаллы, анизотропия кристаллов, виды кристаллических структур.

На этом уроке вы: познакомитесь с кристаллическими и аморфными телами и их свойствами; научитесь различать структуры кристаллических и аморфных тел на примере различных твердых тел; описывать влияние дефектов решетки в кристаллах на свойства твердых тел.

Сходства и отличия. В физике твердыми обычно называют только кристаллические тела. Аморфные тела, хотя и могут быть твердыми в обыденном смысле, рассматриваются как очень вязкие жидкости. Они не имеют определенной температуры плавления, при нагревании постепенно размягчаются, вязкость их уменьшается. Кристаллические тела имеют определенную температуру плавления, неизменную при постоянном давлении. Свойства аморфных тел одинаковы по всем направлениям: *аморфные тела изотропны*. Свойства кристаллов неодинаковы по различным направлениям: *кристаллы анизотропны*. Скорость распространения света, коэффициенты теплопроводности, модуль упругости и многие другие физические свойства кристалла зависят от их направления в нем.

Аморфные тела. В отличие от кристаллических тел, которые характеризуются дальним порядком, т. е. правильной повторяемостью расположения атомов на больших расстояниях, аморфные тела, подобно жидкостям, обладают лишь ближним порядком. Некоторые вещества могут находиться и в кристаллическом, и в аморфном состояниях. Пример такого вещества — двуокись кремния SiO_2 .

Особенно сильно отличаются кристаллические и аморфные тела по своим тепловым свойствам. Кристаллические тела обладают вполне определенной температурой плавления, а аморфные тела ее не имеют. При нагревании аморфное тело постепенно размягчается, его молекулы все легче и легче меняют “своих ближайших соседей”, вязкость его уменьшается, и при достаточно высокой температуре оно может вести себя как маловязкая жидкость. Следовательно, *твёрдые аморфные тела можно рассматривать как очень вязкие жидкости*. Они полностью изотропны.

Многие вещества могут быть переведены из аморфного состояния в кристаллическое, и наоборот. Так, обычное аморфное стекло после выдержки при определенной температуре “расстеклевывается” — превращается в мелкие кристаллики и становится мутным, непрозрачным.

Кристаллы. Обычно вещество называют *твёрдым*, если оно сохраняет свою форму и свой объем. Однако это лишь внешние признаки, характеризующие твердое состояние вещества. С физической точки

зрения наличие этих признаков не дает возможности четко разграничить твердое и жидкое состояния вещества.

При изучении твердых веществ было обнаружено, что многие твердые тела в природе имеют гладкие плоские поверхности, расположенные под определенными углами, а иногда и форму правильных многогранников. Такие твердые тела называют **моноокристаллами** (от греч. *моно* — “один”). Чаще всего они имеют очень маленькие размеры, хотя, например, моноокристаллы горного хрустала иногда бывают размером с человеческий рост.

Изучение внутреннего строения кристаллов с помощью рентгеновского излучения позволило установить, что частицы в кристаллах (молекулы, атомы, ионы) имеют правильное расположение, т. е. образуют **кристаллическую (пространственную) решетку**. Точки в кристаллической решетке, соответствующие наиболее устойчивому положению равновесия частиц твердого тела, называются **узлами решетки**.

Правильное расположение частиц в узлах решетки кристалла называют дальним порядком в расположении частиц.

Итак, в физике под **твердыми телами** подразумевают только такие вещества, у которых имеется кристаллическое строение. Иначе говоря, у твердого тела обязательно должен быть дальний порядок в расположении его частиц.

Пространственная решетка. Правильное расположение частиц в решетке кристалла является причиной **анизотропии кристаллов**: зависимость каких-либо свойств кристаллов от направления.

У многих кристаллов очень ярко выражена зависимость механической прочности кристалла от направления. Например, слюда легко расщепляется на пластинки, каменная соль раскалывается на кубики и т. д. Особенно заметна эта зависимость у графита. В каждом слое кристалла графита атомы углерода расположены в вершинах правильных шестиугольников (рис. 47.1), а расстояние между соседними слоями в 2,5 раза больше, чем расстояние между ближайшими атомами углерода в каждом слое. Поэтому слои в кристалле графита легко сдвигаются относительно друг друга. Соскальзыванием слоев графита мы пользуемся, когда пишем карандашом. Это же свойство графита позволяет применять его как смазочный материал (особенно часто его используют при высоких температурах).

Если на поверхность кристалла кварца нанести слой воска и коснуться концом сильно нагретой проволоки середины грани кристалла

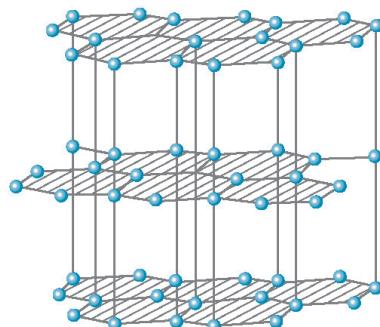


Рис. 47.1



Рис. 47.2

(рис. 47.2), то воск расплывается по эллипсу. Значит, теплопроводность кристалла кварца зависит от направления. Опыты показывают зависимость от направления и многих других свойств кристаллов.

Анизотропией обладают только монокристаллы. Большинство твердых веществ имеют *поликристаллическое строение* (от греч. *поли* — “много”), т. е. они состоят из

множества очень мелких кристалликов, иногда различимых только в микроскоп. Поскольку эти кристаллики относительно друг друга расположены хаотично, твердое тело в целом является изотропным, т. е. имеет одинаковые свойства по всем направлениям, хотя каждый отдельный кристаллик обладает анизотропией. Аморфные тела тоже изотропны, так как у них нет правильной пространственной решетки. Различие между поликристаллическими и аморфными телами в этом отношении заключается в том, что у поликристаллических тел всегда можно выделить достаточно малую часть тела, в которой обнаружится анизотропия, а аморфные вещества изотропны при любых размерах тела или его части.

Опыт показал, что идеального дальнего порядка в расположении частиц твердого вещества на практике никогда не встречается. Любые отступления от идеального порядка в кристалле называют *дефектами пространственной решетки*. Одним из важнейших дефектов решетки является нарушение правильного расположения частиц кристалла в каждый момент времени, обусловленное тепловым движением этих частиц.

Дефекты решетки в кристаллах сильно влияют на многие свойства твердых тел, например, на прочность, пластичность, электрическую проводимость и т. д.

Виды кристаллических структур. Различные типы кристаллов и возможное расположение узлов в пространственной решетке изучает *кристаллография*. В физике кристаллические структуры рассматривают не с точки зрения их геометрии, а по характеру сил, действующих между частицами кристалла, т. е. по типу связей между частицами, находящимися в узлах решетки кристалла. Различают четыре типичные кристаллические структуры: *ионную*, *атомную*, *молекулярную* и *металлическую*. Выясним, в чем заключается сущность различия между этими структурами.

Атомная кристаллическая структура характеризуется наличием нейтральных атомов в узлах решетки, между которыми имеется ковалентная связь. *Ковалентной* называется такая связь, при которой каждые два соседних атома удерживаются рядом силами притяжения, возникающими при взаимном обмене двумя валентными

электронами между этими атомами. Оба валентных электрона (по одному от каждого атома) обобществляются, т. е. принадлежат обоим атомам одновременно, и большую часть времени проводят между атомами, связывая их в молекулу (рис. 47.3, а, б). Примером такого рода молекул являются молекулы H_2 , N_2 и т. п. Ковалентная связь также соединяет в молекулы разные атомы: H_2O , NH_3 , SO_2 , CH_4 , SiO_2 и т. д.

