

**ПАВЕЛ ВИКТОР**

# **ФИЗИКА**

**МОЛЕКУЛЯРНОЕ СТРОЕНИЕ ВЕЩЕСТВА  
И ТЕПЛОВЫЕ ЯВЛЕНИЯ**

**Просто и понятно о фундаментальной науке**

Київ  
BOOKSHEF  
2021

# СОДЕРЖАНИЕ

**5** Вступление

---

**7** Атомы и молекулы. Диффузия. Броуновское движение

---

**18** Взаимодействие молекул. Смачивание и несмачивание. Три состояния вещества

---

**30** Опыт Перрена. Масса молекул и молярная масса. Взаимодействие молекул

---

**45** Идеальный газ. Основное уравнение МКТ идеального газа

---

**60** Тепловое равновесие. Температура. Абсолютная температурная шкала

---

**74** Тепловое расширение твердых тел, жидкостей и газов

---

**86** Связь коэффициентов линейного и объемного расширения

---

**92** Средняя кинетическая энергия молекул многоатомного газа

---

**101** Среднеквадратическая скорость молекул. Опыт Штерна

---

**110** Уравнение состояния идеального газа. Квазистатические процессы

---

**120** Изопроцессы и их графики. Частные газовые законы

---

**131** Предмет термодинамики. Внутренняя энергия тела. Количество теплоты

---

**144** Виды теплопередачи: теплопроводность, конвекция, излучение

---

- 160** Вычисление работы в термодинамике
- 171** Количество теплоты. Теплоемкость. Первый закон динамики
- 182** Применение первого закона термодинамики для различных процессов
- 192** Уравнение теплового баланса
- 200** Удельная теплота сгорания топлива. КПД нагревателя
- 208** Тепловые двигатели и их КПД. Цикл Карно
- 223** Паровая машина. Паровая турбина
- 231** Двигатель внутреннего сгорания
- 248** Испарение и конденсация. Насыщенный пар и его свойства
- 263** Температурная зависимость давления пара. Точка росы
- 269** Влажность воздуха. Абсолютная и относительная влажность
- 277** Кипение жидкости. Критическая температура
- 289** Свойства жидкостей. Поверхностная энергия. Коэффициент поверхностного натяжения
- 291** Свойства жидкостей. Поверхностная энергия
- 299** Смачивание. Капиллярные явления
- 311** Свойства твердых тел. Кристаллические и аморфные тела. Деформация твердых тел
- 334** Закон Гука. Модуль Юнга. Диаграмма растяжения. Запас прочности
- 349** Жидкие кристаллы

# АТОМЫ И МОЛЕКУЛЫ. ДИФФУЗИЯ. БРОУНОВСКОЕ ДВИЖЕНИЕ

1

урок

Еще в древности люди задумывались над тем, из чего состоит мир. И считали, что существуют четыре основные составные части всего — земля, вода, воздух и огонь. В IV-V веке до н. э. древнегреческие ученые Левкипп и Демокрит пришли к иному выводу.

Чтобы понять идею их вывода, можно вспомнить старинную притчу. Встречаются учитель и ученик, и учитель говорит ученику: «Видишь эту кадку? Сейчас я трижды наполню ее, ни разу не опустошая». Ученик не поверил учителю. Тогда учитель взял кадку и доверху набросал в нее камней. После, не вынимая камни, он насыпал в кадку песок и наполнил ее во второй раз. В третий раз учитель залил это все водой. Это удалось ему потому, что между камнями оставалось свободное пространство, которое заполнили частички песка. Но и между песчинками оставалось свободное пространство, в которое попала вода. Сама собой напрашивается мысль, что вода тоже состоит из частиц. И возможно, существует еще что-то более мелкое, чем частицы воды, и этим чем-то можно заполнить кадку еще раз, не выливая воду. Древнегреческие философы Левкипп и Демокрит пришли к выводу, что окружающий нас мир действительно

молекул с разных сторон от броуновской частички все время меняется по случайному закону, частица совершает странное движение — движется хаотично. Это явление называют **броуновским движением** (рис. 3).

