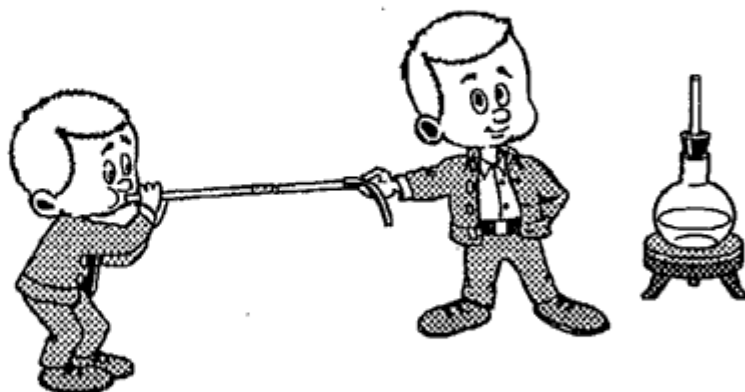


ФИЗИКА 10

Р. В. Майер



Изучение зависимости давления насыщенного пара от температуры

Зависимость давления насыщенного пара от температуры изучается в 10 классе [4, с. 45–50], поэтому необходим простой лабораторный эксперимент, доказывающий, что с ростом температуры давление насыщенного пара в отличие от газа возрастает по нелинейному закону.

Проанализируем известные учебные эксперименты. Опыты, описанные Б. Ш. Перкальским в книге [6, с. 11–13], Н. Б. Хлыбовым в статье [9] и Н. М. Шахмаевым в школьном учебнике [10, с. 35], позволяют лишь качественно изучить зависимость давления насыщенных паров хлористого этила, спирта и воды от температуры. Лабораторный эксперимент, рассмотренный в пособии [7, с. 114], предполагает использование сложно-

го оборудования: автоклава и испарителя, которое не доступно школьному физическому кабинету.

Опыт, предложенный В. Н. Белоусовым [1], предполагает создание насыщенного водяного пара под поршнем шприца, который растягивает пружину динамометра. Но такой способ измерения давления из-за действия на поршень сил трения не является достаточно точным.

Демонстрационный эксперимент, предложенный И. М. Низамовым [5], позволяет экспериментально изучить зависимость давления насыщенных паров эфира от объема и от температуры. Однако его проведение требует использования эфира, прибора для изучения газовых законов и стрелочного манометра, что не всегда до-

ступно школьному физическому кабинету.

Ниже представлена краткая теория зависимости давления насыщенного пара от температуры и описана методика ее экспериментального изучения на простом оборудовании.

1. Учебная теория

Пар, находящийся в динамическом равновесии со своей жидкостью, называется *насыщенным* паром. С повышением температуры давление насыщенного пара быстро возрастает за счет увеличения концентрации молекул и скорости их движения. Покажем, что с ростом температуры давление насыщенного пара быстро увеличивается [2, 3, 11, 12].

По закону Больцмана число молекул n в единице объема, обладающих потенциальной энергией u , определяется выражением:

$$n = n_0 e^{-u/kT}, \quad (1)$$

где n_0 — концентрация молекул с нулевой потенциальной энергией, T — абсолютная температура, k — постоянная Больцмана.

Молекулы, находящиеся на поверхности жидкости, удерживаются силами молекулярного притяжения, препятствующими их испарению. Для того, чтобы молекулы могли покинуть жидкость, их кинетическая энергия должна быть больше энергии испарения. Молекулы, покидающие жидкость при испарении, совершают работу против сил притяжения со стороны других молекул, и их энергия уменьшается по сравнению с первоначальной на величину совершенной работы. Средняя энергия молекулы, вылетевшей из жидкости, меньше энергии этой молекулы внутри жидкости на L/N_0 , где L —

молярная теплота испарения, N_0 — число Авогадро.

Молярная теплота испарения показывает, какое количество энергии необходимо для превращения одного моля жидкости в пар при постоянной температуре. Величина L/N_0 и есть энергия u , входящая в закон Больцмана. Поэтому концентрация молекул пара $n_{\text{п}}$ определяется выражением:

$$n_{\text{п}} = n_{\text{ж}} e^{-L/N_0 kT}, \quad (2)$$

где $n_{\text{ж}}$ — концентрация молекул жидкости, потенциальную энергию которых принимаем равной нулю. Согласно молекулярно-кинетической теории давление $p = n_{\text{п}} kT$, то есть концентрация молекул пара связана с его давлением равенством: $n_{\text{п}} = p/kT$. Тогда получаем:

$$\begin{aligned} p &= n_{\text{п}} kT = n_{\text{ж}} kT e^{-L/N_0 kT} = \\ &= n_{\text{ж}} kT e^{-L/RT}, \end{aligned} \quad (3)$$

где $R = N_0 k$ — универсальная газовая постоянная.