Молекулярная кристаллическая структура отличается пространственной решеткой, в узлах которой находятся нейтральные молекулы вещества. Силами, удерживающими молекулы в узлах этой решетки, являются силы межмолекулярного взаимодействия.

Металлическая кристаллическая структура (рис. 47.4) отличается наличием в узлах решетки положительно заряженных ионов металла. У атомов всех металлов *валентные электроны*, т. е. наиболее удаленные от ядра, слабо связаны с атомами. Электронные облака таких периферийных электронов перекрывают сразу много атомов в кристаллической решетке металла. Это означает, что валентные электроны в кристаллической решетке металла не могут принадлежать одному и даже двум атомам, а обобществляются сразу многими атомами. Такие электроны практически могут беспрепятственно двигаться между атомами.

В первом приближении хаотическое движение свободных электронов в металле можно считать подобным движению молекул идеального газа. Поэтому *совокупность свободных электронов в металле иногда называют электронным газом и при расчетах применяют к нему формулы, выведенные для идеального газа*. Существованием электронного газа в металлах объясняются как высокая теплопроводность, так и высокая электрическая проводимость всех металлов.



Вопросы для самоконтроля

- Назовите свойства аморфных тел. Приведите примеры аморфных тел.
- Назовите свойства кристаллов. Приведите примеры кристаллических тел.
- Что называют монокристаллами?
- Какие точки в кристаллической решетке называются *узлами решетки*? Как они расположены?
- Какие дефекты кристаллических решеток вы знаете?
- Какие тела имеют *поликристаллическое строение*?
- Какие виды кристаллических структур вы знаете?

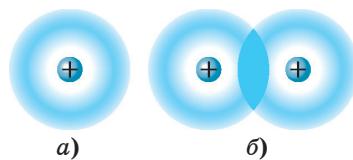


Рис. 47.3

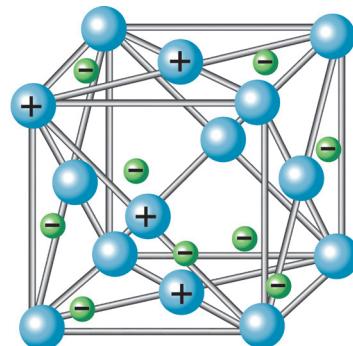


Рис. 47.4



Творческая мастерская

Наблюдайте

Рассмотрите под сильной лупой изломы разных металлов: чугуна, меди и т. п. Найдите в них грани мелких кристаллов, составляющих данный кусок металла.

Экспериментируйте

Приготовьте дома насыщенный раствор поваренной соли. Профильтруйте его и поставьте на несколько дней в теплое место. Из образовавшихся на дне сосуда кристаллов выберите наиболее крупный и прозрачный. Раствор еще раз профильтруйте и положите в него один выбранный кристалл для дальнейшего выращивания. Полученный через несколько дней кристалл принесите для демонстрации на урок физики.

Объясните

1. В чем заключаются сходство и различие кристаллических и аморфных тел?
2. Сколько типов кристаллических структур различают? Опишите каждый из них.
3. Почему металлы хорошо проводят электрический ток и тепло?
4. Где применяются кристаллы на практике?
5. Какое влияние на свойства кристаллов оказывают дефекты в строении кристаллической решетки?
6. Какими способами повышают прочность кристаллических тел?
7. Почему в мороз снег скрипит под ногами?

Анализируйте

1. Какие опыты доказывают правильность представлений об упорядоченном расположении частиц в кристалле?
2. Для чего выращивают искусственные кристаллы?
3. Скорость роста кристалла различна по разным направлениям. О чём говорит этот факт?



Рефлексия

1. На каком уровне усвоен вами материал? Обоснуйте ответ.
2. Какие разделы параграфа особенно заинтересовали вас?
3. Не задумывались ли вы над тем, какие эксперименты можно провести для подтверждения изученного материала?

§ 48. Механические свойства твердых тел



Ключевые понятия: деформация, абсолютная и относительная деформации, механическое напряжение, упругая и пластическая деформации.

На этом уроке вы: познакомитесь с видами деформации, модулем упругости, модулем Юнга; научитесь определять модуль Юнга при упругой деформации, применять формулы закона Гука, энергии упругодеформированного тела при решении задач.

Виды деформации. Изменение формы или объема тела под действием приложенных сил называется **деформацией**.

Если к торцам стержня приложить силы F_1 и F_2 , направленные вдоль его оси, но в противоположные стороны, то он будет или растягиваться, или сжиматься. Пунктиром отмечены начальные размеры тела. Увеличение длины тела под действием сил, растягивающих его в одном направлении, называется **деформацией продольного растяжения** (рис. 48.1, а). Уменьшение длины тела под действием сил, сжимающих его в одном направлении, называется **деформацией продольного сжатия** (рис. 48.1, б). При этих деформациях одновременно происходит небольшое изменение площади поперечного сечения тела.

Увеличение объема тела под действием сил, растягивающих его по всем направлениям, называется **деформацией всестороннего растяжения**. Уменьшение объема тела под действием сил, сжимающих его по всем направлениям, называется **деформацией всестороннего сжатия**.

Если закрепить один конец стержня, а к свободному концу приложить силу F , перпендикулярную оси (рис. 48.2, а), то стержень изгибаются. Стержень на двух опорах под действием поперечной силы F , приложенной между опорами, прогибается (рис. 48.2, б). Изгиб стержня под действием сил, перпендикулярных его оси, называется **деформацией поперечного изгиба**. При изгибе выпуклая сторона стержня удлиняется (растягивается), а вогнутая — укорачивается (сжимается).

Прикладывая к торцам стержня две пары сил, поворачивающих торцы в противоположные стороны (рис. 48.3), можно обнаружить скручивание стержня. При этом

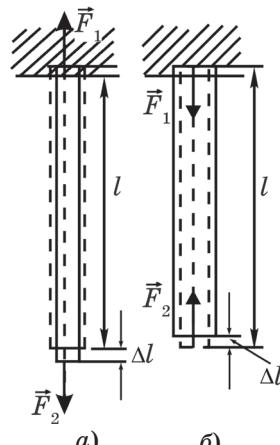


Рис. 48.1

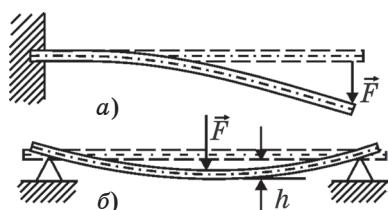


Рис. 48.2

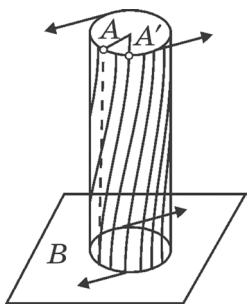


Рис. 48.3

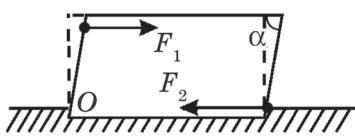


Рис. 48.4

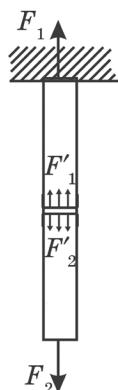


Рис. 48.5

ной деформацией называется физическая величина, показывающая, какую часть от первоначального размера тела a составляет абсолютная деформация Δa :

$$\varepsilon = \frac{\Delta a}{a}. \quad (48.1)$$

Например, при одностороннем растяжении (сжатии) получим:

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l}. \quad (48.2)$$

При сдвиге относительной деформацией служит $\operatorname{tg}\alpha$ (рис. 48.4):

$$\varepsilon = \operatorname{tg}\alpha. \quad (48.3)$$

Механическое напряжение. Выделим мысленно в деформированном стержне, изображенном на рисунке 48.1, a , тонкий слой, перпендикулярный оси стержня (рис. 48.5). Он разделит стержень на две части. Поскольку все части стержня находятся в равновесии, верхняя часть

происходит поворот верхних слоев стержня относительно нижних. *Поворот параллельных слоев тела относительно друг друга под действием двух пар сил называется деформацией кручения.*

Закрепим бруск и приложим к нему силу F_1 , стремящуюся его сдвинуть (рис. 48.4). В месте закрепления бруска возникает такая же по модулю и обратная по направлению сила F_2 . Действие этих сил вызовет перекос бруска на некоторый угол α . При этом верхние слои бруска сдвигаются относительно нижних. *Сдвиг параллельных слоев тела относительно друг друга под действием сил, параллельных этим слоям, называется деформацией сдвига.*

Каждая из описанных выше деформаций может быть большой или маленькой. Любую из них можно оценивать *абсолютной деформацией* Δa — числовое изменение какого-либо размера тела под действием сил. Например, при одностороннем растяжении (сжатии) тела абсолютной деформацией является изменение длины тела Δl (рис. 48.5), при всестороннем растяжении (сжатии) — изменение объема ΔV и т. д.

Однако более наглядной оценкой изменения объема или формы тела под действием приложенных сил является *относительная деформация* ε (греч. эпсилон). *Относительной деформацией называется физическая величина, показывающая, какую часть от первоначального размера тела a составляет абсолютная деформация Δa :*

действует на выделенный слой с силой F'_1 , равной F_1 (если пренебречь весом стержня), а нижняя часть — с силой F'_2 , равной F_2 . Эти силы, возникающие внутри деформируемого тела, называются *внутренними силами*. Они вызывают деформацию каждого элемента тела (в нашем примере — растяжение).

Если стержень однородный и внешние силы F_1 и F_2 действуют по оси стержня, то внутренние силы F'_1 и F'_2 распределены по площади поперечного сечения S равномерно. *Величина, характеризующая действие внутренних сил в деформированном твердом теле, называется механическим напряжением.*

Механическое напряжение характеризуется внутренней силой, действующей на единицу площади сечения деформированного тела:

$$\sigma = \frac{F}{S}. \quad (48.4)$$

Выведем единицу механического напряжения σ в СИ:

$$[\sigma] = [F/S] = 1 \text{ Н}/1 \text{ м}^2 = 1 \text{ Н}/\text{м}^2 = 1 \text{ Па}.$$

В СИ за единицу механического напряжения принимается *такое механическое напряжение в материале, при котором на площадь сечения 1 м² действует внутренняя сила 1 Н.*

Упругость, пластичность, хрупкость и твердость. Свойство деформированных тел принимать свою первоначальную форму и свой объем после прекращения действия внешних сил называется упругостью. Деформация тела, которая исчезает после снятия внешних нагрузок на это тело, называется упругой деформацией.

Опыт показывает, что тело можно деформировать настолько, что оно не восстановит свою прежнюю форму, когда внешние воздействия на него исчезнут. *Свойство тел сохранять деформацию после снятия внешних нагрузок называют пластичностью. Остаточная деформация тела, которая сохраняется после снятия внешних нагрузок на тело, называется пластической деформацией.*

Упругость (пластичность) тел в основном определяется материалом, из которого они сделаны. Например, сталь и резина упруги, а медь и воск пластичны. Деление материалов на *упругие* и *пластичные* условно, так как каждый материал в большинстве случаев обладает одновременно и пластичностью, и упругостью. Например, стальную пружину можно растянуть так, что она уже не сожмется. С другой стороны, медная спираль при небольших растяжениях пружинит (т. е. сжимается, если ее отпустить). Опыт показывает, что обычно при постепенном увеличении нагрузок на материал в теле сначала возникают упругие деформации, а затем появляются пластические деформации. Кроме того, свойства материала сильно зависят от внешних условий. Например, обычно пластичный свинец при низких температурах становится упругим, а упругая сталь при очень больших давлениях или высоких температурах становится пластичной.

Важными механическими свойствами материалов, которые приходится учитывать в машиностроении, являются *хрупкость* и *твердость*. *Хрупкими* (например, стекло, кирпич, керамика) называются такие материалы, которые при относительно небольших нагрузках упруго деформируются, а при увеличении внешней нагрузки разрушаются прежде, чем у них появится остаточная деформация.

Твердость материала можно определить различными способами. Обычно более *твёрдым* считается тот материал, который оставляет царапины на поверхности другого материала. Очень твёрдым материалом является алмаз. Из него изготавливают стеклорезы.

Закон Гука. Модуль упругости. Связь между упругими деформациями и внутренними силами в материале впервые была установлена английским ученым Р.Гуком. **Закон Гука** формулируется так: *механическое напряжение в упруго деформированном теле прямо пропорционально относительной деформации этого тела:*

$$\sigma = k\epsilon. \quad (48.5)$$

Закон Гука — это экспериментальный закон.

Величина *k*, характеризующая зависимость механического напряжения в материале от рода последнего и от внешних условий, называется *модулем упругости*. Модуль упругости измеряется механическим напряжением, которое должно возникнуть в материале при относительной упругой деформации, равной единице.

Единицей модуля упругости в СИ является **1 Па (паскаль)**.

Рассмотрим в качестве примера применение закона Гука к деформации одностороннего растяжения или сжатия. Формула (48.5) для этого случая принимает вид:

$$\sigma_h = E\epsilon, \text{ или } \sigma_h = E \frac{\Delta l}{l}, \quad (48.6)$$

где *E* — модуль упругости для этого вида деформации; его называют *модуль Юнга*. Модуль Юнга измеряется нормальным напряжением, которое должно возникнуть в материале при относительной деформации, равной единице, т. е. при увеличении длины образца вдвое ($\Delta l = l$). Числовое значение модуля Юнга рассчитывают экспериментально и заносят в таблицу.

Поскольку $\sigma_h = \frac{F}{S}$, из (48.6) получаем: $\frac{F}{S} = E \frac{\Delta l}{l}$, откуда $F = \frac{E \cdot S}{l} \Delta l$.

Величину $\frac{E \cdot S}{l} = k$ назвали *коэффициентом упругости тела*, или его *жесткостью*. По третьему закону Ньютона $F_{\text{упр}} = -F$, т. е.

$$F_y = -k\Delta l \quad (\text{закон Гука}). \quad (48.7)$$

Наибольшее напряжение в материале, после исчезновения которого форма и объем тела восстанавливаются, называется пределом упругости. Формулы (48.5) и (48.7) справедливы, когда не перейден

предел упругости. При достижении предела упругости в теле возникают пластические деформации. В этом случае может наступить момент, когда при одной и той же нагрузке деформация начнет возрастать, и материал разрушается. Нагрузку, при которой в материале возникает наибольшее возможное механическое напряжение, называют разрушающей.

При постройке машин и сооружений всегда создают запас прочности. Запасом прочности называется величина, показывающая, во сколько раз фактическая максимальная нагрузка в самом напряженном месте конструкции меньше, чем разрушающая нагрузка.

Энергия упругодеформированного тела. Для того, чтобы упруго деформировать тело, нужно совершить работу. За счет этой работы деформированное тело приобретает потенциальную энергию $E_{\text{п}}$ и само может совершить работу A . В пределах упругой деформации можно считать, что $E_{\text{п}} = A$.