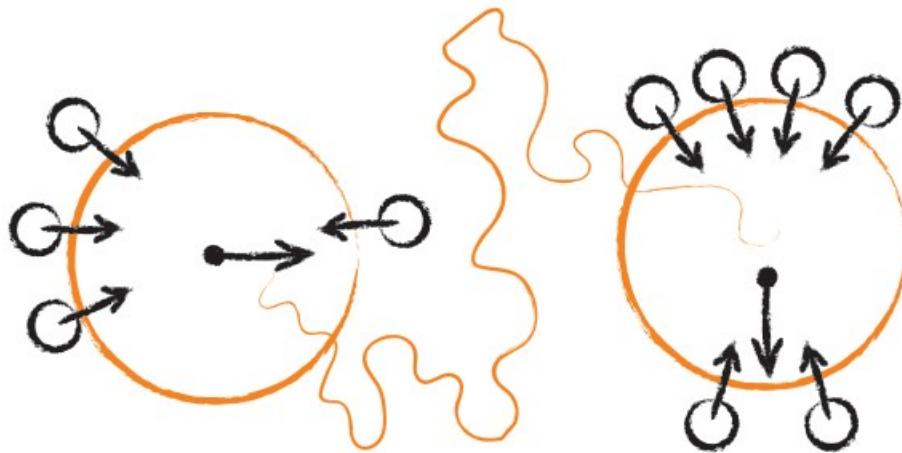


Рис. 3

Казалось бы, поскольку молекулы движутся совершенно хаотично, описать его математически невозможно. Но это под силу такому разделу математики как **теория вероятности**. А раздел физики, который пользуется этой теорией, называется **статистическая физика**. Оказывается, что методами статистической физики можно описать даже случайное движение броуновских частиц. Впервые это сделал Альберт Эйнштейн. Все знают его как автора теории относительности, но кроме этого он построил математически строгую теорию броуновского движения.

Сам Броун, изучая движение частиц пыльцы, полагал, что эти частички на самом деле имеют животное происхождение и только поэтому движутся. Но как показали дальнейшие опыты, биология здесь совершенно ни при чем, а все дело в движении молекул.

Демонстрацию опыта смотрите здесь:



Подробнее изучить явление смачивания можно на примере еще одного опыта. Для него понадобится чистое и закопченное стекло. Если капнуть воду на чистое стекло, капля воды растечется по поверхности стекла (рис. 3.1). Это свидетельствует о смачивании. Вода старается распространиться по наибольшей площади, потому что молекулы воды сильнее притягиваются к молекулам стекла, чем к друг другу. Если же капнуть воду на закопченное стекло, капля воды сохранит свою круглую форму, не растекаясь по поверхности. В этом случае капля воды стремится контактировать с закопченным стеклом как можно меньшей площадью. Это говорит о том, что молекулы углерода (ко-поти) взаимодействуют с водой значительно слабее, чем молекулы воды друг с другом (рис. 3.2).

И если в первом случае мы видим явление смачивания, то во втором случае наблюдаем обратное явление, которое называется **несмачиванием**.