Итак, давление насыщенного пара с увеличением температуры возрастает по закону (3).

2. Экспериментальная установка

Экспериментальная установка состоит из электроплитки 1, химического стакана 2, колбы 3, соединительной стеклянной трубки 4 с пробкой, резинового шланга 5, термометра 6, манометрической трубки 7 и отрезка резинового шланга с зажимом 8 (рис. 1). Электроплитка лабораторная рабочим напряжением 220 В и мощностью 300 Вт. Термометр должен быть рассчитан на измерение температуры от 0°С до 100°С. Химический стакан на 800 мл. Колба

коническая объемом 350 мл. Трубки 4 и 7 имеют длины 15 и 80 см соответственно. Внутренний диаметр манометрической трубки 7 равен 3 мм, в нее введена капля воды длиной 10–20 мм.

Для того, чтобы в манометрическую трубку можно было поместить водяную каплю, а затем быстро и герметично закрыть ее правый конец, на него надет отрезок резинового шланга. При необходимости его можно перегнуть и закрыть с помощью зажима. Так как в опытах с паром давление внутри колбы падает в пять и более раз, то во избежание попадания воздуха все соединения должны быть как можно более герметичными. Чтобы колба не всплывала в воде, ее удерживают лапкой штатива.

Для определения давления водяных паров будем измерять объем воздуха в манометрической трубке, запертый каплей воды. В начале опыта давление воздуха, запертого водяной каплей, равно атмосферному давлению p_0 . При изменении давления пара в колбе капля жидкости в трубке смещается так, что давление запертого воздуха справа от нее равно давлению пара слева.

По закону Бойля–Мариотта давление воздуха, запертого каплей, равно

$$p = p_0 \frac{V_0}{V} = p_0 \frac{l_0}{l}, \quad (4)$$

где l — длина столба запертого воздуха в манометрической трубке.

Начинают опыт с того, что шланг 5 отсоединяют от трубки 4, в манометрическую трубку 7 вводят каплю воды и зажимом 8 герметично перекрывают ее отверстие. Затем включают электроплитку и нагревают воду в стакане до кипения. При этом колба, наполненная воздухом или водяным паром, принимает температуру кипящей воды в стакане. Электроплитку выключают и резиновый шланг 5 быстро надевают на стеклянную трубку 4, соединяя тем самым колбу с манометрической трубкой. Далее по мере охлаждения колбы измеряют температуру заключенного в ней воздуха или пара, а также соответствующую ей длину столба воздуха между каплей и правым концом манометрической трубки. Это позволяет экспериментально определить зависимость давления воздуха или пара в колбе от температуры.