Из выражения (48.7) следует, что сила F , растягивающая или сжимающая стержень (рис. 48.6), пропорциональна абсолютной деформации Δl :

$$F = k\Delta l. \quad (48.8)$$

График этой зависимости показывает, что работа A , затраченная на растяжение или сжатие стержня на Δl , численно будет равна площади треугольника AOB (рис. 48.6), т. е.

$$A = \frac{F\Delta l}{2}, \quad W_{\text{п}} = \frac{F\Delta l}{2}. \quad (48.9)$$

Так как при упругой деформации $W_{\text{п}} = A$, то, подставив значение силы F из формулы (48.8), получим:

$$W_{\text{п}} = \frac{k(\Delta l)^2}{2}. \quad (48.10)$$

Таким образом, потенциальная энергия упругодеформированного тела прямо пропорциональна квадрату абсолютной деформации.



Вопросы для самоконтроля

1. Какие виды деформации вы знаете? Приведите примеры.
2. Что называют абсолютной и относительной деформациями?
3. Что называется механическим напряжением?
4. Какие свойства материалов вы знаете?
5. Какая величина называется модулем упругости? Чем измеряется модуль упругости?
Что является единицей модуля упругости?
6. Сформулируйте Закон Гука.
7. Что называется пределом упругости?

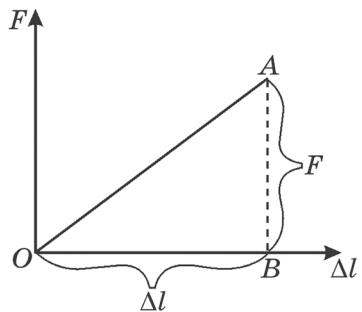


Рис. 48.6

Примеры решения задач

1. Температура воздуха в комнате 20°C . Точка росы 12°C . Какова абсолютная и относительная влажность воздуха и какое количество водяного пара находится в комнате, объем которой 100 м^3 ?

Дано:

$$t_1 = 20^{\circ}\text{C}$$

$$t_2 = 12^{\circ}\text{C}$$

$$V = 100 \text{ м}^3$$

$$\rho - ? \quad m - ?$$

$$\varphi - ?$$

Решение. Из таблицы находим, что при $t_2 = 12^{\circ}\text{C}$ абсолютная влажность $\rho = 10,7 \cdot 10^{-3} \text{ кг}/\text{м}^3$. Для насыщения воздуха при 20°C необходимо количество водяного пара $\rho_{\text{н}} = 17,3 \cdot 10^{-3} \text{ кг}/\text{м}^3$. Отсюда относительная влажность

$$\varphi = \frac{\rho}{\rho_{\text{н}}} = \frac{10,7 \cdot 10^{-3}}{17,3 \cdot 10^{-3}} = 0,62; \quad \varphi = 62\%.$$

Количество пара, находящегося в воздухе, $m = \rho V$.

Следовательно, $m = 10,7 \cdot 10^{-3} \text{ кг}/\text{м}^3 \cdot 100 \text{ м}^3 = 1,07 \text{ кг}$.

2. Точка росы 5°C . Сколько водяного пара может испариться в $1,0 \text{ м}^3$ воздуха, температура которого 23°C ?

Дано:

$$t_1 = 5^{\circ}\text{C}$$

$$t_2 = 23^{\circ}\text{C}$$

$$V = 1 \text{ м}^3$$

$$\Delta m - ?$$

Решение. Для определения количества водяного пара, который может испариться в 1 м^3 воздуха, надо знать массу водяного пара m_1 , уже имеющегося в воздухе, и массу водяного пара m_2 , который мог бы насыщать этот воздух при температуре t_1 :

$$\Delta m = m_2 - m_1 = (\rho_2 - \rho_1)V = \Delta\rho V.$$

Из таблицы зависимости плотности насыщенного пара от температуры находим, что при $t_1 = 5^{\circ}\text{C}$, $\rho_1 = 6,8 \cdot 10^{-3} \text{ кг}/\text{м}^3$; при $t_2 = 23^{\circ}\text{C}$, $\rho_2 = 20,6 \cdot 10^{-3} \text{ кг}/\text{м}^3$, тогда $\Delta\rho = 13,8 \cdot 10^{-3} \text{ кг}/\text{м}^3$. Отсюда $\Delta m = 13,8 \text{ г}$ — такое количество водяного пара может испариться в 1 м^3 воздуха при температуре 23°C .

3. При температуре 10°C относительная влажность 80% . Как изменится относительная влажность, если повысить температуру до 20°C ?

Дано:

$$t_1 = 10^{\circ}\text{C}$$

$$t_2 = 20^{\circ}\text{C}$$

$$\varphi_1 = 0,8$$

$$\varphi_2 - ?$$

Решение. Из формулы $\varphi_1 = \frac{\rho}{\rho_{\text{н}}}$ находим, что $\rho = \varphi_1 \cdot \rho_{\text{н}}$. По таблице зависимости плотности насыщенного пара от температуры устанавливаем: при $t_1 = 10^{\circ}\text{C}$, $\rho_{\text{н}} = 9,4 \cdot 10^{-3} \text{ кг}/\text{м}^3$, то

$$\rho = 9,4 \cdot 10^{-3} \cdot 0,8 = 7,52 \cdot 10^{-3} \text{ кг}/\text{м}^3.$$

При $t_2 = 20^{\circ}\text{C}$, $\rho_{\text{н}_2} = 17,3 \cdot 10^{-3} \text{ кг}/\text{м}^3$, поэтому $\varphi_2 = \frac{\rho}{\rho_{\text{н}_2}}$;



$$\varphi_2 = \frac{7,52 \cdot 10^{-3} \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}}{17,3 \cdot 10^{-3} \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}} = 0,43; \quad \varphi_2 = 43\%.$$

Относительная влажность уменьшится на $\Delta\varphi = \varphi_1 - \varphi_2 = 37\%$.

4. Какую энергию необходимо затратить на образование поверхности мыльного пузыря радиусом $r = 6$ см при постоянной температуре?

Дано:

$$r = 6 \text{ см} = 6 \cdot 10^{-2} \text{ м}$$

$$\sigma = 0,04 \text{ Н/м}$$

$$W - ?$$

Решение. Энергия, затрачиваемая на образование поверхности пузыря, $W = \sigma S$, где σ — коэффициент поверхностного натяжения мыльной пленки; S — сумма площадей внутренней и внешней поверхности сферической пленки.

Так как пленка тонкая, то радиус внешней и внутренней поверхности одинаков, т. е. $S = 2 \cdot 4\pi r^2$ или $S = 8\pi r^2$. Таким образом, $W = 8\pi\sigma \cdot r^2$.

$$W = 8 \cdot 3,14 \cdot 0,04 \frac{\text{Н}}{\text{м}} \cdot 36 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2 = 3,6 \cdot 10^{-3} \text{ Дж} = 3,6 \text{ мДж.}$$

5. При слиянии мелких капель воды одинакового размера в одну большую каплю радиусом 4 мм освобождается энергия 14 мДж. Определите радиус малой капли.