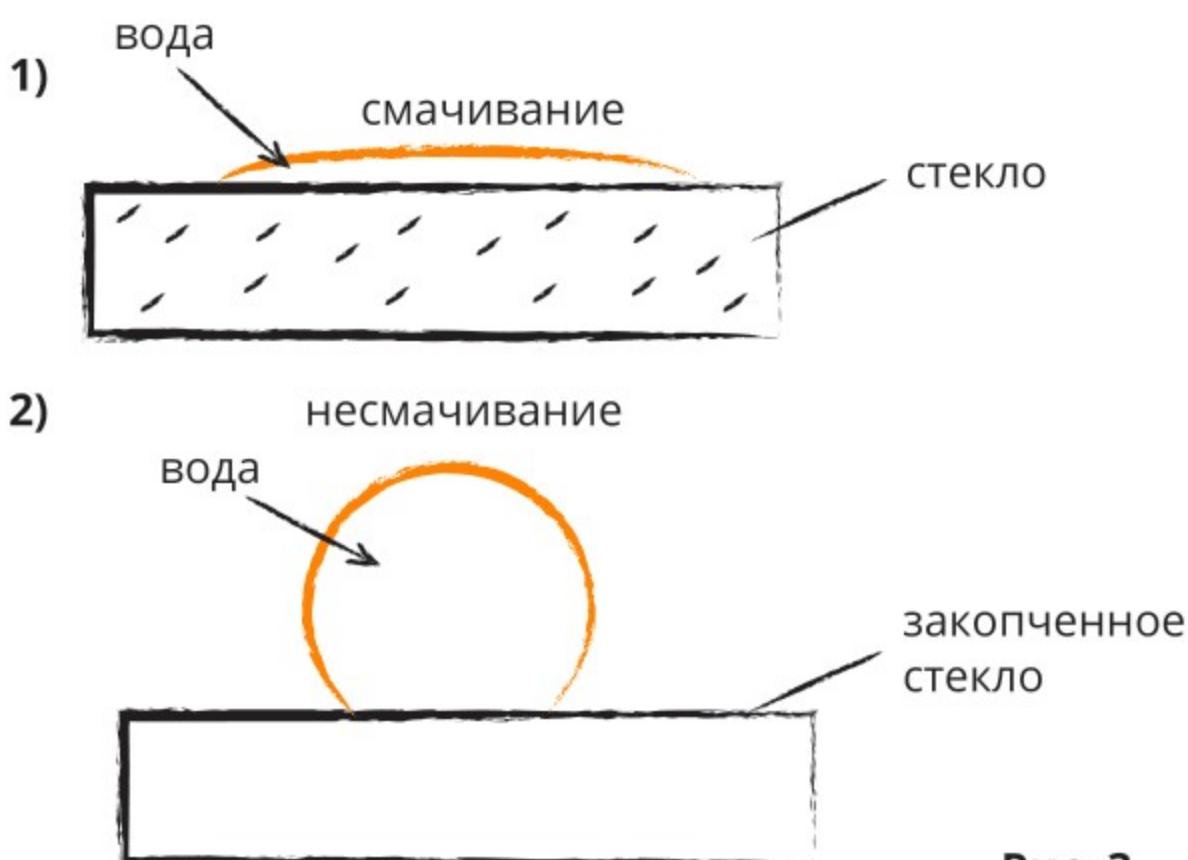


Рис. 3

Демонстрацию опыта смотрите здесь:



Все это говорит о том, что разные пары веществ относятся друг к другу по-разному. Примеры смачивания: вода — стекло; ртуть — металлы; расплавленные металлы (олово, свинец) — твердые металлы (например, медь, железо, цинк). Примеры несмачивания: вода — углерод (сажа); ртуть — стекло; вода — жир.

Явления смачивания и несмачивания находят широкое применение в технике и проявление в природе. Смачивание можно использовать, например, при склеивании разных веществ. Клей — это вещество, которое обладает двумя важными свойствами. Во-первых, он смачивает те поверхности, которые необходимо склеить. Для этого он имеет специальный химический состав. Второе его свойство — он затвердевает через некоторое время. Поэтому, когда мы склеиваем какие-то две поверхности, клей смачивает их обе. А после того, как затвердеет, прочно их соединяет (рис. 4.1).

Поскольку расплавленное олово хорошо смачивает другие твердые металлы, этим тоже можно пользоваться. Технология соединения различных металлов другим расплавленным металлом называется **пайка**. В этом случае используется припой — чаще всего сплав олова и свинца. Припой растекается и хорошо смачивает поверхности твердых металлов, а после охлаждения отвердевает и прочно соединяет между собой спаиваемые поверхности (рис. 4.2).

Две металлические поверхности также можно соединить между собой с помощью расплавленного металла того же химического состава. Но эта технология уже на-