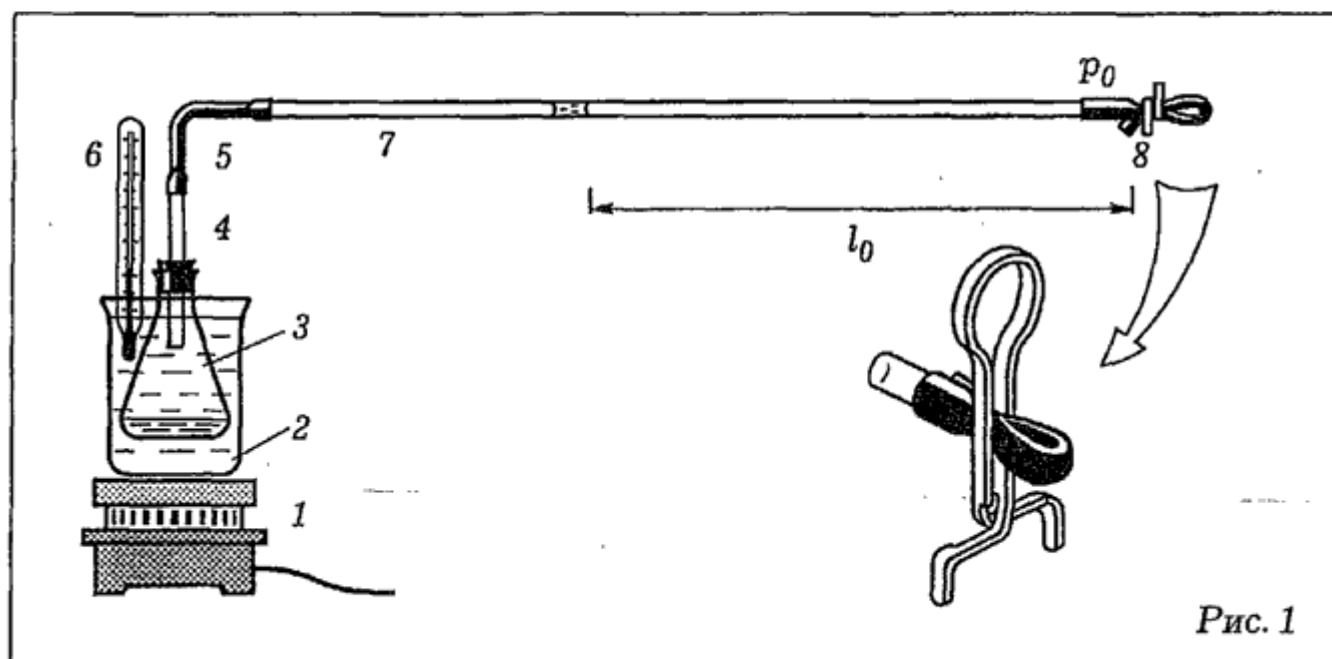


Рис. 1

3. Экспериментальное исследование

Предлагаемая лабораторная работа по изучению зависимости давления воздуха и насыщенного пара от температуры включает в себя проведение следующих опытов.

Опыт 1

Изучение зависимости давления воздуха от температуры

Протирают внутреннюю поверхность колбы сухой тряпкой, после чего нагревают колбу на плите, добиваясь того, чтобы в колбе было как можно меньше влаги. Затем колбу помещают в химический стакан с водой и доводят воду до кипения. При этом температура воздуха в колбе становится равной примерно 100°C , а давление остается атмосферным $p_0 = 10^5 \text{ Па}$.

В манометрическую трубку на глубину $\approx 20 \text{ см}$ вводят каплю воды и перекрывают отверстие трубки. В тот момент, когда вода в химическом стакане закипит, присоединяют к колбе манометрическую трубку. Измеряют длину l_0 , соответствующую температуре воздуха 100°C , которую определяют с помощью погруженного в химический стакан термометра.

Отключают электроплитку, снимают с нее химический стакан, и, добавляя в него холодной воды или снега, охлаждают воздух в колбе примерно до 10°C . В каждом i -том измерении с помощью термометра определяют температуру воздуха в колбе t_i и длину воздушного столбика в трубке l_i , занося результаты в таблицу.

Давление в колбе равно давлению воздуха в трубке, запертого каплей. Для его расчета используют формулу

$p_i \approx p_0 l_0 / l_i$. Строят график зависимости давления воздуха от температуры при охлаждении от 100 до 10°C и убеждаются в том, что эта зависимость является линейной.

Опыт 2

Изучение зависимости давления насыщенного водяного пара от температуры

В колбу наливают немного воды так, чтобы она покрывала дно слоем в 5 мм . Погружают колбу в химический стакан, наполненный водой, и доводят воду до кипения.

Одну или две минуты ждут, пока водяной пар не вытеснит весь воздух из колбы. При этом водяной пар в колбе становится насыщенным, его температура около 100°C , а давление равно атмосферному.

Подсоединяют к колбе манометрическую трубку, в которой длина воздушного столбика, запертого каплей, составляет $8\text{--}10 \text{ см}$. Повторяют измерения, снимая зависимость давления насыщенного водяного пара от температуры.

В той же системе координат, что и раньше, строят график зависимости давления насыщенного водяного пара от температуры.

4. Анализ результатов

Кратко рассмотрим полученные результаты.

На рис. 2 изображены температурные зависимости давления воздуха (прямая 1), водяного пара (кривая 2), паров растворителя 646 (кривая 3) и этилового спирта (кривая 4). Кроме того приведена зависимость давления насыщенного водяного пара от температуры (кривая 5), построенная по табличным данным из [11, с. 328].

Как видно из этих графиков, давление насыщенного пара не прямо

пропорционально температуре: при высоких температурах оно увеличивается быстрее, чем при низких. В этом резкое различие насыщенных паров от газов, давление которых пропорционально температуре. Кроме того, уменьшение (увеличение) давления при охлаждении (нагревании) пара происходит значительно быстрее, чем в случае с воздухом.