Дано:

$$R = 4 \text{ мм} = 4 \cdot 10^{-3} \text{ м}$$

$$\Delta W = 1,4 \cdot 10^{-2} \text{ Дж}$$

$$\sigma = 0,073 \text{ Н/м}$$

$$r - ?$$

Решение. Количество энергии, выделяемое в результате уменьшения поверхности при слиянии капель: $\Delta W = \sigma(S_2 - S_1)$, где σ — коэффициент поверхностного натяжения воды; $S_2 = 4\pi R^2 n$ — общая поверхность всех n малых капель; $S_1 = 4\pi R^2$ — поверхность большой капли.

Из соотношения (сумма объемов малых капель равна объему большой капли) $\frac{4}{3}\pi r^3 \cdot n = \frac{4}{3}\pi R^3$ найдем число малых капель n : $n = \frac{R^3}{r^3}$.

Подставляя соответственно значение для ΔW , получим:

$$\Delta W = 4\pi R^2 \left(\frac{R}{r} - 1 \right) \cdot \sigma,$$

откуда

$$r = \frac{4\pi R^3 \sigma}{\Delta W + 4\pi R^2 \sigma}; \quad r = \frac{4 \cdot 3,14 \cdot 64 \cdot 10^{-9} \cdot 0,073}{1,4 \cdot 10^{-2} + 4 \cdot 3,14 \cdot 16 \cdot 10^{-6} \cdot 0,073} \approx 4,2 \cdot 10^{-6} \text{ м.}$$

6. При пропускании через пипетку 4 см^3 жидкого масла получено 304 капли. Диаметр отверстия кончика пипетки 1,2 мм, плотность масла $0,9 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$. Найдите коэффициент поверхностного натяжения масла.

Дано:

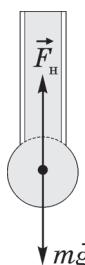
$$V = 4 \text{ см}^3 = 4 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3$$

$$n = 304$$

$$d = 1,2 \text{ мм} = 1,2 \cdot 10^{-3} \text{ м}$$

$$\rho = 0,9 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$$

$$\sigma — ?$$



Массу капли m_0 найдем так:

$$m_0 = \frac{m}{n} = \frac{\rho V}{n},$$

где V — объем вытекающего масла; n — число капель; m — масса вытекающей жидкости; ρ — ее плотность. Таким образом,

Рис. 48.7 $\sigma = \frac{m_0 g}{\pi d}$, или $\sigma = \frac{\rho g V}{\pi d n}$; $\sigma = \frac{0,9 \cdot 10^3 \cdot 9,8 \cdot 4 \cdot 10^{-6}}{3,14 \cdot 1,2 \cdot 10^{-3} \cdot 304} = 0,03 \text{ Н/м}$.

7. В бензол опущен капилляр с внутренним диаметром 0,4 мм. Определите вес бензола, вошедшего в капилляр.

Дано:

$$r = 0,2 = 2 \cdot 10^{-4} \text{ м}$$

$$\sigma = 0,03 \text{ Н/м}$$

$$P — ?$$

Решение. Вес бензола, вошедшего в капилляр, $P = mg = \rho V = \rho g \pi r^2 h$, где m — масса вошедшего в капилляр бензола; r — внутренний радиус капилляра. Высота поднятия бензола в капилляре: $h = \frac{2\sigma}{\rho gr}$.

Подставив значение h в выражение для P , получим $P = 2\pi r \sigma$;

$$P = 2 \cdot 3,14 \cdot 2 \cdot 10^{-4} \cdot 0,03 \approx 3,8 \cdot 10^{-5} \text{ Н.}$$



Творческая мастерская

Наблюдайте

Рассмотрите, как изменится удлинение, если, не меняя нагрузки, проволоку заменить другой из такого же материала, имеющей вдвое большие длину и диаметр.

Исследуйте

1. Испытайте различие в прогибах, которое получается, если нагрузить одним и тем же грузом тетрадь, положенную на две опоры плашмя, и ту же тетрадь, свернутую трубкой.
2. Проверьте на твердость имеющиеся под рукой материалы (сталь, свинец, стекло, дерево и т. п.) и расположите их в ряд по убывающей твердости.

Творите

Придумайте задачу практического содержания на определение запаса прочности материала.

Решайте

1. Какие силы надо приложить к концам стальной проволоки длиной 4 м и сечением $0,5 \text{ мм}^2$ для удлинения ее на 2 мм?

(Ответ: 52,5 Н)

2. Во сколько раз изменится абсолютное удлинение проволоки, если, не меняя нагрузку, заменить проволоку другой — из того же материала, но имеющей вдвое большую длину и в два раза больший диаметр?

(Ответ: удлинение уменьшится в 2 раза)

3. К алюминиевой проволоке длиной 2 м и площадью поперечного сечения 4 мм^2 подвесили груз, под действием которого она удлинилась на 1 мм. Определите силу упругости, возникающую в проволоке. Модуль упругости алюминия $7,1 \cdot 10^{10} \text{ Па}$.

(Ответ: 142 Н)

4. Найдите максимальную высоту здания из кирпича, если предел прочности кирпича на сжатие $1,5 \cdot 10^7 \text{ Па}$, плотность кирпича $1,8 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$, а необходимый запас прочности равен 6.

(Ответ: 250 м)



Рефлексия

1. На каком уровне усвоен вами материал? Обоснуйте ответ.
2. Какие разделы параграфа особенно вас заинтересовали?
3. Не задумывались ли вы над тем, какие эксперименты можно провести для подтверждения изученного материала?



САМОЕ ВАЖНОЕ

Самое важное в главе

9

Вещество в природе может находиться в пяти агрегатных состояниях (фазах): *твердом, жидким, газообразном, плазменном и нейтронном.*

Атмосферный воздух представляет собой смесь различных газов и водяного пара. Для количественной оценки влажности воздуха введены *абсолютная и относительная влажность*. Под *относительной влажностью* понимают физическую величину, показывающую, сколько процентов составляет абсолютная влажность от плотности насыщенного водяного пара при этой же температуре: $\phi = \frac{p}{p_n} 100\%$, или $\phi = \frac{p}{p_n} 100\%$, где p — парциальное давление водяного пара; p_n — давление насыщенного пара при этой же температуре. Большое значение уровней влажности имеет в библиотеках, книгохранилищах, музеях, овоще- и зернохранилищах, метеорологии для прогнозирования погоды.

Влажность воздуха измеряют с помощью *гигрометров и психрометров*.

Для вещества, находящегося в жидкой фазе, характерно отсутствие кристаллической решетки, наличие поверхностного слоя с избыточной энергией, равной $\Delta W = \sigma S$, где σ — коэффициент поверхностного напряжения; S — площадь поверхностного слоя.

Вдоль поверхности жидкости действуют силы поверхностного напряжения, стремящиеся сократить эту поверхность $F = \sigma l$, где l — длина свободной поверхности жидкости. Из-за действия сил поверхностного напряжения на границе жидкости и твердого тела возникает явление смачивания или несмачивания, что приводит к искривлению поверхности жидкости на границе с твердым телом (образуется мениск). Над искривленной поверхностью жидкости возникает дополнительное давление, которое называется *давлением Лапласа*: $p_\mu = \frac{2\sigma}{R}$.

Из-за явления смачивания или несмачивания жидкость в узких трубках (капиллярах) будет подниматься или опускаться на высоту $h = \frac{2\sigma \cos \theta}{pgR}$, где θ — краевой угол.

Под действием внешней силы твердые тела *деформируются*. Деформации бывают *упругие и пластичные*.