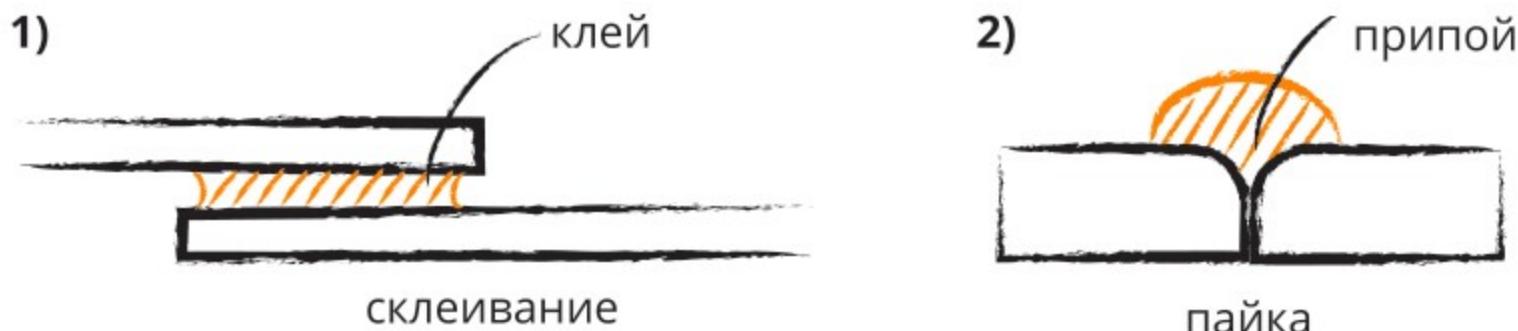


Рис. 4

зывается **сварка**, и отличается она от пайки тем, что при сварке железные детали соединяют расплавленным железом, медные — расплавленной медью.

А вот пример несмачивания. Если покрыть жиром какую-то поверхность, к ней перестанут приставать капли воды. Это даже нашло свое отражение в поговорке «Как с гуся вода». Все дело в том, что свои перья гусь покрывает слоем жира, поэтому даже под дождем он остается совершенно сухим. Еще один пример из природы — насекомое водомерка, которая бегает по поверхности воды, не проваливаясь.

Кроме этого, существует такое понятие, как гидрофобное покрытие — «боящееся воды покрытие». На языке физики это звучит как «покрытие из вещества, которое не смачивается водой». Используется оно для изготовления зонтов, палаток, иногда обуви и одежды.

Итак, к тому, что молекулы существуют и непрерывно движутся, добавился еще один подтвержденный многочисленными опытами факт: молекулы взаимодействуют друг с другом. Эти три факта называются **основными положениями молекулярно-кинетической теории вещества**. Сформулируем их еще раз:

- Все вещества состоят из молекул.
- Молекулы находятся в состоянии непрерывного хаотического движения.
- Молекулы взаимодействуют друг с другом.

Несмотря на простоту этих положений, они позволяют объяснить огромное разнообразие физических явлений

и сами свойства веществ. В том числе и то, о чем пойдет речь прямо сейчас.

## ■ ТРИ СОСТОЯНИЯ ВЕЩЕСТВА

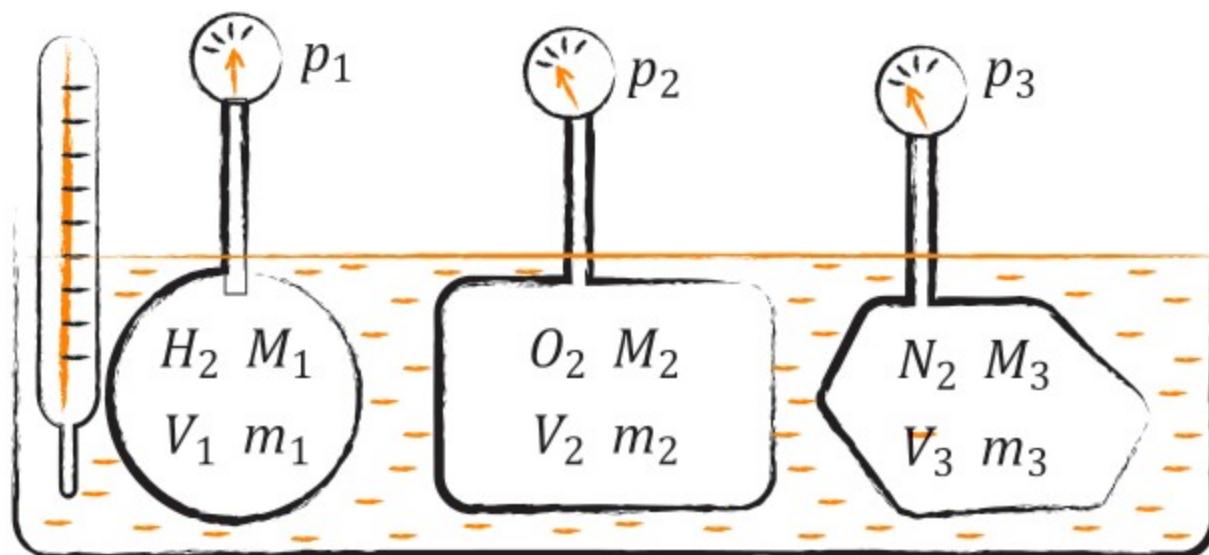
Все тела делятся на три больших класса — твердые, жидкые и газообразные. Эти три состояния называют **тремя агрегатными состояниями вещества** (рис. 5).