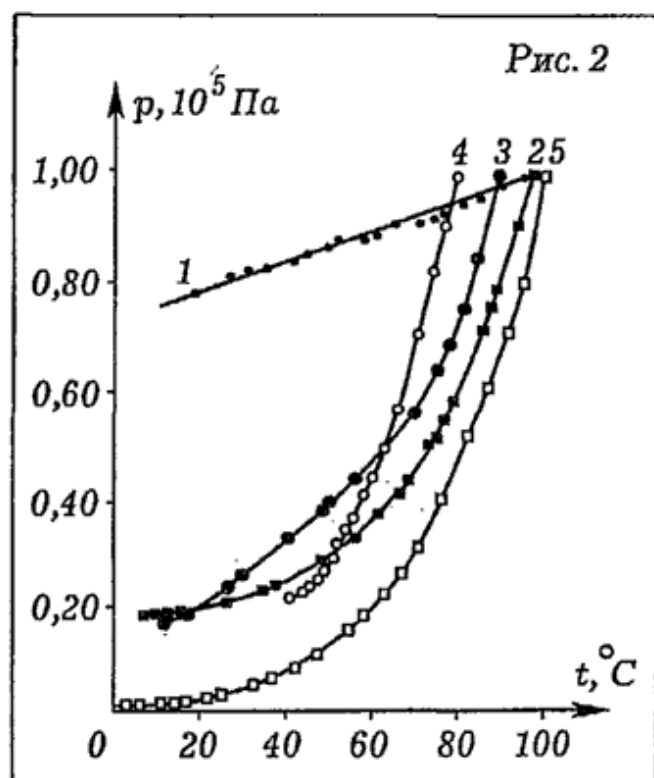


Рис. 2

Это различие станет вполне понятным, если вспомнить, что при нагревании газов в постоянном объеме меняется только скорость молекул. При нагревании системы "жидкость-пар" вместе со скоростью молекул увеличивается их концентрация, растет плотность пара. Когда вся жидкость испарится, пар при дальнейшем нагревании перестанет быть насыщенным, и его давление при постоянном объеме будет возрастать прямо пропорционально абсолютной температуре.

Используя формулу $p = nkT$, можно вычислить концентрации молекул воздуха и насыщенного водяного пара при различных температурах и

построить соответствующие графики (рис. 3). Видно, что если концентрация молекул воздуха при изохорном охлаждении остается неизменной, то концентрация молекул воды в насыщенном паре резко падает вследствие конденсации.

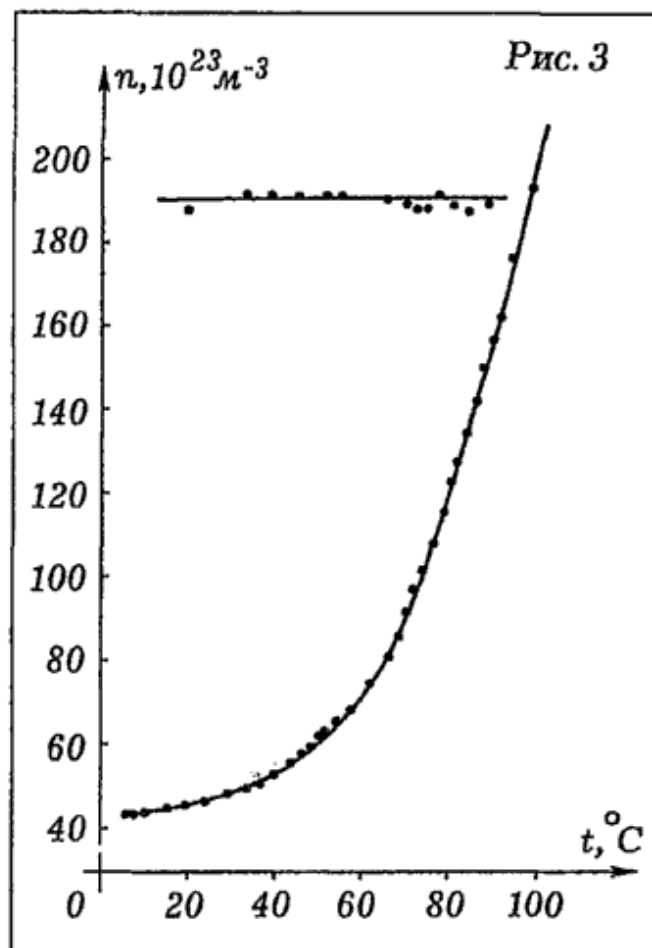


Рис. 3

Графики на рис. 2 показывают, что при низких температурах экспериментальная кривая 2 довольно сильно отличается от кривой 5, построенной по табличным значениям [11, с. 328]. Это объясняется тем, что при значительном снижении давления насыщенного пара внутри колбы может попасть небольшое количество воздуха.

Преимущество предложенного эксперимента перед известными состоит в том, что он отличается простотой исполнения и доступным оборудованием. Его можно провести в