Упругие деформации подчиняются закону Гука: механическое напряжение в упругодеформированном теле прямо пропорционально относительной деформации этого тела:

$$\sigma = E\varepsilon,$$

или сила упругости, возникающая в теле, прямо пропорциональна абсолютной деформации тела:

$$F_{upr.} = -k\Delta l.$$



Лабораторная работа № 1

Определение ускорения тела, движущегося по наклонной плоскости

Приборы и материалы: шарик, желоб лабораторный, секундомер, линейка, металлический цилиндр.

Ход работы:

1. Подготовка приборов и материалов.

1.1 Определите цену деления линейки.

1.2 Определите абсолютную погрешность измерения длины с помощью линейки.

1.3 Проделайте те же действия с секундомером.

1.4 Соберите установку, как показано на рисунке 1.

1.5 Желоб расположите так, чтобы время движения шарика по нему было не менее трех секунд.

2. Определение характера движения тела. Наблюдение прямолинейного равноускоренного движения тела.

2.1 На желобе отметьте перемещения шарика за одну, две, три секунды. Для этого сделайте несколько пусков шарика, и, передвигая металлический цилиндр, добейтесь движения шарика в течение одной, двух и трех секунд.

2.2 Определите модули перемещения шарика за первую, вторую и третью секунды.

2.3 Сравните модули перемещения шарика за равные промежутки времени.

2.4 Ответьте на вопросы:

а) Равномерно или неравномерно двигался шарик по наклонному желобу?

б) На основании чего вы сделали такой вывод?

3. Определение модуля средней скорости тела при прямолинейном неравномерном движении.

3.1 Измерьте время движения шарика по желобу.

3.2 Измерьте модуль перемещения шарика относительно желоба.

3.3 Вычислите модуль средней скорости шарика.

3.4 Вычислите абсолютную и относительную погрешность определения модуля средней скорости шарика.

3.5 Запишите данные в таблицу.

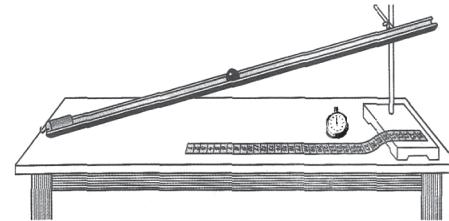


Рис. 1

4. Определение ускорения тела, движущегося по наклонной плоскости.

4.1 Измерьте время движения шарика по желобу.

4.2 Измерьте модуль перемещения шарика относительно желоба.

4.3 Вычислите модуль средней скорости шарика.

4.4 Вычислите абсолютную и относительную погрешность определения модуля средней скорости шарика.

4.5 Запишите данные в таблицу.

5. Сделайте выводы.

Лабораторная работа № 2

Исследование зависимости дальности полета тела от угла бросания

Оборудование: 1) пистолет баллистический лабораторный; 2) лента измерительная с сантиметровыми делениями; 3) два-три листа писчей и один лист копировальной бумаги; 4) липкая лента.

Теория

При стрельбе на горизонтальной поверхности под различными углами к горизонту дальность полета снаряда выражается формулой

$$l = \frac{2v_0^2 \cos \alpha \sin \alpha}{g} = \frac{v_0^2 \sin 2\alpha}{g}.$$

Из этой формулы следует, что при изменении угла вылета снаряда от 90° до 0° дальность его падения сначала увеличивается от нуля до некоторого максимального значения, а затем снова уменьшается до нуля. Дальность падения снаряда максимальна, когда произведение $\cos \alpha \sin \alpha$ наибольшее. Эту зависимость в данной работе следует проверить на опыте с помощью баллистического пистолета, изображенного на рисунке 2.

Пистолет представляет собой спиральную пружину 1 со стержнем вдоль оси, укрепленную на скобе 2 с угломером 3. На стержень наса-

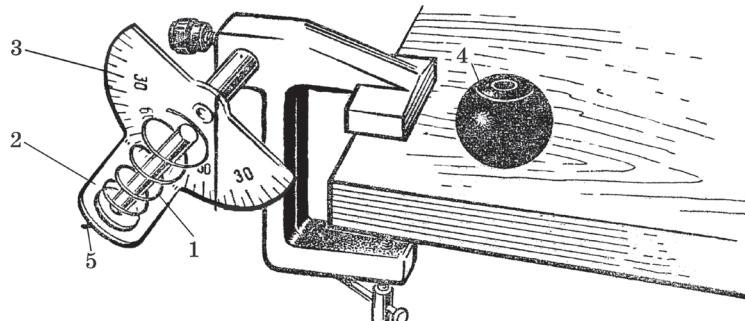


Рис. 2

живается специальный шарик 4, в котором имеется сквозной канал. При насаживании шарика пружину сжимают и зацепляют шарик за спусковой крючок в основании стержня. Если нажать на выступающую часть 5 спускового крючка, то шарик освобождается и под действием пружины двигается вдоль стержня в заданном направлении.

Модуль скорости вылета шарика v_0 следует принять одинаковым для всех опытов.

На столе в месте падения шарика надо закрепить двумя кусочками липкой ленты полосу бумаги, а сверху положить листок копировальной бумаги. При падении шарика на бумаге остается хорошо заметный след.

Ход работы:

1. Начертите в тетради таблицу для записи результатов измерений и вычислений (табл. 1).

Таблица 1

Угол вылета шарика α° ,	20	30	40	45	50	60	70
Средняя дальность полета шарика l , см							

2. Ознакомьтесь с устройством и действием баллистического пистолета.

3. На краю стола закрепите струбцину с баллистическим пистолетом и установите пистолет с помощью угломера под углом 45° . Не накладывая бумагу, произведите пробный выстрел и заметьте приблизительно место падения шарика. Закрепите на столе полосу бумаги так, чтобы при стрельбе под углом 45° шарик падал у ее дальнего конца, и наложите копировальную бумагу (для фиксации выстрелов).

4. Установливая пистолет под углом 20° , 30° , 40° , 45° , сделайте по три-четыре выстрела в каждом положении. Следы падения шарика обведите карандашом и рядом отметьте углы бросания.

5. Поверните пистолет немного в сторону, устанавливая его под углом 50° , 60° , 70° , и снова произведите по три-четыре выстрела. Возле каждого следа падения шарика опять запишите значение угла бросания.

6. Измерьте среднюю дальность падения шарика для каждого угла. Результаты измерений запишите в таблицу.

Лабораторная работа № 3

Изучение движения тела, скатывающегося по наклонному желобу

Оборудование: 1) штатив; 2) лоток дугообразный; 3) шары, разные по диаметру и массе; 4) линейка измерительная; 5) отвес; 6) бумага копировальная.

Теория

Момент инерции шара можно определить, зная кинетическую энергию вращающегося тела и его угловую скорость:

$$W_{\text{вр}} = \frac{J\omega^2}{2}, \quad J = \frac{2W_{\text{вр}}}{\omega^2}. \quad (1)$$

Шар в точке *A* (рис. 3) обладает потенциальной энергией mgh относительно горизонтального уровня *B*. При скатывании шара по желобу его потенциальная энергия преобразуется в кинетическую энергию поступательного движения тела $W_{\text{п}}$ и кинетическую энергию вращательного движения тела $W_{\text{вр}}$. Для шара в точке *B* выполняется уравнение:

$$mgh = W_{\text{п}} + W_{\text{вр}}.$$

Отсюда

$$W_{\text{вр}} = mgh - \frac{mv^2}{2}, \quad J = \frac{2W_{\text{вр}}}{\omega^2} = \frac{m(2gh - v^2)}{\omega^2},$$

где v — линейная скорость центра масс шара; ω — угловая скорость его вращения в точке *B*. Так как линейная скорость центра масс относительно желоба и линейная скорость максимально удаленных от оси вращения точек на поверхности шара относительно центра масс равны между собой, то можно записать:

$$\omega = \frac{v}{R},$$

где R — радиус шара.