Во-первых, важен внешний признак. Твердые тела сохраняют свою **форму**. Жидкие тела, как и газообразные, в отличие от твердых, своей формы не имеют, а принимают форму сосуда, в который они помещены.

Следующая характеристика — **объем**. Твердые тела сохраняют объем точно так же, как и жидкые. Благодаря тому, что жидкость может менять свою форму, но остается всегда телом определенного объема, у нее есть **свободная поверхность**, которая разделяет ту область пространства, где жидкость есть, с той областью пространства, где жидкости нет. Эта поверхность обладает очень интерес-



Рис. 5



$$\frac{p_1 M_1 V_1}{m_1 N_A} = \frac{p_2 M_2 V_2}{m_2 N_A} = \frac{p_3 M_3 V_3}{m_3 N_A}.$$

Рис. 2

наковыми, как только газы придут в состояние теплового равновесия (проще говоря, подольше полежат в воде). Удивительно: объемы, давления, массы и химический состав газов могут быть разными, но, если эти газы находятся в состоянии теплового равновесия, отношения  $p/n$  для них будут одинаковыми.

С одной стороны, полученный результат говорит о том, что при достижении теплового равновесия средние кинетические энергии поступательного движения молекул разных газов становятся одинаковыми. Но по закону теплового равновесия в этом случае становятся одинаковыми и температуры этих газов. Значит, можно считать, что температура и средняя кинетическая энергия поступательного движения молекул — это одна и та же величина, измеряемая в разных единицах! Единицы измерения этой «энергетической» температуры:

$$\left[ \frac{p}{n} \right] = \frac{\text{Па}}{\text{м}^{-3}} = \text{Па} \cdot \text{м}^3 = \frac{\text{Н}}{\text{м}^2} \cdot \text{м}^3 = \text{Н} \cdot \text{м} = \text{Дж.}$$

Если температура — мера средней кинетической энергии молекул, то такая величина не может быть отрицательной. А значит, самое маленькое значение температуры, которое можно себе представить, — это 0.

хом, а нижний конец трубы погружен в подкрашенную жидкость. Попробуем изменить температуру воздуха, который находится внутри. Сделать это можно всего лишь прикоснувшись к колбе руками. И мы тут же заметим, как столбик жидкости начнет подниматься. Причем эффект проявляется при повышении температуры всего лишь на несколько градусов (рис. 3).