Тогда для момента инерции шара получим выражение:

$$J = mR^2 \left(\frac{2gh}{v^2} - 1 \right). \quad (2)$$

Линейную скорость центра масс шара v в точке *B* можно определить, зная дальность l и время t полета шара до поверхности стола:

$$v = \frac{l}{t}.$$

Время полета найдем из соотношения:

$$H = \frac{gt^2}{2},$$

откуда

$$t = \sqrt{\frac{2H}{g}}.$$

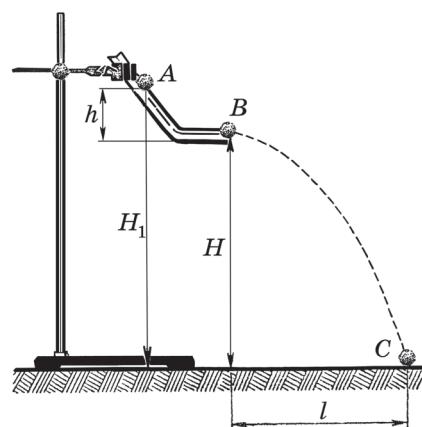


Рис. 3

Следовательно,

$$v = \frac{l}{\sqrt{2 \frac{H}{g}}}. \quad (3)$$

Подставим значения из формулы (13.3) в (13.2) и получим:

$$J = \frac{mR^2 (4hH - l^2)}{l^2}. \quad (4)$$

Таким образом, для определения момента инерции шара необходимо измерить высоту H горизонтального участка лотка над поверхностью стола, высоту h шара над горизонтальным участком лотка в начале скатывания и расстояние l по горизонтали, которое пролетает шар при падении с высоты H . Место падения шара на стол можно отмечать с помощью листа копировальной бумаги, накладываемой на лист белой бумаги.

Ход работы продумайте сами. В отчете опишите последовательность своих действий и сделайте выводы.

Лабораторная работа №4

Сложение сил, направленных под углом друг к другу

Оборудование: штативы 2 шт., динамометры — 3 шт., два штатива с муфтой и лапкой, два подвижных блока, нитка, набор грузов

Теория работы

Если на тело действуют несколько сил, то можно найти их сумму, сложив их векторно: $\vec{F} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2$.

Проще всего найти сумму сил, если они действуют вдоль одной прямой. В этом случае сумма сил будет равна либо сумме сил (силы направлены в одну сторону), либо их разности (силы направлены в противоположные стороны):

$$F = F_1 + F_2 \text{ или } F = F_1 - F_2.$$

Если же силы направлены под углом, то их сумму находят, используя правило сложения векторов либо правило треугольника, либо правило параллелограмма (рис. 4).

Ход работы

1. Возьмите два любых грузика из набора грузов и с помощью динамометра измерьте вес каждого из них.

2. Подвесьте оба грузика к динамометру и определите их общий вес.

3. Сделайте вывод о соотношении результирующей силы и весов каждого грузика.

4. Соберите установку (см. рис. 4). Для этого укрепите в штативах подвижные блоки, перекиньте через них нить с закрепленными на ее концах одинаковыми грузами по 100 г, а к середине нити прикрепите динамометр. Позади установки укрепите картон.

5. Добейтесь равновесия.

6. На картоне карандашом отметьте расположение нити.

7. Выберите масштаб и начертите расположение сил, действующих на нить в точке прикрепления динамометра.

8. Найдите векторную сумму сил F_1 и F_2 и убедитесь, что она представляет собой вектор, противоположный вектору F . Для этого спроектируйте векторы сил F_1 и F_2 на вертикальную ось и найдите сумму проекций этих сил: $F_1 \cos \alpha + F_2 \cos \alpha$. Сравните ее с вектором результирующей силы F .

9. Значения $\cos \alpha = \frac{a}{l_1}$, а $\cos \alpha = \frac{a}{l_2}$ (см. рис. 4).

10. Сделайте вывод.

11. Измените точку подвеса динамометра, сместив ее вправо. Снова добейтесь равновесия, стараясь избежать проскальзывания динамометра.

12. Повторите расчеты, указанные в пунктах 7—9.

13. Еще раз перенесите точку подвеса динамометра и проведите новые расчеты.

14. Подвесив к левой нити груз вдвое большей массы, чем к правому концу нити, повторите опыты и расчеты.

15. Сделайте выводы.

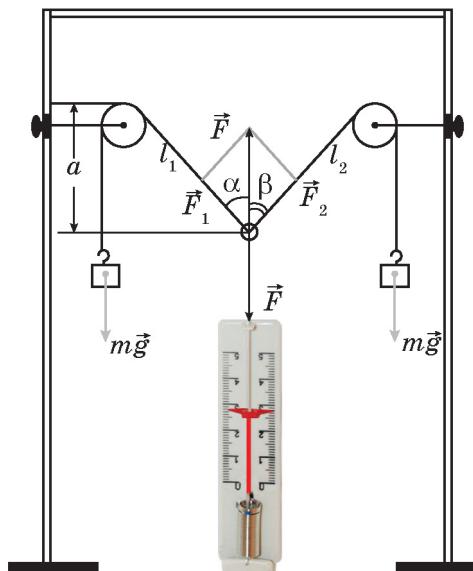


Рис. 4

Лабораторная работа №5

Исследование зависимости скорости шарика от его радиуса при движении в вязкой жидкости

Цель работы: найти зависимость скорости шарика, исследовать зависимость скорости равномерного падения шарика в вязкой жидкости от радиуса шарика

Оборудование: сосуд с водой высотой 50—70 см, лента измерительная, секундомер, пластилин

Теория работы

Возьмем пластилиновый шарик и опустим его в воду. Он начнет падать сначала ускоренно, а затем сила внутреннего трения жидкости, которая быстро возрастет, уравновесит вес шарика в жидкости и шарик будет падать равномерно. Движение шарика происходит под действием трех сил: силы тяжести, силы Архимеда и силы внутреннего трения (см. рис. 5). Запишем второй закон Ньютона для случая равномерного движения шарика: $mg - F_A - F_c = 0$, так как

$m = \rho V = \rho \frac{4}{3} \pi R^3$, а $F_A = \rho_0 q \frac{4}{3} \pi R^3$ и $F_c = 6\pi R \eta u$, то получим, что скорость равномерного движения шарика связана с его радиусом так:

$$u = \frac{2(\rho - \rho_0)g}{9\eta} R^2. \quad (1)$$

В этих формулах ρ и ρ_0 — плотности вещества шарика и жидкости, соответственно, η — коэффициент вязкости, R — радиус шарика, u — скорость равномерного движения шарика.

Ход работы

1. Определите плотность пластилина методом гидростатического взвешивания:

$$\rho = \rho_0 \frac{P_1 - P_2}{P_1}. \quad (2)$$

2. Постройте график зависимости скорости движения пластилинового шарика в воде от квадрата радиуса, используя формулу (1), справочные данные (плотность воды $\rho_0 = 1$ г/см³ и ее динамическая вязкость $\eta = 1,002$ мПа·с) и плотность пластилина, которую определили экспериментально (должна получиться линейная зависимость).

3. Пластилиновый шарик опустите в воду и когда он пройдет 10 см, засеките время, за которое он пройдет оставшееся до дна расстояние (см. рис.).