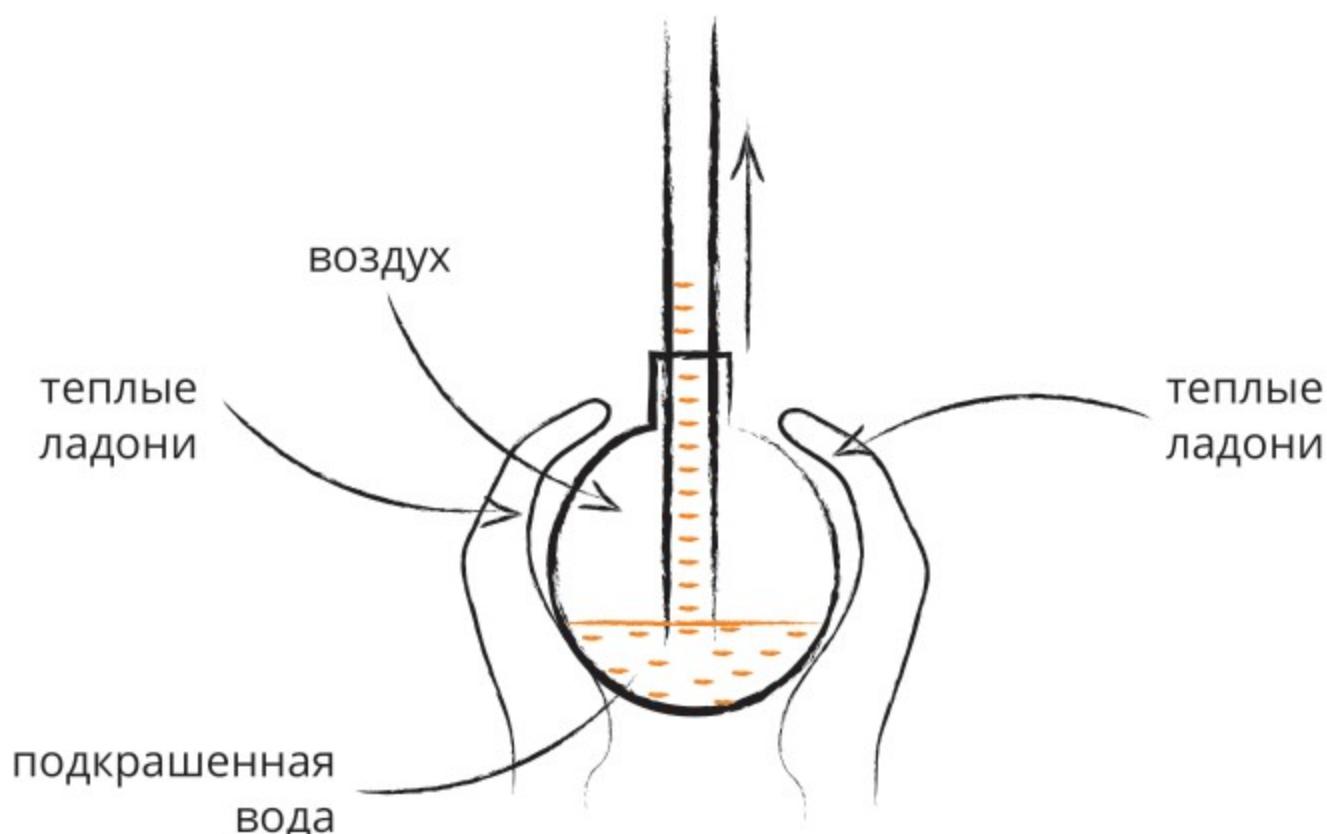


Рис. 3

Цепочка причинно-следственных связей: увеличение температуры → увеличение скорости движения молекул воздуха → увеличение количества и силы ударов молекул воздуха о поверхность воды в сосуде → увеличение объема воздуха и давления воздуха на воду → вытеснение воды из колбы в трубку.

Итак, лучше всего расширяются газы. На втором месте — жидкости, на третьем — твердые тела.

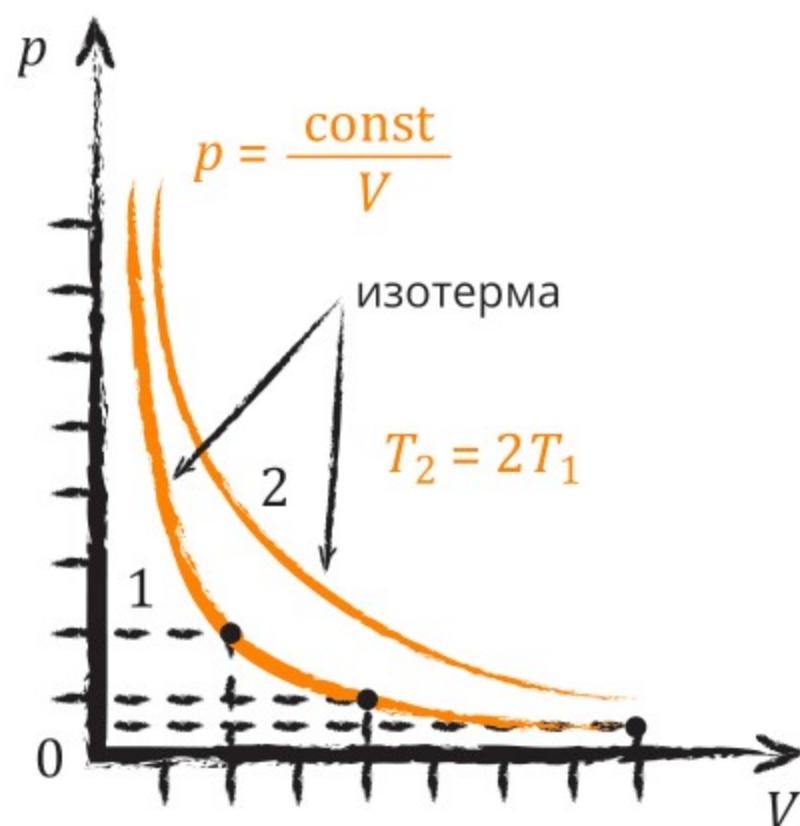
Различные твердые тела при изменении температуры на одну и ту же величину расширяются по-разному. Убедиться в этом можно, изготовив так называемую **биметаллическую пластинку**. Это пластина из двух полосок различных металлов (например, железа и цин-

**При постоянной температуре произведение давления данной массы газа на его объем есть величина постоянная.**

Опишем этот закон с помощью графика. Как правило, при проведении опытов изменяют объем газа, опуская или поднимая поршень, после чего измеряют давление. Поэтому будем считать объем независимой переменной и откладывать по горизонтальной оси графика, а вычислять и откладывать по вертикальной оси будем давление. Из формулы (1) следует:

$$p = \frac{\text{const}}{V}.$$

Такая связь давления с объемом называется **обратно пропорциональной зависимостью**. График этой зависимости будет иметь следующий вид:



Предположим, что объем и давление равны двум каким-то произвольным единицам. При увеличении объема в два раза давление уменьшится тоже в два раза.

его неизменным на другом уровне, график по-прежнему будет прямой, продолжение которой пересекает начало координат. Но другим будет наклон прямой. Например, если давление удвоить, константа в формуле (2) станет в два раза меньше, а значит, при том же значении температуры объем газа станет в два раза меньше. Изобара, соответствующая более высокому давлению, пройдет ниже (прямая 2).

**3) Изохорный процесс.** Это процесс, который происходит при постоянном объеме. Чтобы реализовать изохорный процесс, газ необходимо заключить в условия, когда его объем не может меняться. Для этого поршень надо закрепить. Теперь можно изменять температуру газа и следить за изменением его давления, используя манометр (рис. 3).

Вновь обращаемся к уравнению Клапейрона–Менделеева:

$$pV = \frac{m}{M} RT.$$

Справа от знака равенства расположим величины, которые не меняются в ходе изохорного процесса, а все остальное перенесем в левую часть:

$$\frac{p}{T} = \frac{mR}{MV}.$$

$$\frac{p}{T} = \text{const.}$$

(3)

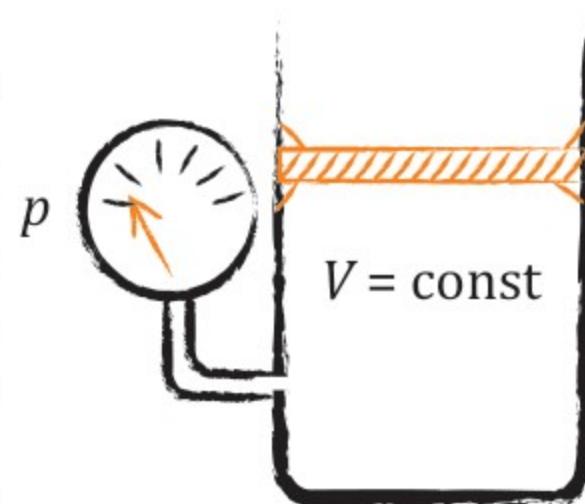


Рис. 3

над пламенем жидкость нагревается, она поднимается, отходит к стенкам сосуда, а возле стенок опускается. Это так называемые **конвекционные потоки**, одно из проявлений конвекции. Благодаря им вся жидкость в колбе перемешивается и прогревается.

Появление конвекционных потоков объясняется так: теплая вода имеет плотность меньше, чем холодная. Поэтому под действием силы Архимеда, она всплывает, поднимается вверх, доставляя внутреннюю энергию в верхние части колбы. При этом холодная жидкость с большей плотностью тонет, опускается вдоль боковых стенок колбы, попадает в зону пламени горелки и тоже прогревается. Значит, конвекция — это перенос энергии струями, в нашем случае струями жидкости.

Демонстрацию опыта смотрите здесь:



Еще ярче конвекция проявляется в газах, так как газы намного лучше расширяются при нагревании и их плотность уменьшается более значительно.

Чтобы наблюдать конвекцию в газах, изготовим устройство в виде штатива, на котором вертикально закреплена игла с установленной на ней картонной «змейкой» (спиралью) (рис. 3).

вращение «змейки»



Рис. 3