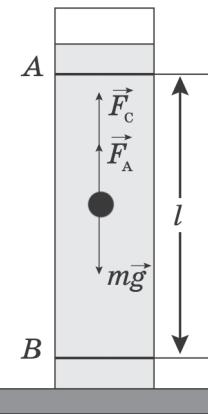


Рис. 5

4. Определите скорость равномерного движения шарика в воде по формуле $u = \frac{l}{t_{\text{ср.}}}$. Проведите опыт 5—7 раз и возьмите среднее время падения $t_{\text{ср.}} = \frac{t_{\max} + t_{\min}}{2}$.

5. Меняя несколько раз радиус шарика, определите каждый раз скорость шарика в воде (как описано в пунктах 3 и 4).

6. Постройте экспериментальный график зависимости скорости движения пластилинового шарика в воде от квадрата радиуса и сравните его с теоретическим графиком.

7. Используя графики, определите погрешность эксперимента

8. Сравните данные теоретических расчетов с экспериментальными и определите их расхождение: $\varepsilon = \left(\frac{u_{\text{T}}}{u_{\text{Э}}} - 1 \right) 100\%$.

9. Сделайте выводы из эксперимента.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	4
Роль физики в современном мире.....	5
Погрешности физических величин. Обработка результатов измерений	7

Раздел I. МЕХАНИКА

Глава 1. ОСНОВЫ КИНЕМАТИКИ

§ 1. Основные понятия и уравнения кинематики равноускоренного движения тела.....	10
§ 2. Прямолинейное движение	18
§ 3. Свободное падение тел. Ускорение свободного падения	28
§ 4. Криволинейное движение. Движение по окружности	37
§ 5. Вращательное движение	39

Глава 2. ДИНАМИКА

§ 6. Первый закон Ньютона. Инерциальные системы отсчета	47
§ 7. Масса тел. Сила. Второй закон Ньютона	51
§ 8. Третий закон Ньютона	56
§ 9. Сила упругости. Закон Гука. Сила реакции опоры	59
§ 10. Сила трения. Закон Кулона—Амонтона	64
§ 11. Сила Архимеда.....	69
§ 12. Сила всемирного тяготения. Сила тяжести	72
§ 13. Вес тела. Невесомость и перегрузки.....	78
§ 14. Момент инерции абсолютно твердого тела	85
§ 15. Момент импульса. Закон сохранения момента импульса. Основное уравнение динамики вращательного движения	93

Глава 3. СТАТИКА

§ 16. Равновесие тел. Условие равновесия тел. Центр масс и центр тяжести	99
--	----

Глава 4. ЗАКОНЫ СОХРАНЕНИЯ В МЕХАНИКЕ

§ 17. Импульс тела и импульс силы. Закон сохранения импульса.....	109
§ 18. Реактивное движение.....	114
§ 19. Работа. Энергия. Теорема о кинетической энергии. Мощность.....	118
§ 20. Потенциальная энергия. Закон сохранения и превращения энергии.....	124

Глава 5. МЕХАНИКА ЖИДКОСТЕЙ И ГАЗОВ

§ 21. Давление в жидкости. Элементы гидростатики	134
§ 22. Уравнение неразрывности.....	138
§ 23. Уравнение Бернулли	141
§ 24. Вязкость. Ламинарное и турбулентное течения жидкостей.....	146
§ 25. Движение тел в жидкостях и газах. Лобовое сопротивление и подъемная сила. Формула Стокса	148

Раздел II. ТЕПЛОВАЯ ФИЗИКА

Глава 6. ОСНОВЫ МОЛЕКУЛЯРНО-КИНЕТИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ ГАЗОВ

§ 26. Основные положения молекулярно-кинетической теории газов и ее опытное обоснование	153
---	-----

§ 27. Силы взаимодействия молекул.....	161
§ 28. Термодинамические системы и термодинамические параметры.	
Равновесное и неравновесное состояния термодинамических систем	165
§ 29. Температура — как мера средней кинетической энергии теплового движения частиц вещества	167
§ 30. Идеальный газ. Основное уравнение молекулярно-кинетической теории газов	172
Глава 7. ГАЗОВЫЕ ЗАКОНЫ	
§ 31. Уравнение состояния идеального газа	179
§ 32. Изопроцессы. Графики изопроцессов. Закон Дальтона.....	182
Глава 8. ОСНОВЫ ТЕРМОДИНАМИКИ	
§ 33. Внутренняя энергия.....	191
§ 34. Работа, совершаемая при термодинамических процессах	197
§ 35. Количество теплоты. Способы изменения внутренней энергии. Теплоемкость	202
§ 36. Первый закон термодинамики	206
§ 37. Применение первого закона термодинамики к изопроцессам	209
§ 38. Адиабатный процесс	213
§ 39. Тепловые двигатели. Коэффициент полезного действия тепловых двигателей	216
§ 40. Цикл Карно. КПД цикла Карно	219
§ 41. Обратимые и необратимые процессы. Энтропия. Второй закон термодинамики	222
§ 42. Применение тепловых двигателей	226
Глава 9. ЖИДКОСТИ И ТВЕРДЫЕ ТЕЛА	
§ 43. Насыщенный и ненасыщенный пар. Влажность воздуха	234
§ 44. Фазовые диаграммы. Тройная точка. Критическое состояние вещества	241
§ 45. Свойства поверхностного слоя жидкости	245
§ 46. Смачивание. Капиллярные явления.....	250
§ 47. Кристаллические и аморфные тела	254
§ 48. Механические свойства твердых тел	259
Лабораторная работа № 1. Определение ускорения тела, движущегося по наклонной плоскости	269
Лабораторная работа № 2. Исследование зависимости дальности полета тела от угла бросания.....	270
Лабораторная работа № 3. Изучение движения тела, скатывающегося по наклонному желобу	271
Лабораторная работа № 4. Сложение сил, направленных под углом друг к другу	273
Лабораторная работа № 5. Исследование зависимости скорости шарика от его радиуса при движении в вязкой жидкости	275

Учебное издание

**Кронгарт Борис Аркадьевич
Казахбаева Данагуль Мукажановна
Имамбеков Онласын
Кыстаубаев Талгат Зайнулланович**

ФИЗИКА

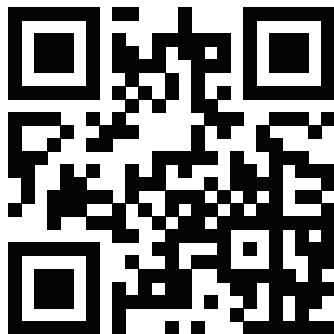
Часть 1

Учебник для 10 классов
естественно-математического направления
общеобразовательных школ

Редактор *К. Амирова*
Худож. редактор *А. Сланова*
Техн. редактор *Л. Садыкова*
Корректор *Е. Дремкова*
Компьютерная верстка *И. Алмабаевой*

Государственная лицензия № 0000001 выдана издательству
Министерством образования и науки Республики Казахстан

7 июля 2003 года



ИБ № 5875

Подписано в печать 30.05.19. Формат 70×100¹/₁₆. Бумага офсетная.
Гарнитура “SchoolBook Kza”. Печать офсетная. Усл.-печ. л. 22,58+0,32 форзац.
Усл. кр.-отт. 92,32. Уч.-изд. л. 15,56+0,54 форзац.
Тираж 60000 экз. Заказ №

Издательство “Мектеп”, 050009, г. Алматы, пр. Абая, 143

Факс: 8(727) 394-37-58, 394-42-30

Тел.: 8(727) 394-42-34

E-mail: mektep@mail.ru

Web-site: www.mektep.kz