

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

**Учреждение образования
«БРЕСТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Кафедра физики

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

к выполнению лабораторной работы М21

«Изучение зависимости кипения воды от внешнего давления»

по дисциплине
«Физика»

Брест 2007

УДК 53(076.5)

Методические указания предназначены для студентов всех инженерных специальностей дневной и заочной форм обучения БрГТУ, выполняющих лабораторные работы по физике. Содержат теоретические сведения о кипении жидкости, зависимости её кипения от внешнего давления.

Составители: С.В. Чугунов, ассистент
Н.И. Чопчиц, доцент
И.С. Янусик, старший преподаватель

Рецензент: В.С. Костюк, к.ф.н.и.н. преподаватель

ИЗУЧЕНИЕ ЗАВИСИМОСТИ ТЕМПЕРАТУРЫ КИПЕНИЯ ВОДЫ ОТ ВНЕШНЕГО ДАВЛЕНИЯ

Цель работы:

- изучение зависимости температуры кипения воды от внешнего давления, экспериментальное определение теплоты парообразования воды.

Приборы и принадлежности: установка для проведения измерений.

Описание установки

Установка (рис.1) состоит из трех блоков: устройства для получения вакуума, подогреваемой кюветы, наполовину заполненной водой, и измерительно-регулирующего устройства.

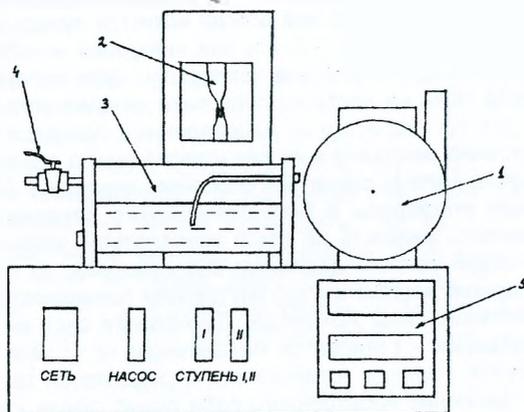


рис.1

Понижение давления в сосуде с водой 3 создается водоструйным насосом 2, внутри которого струя воды, имеющая высокую скорость и низкое статическое давление, увлекает откачиваемый воздух и интенсивно смешивается с ним. Производительность такого насоса возрастает с повышением давления воды на его входе. Поэтому вода поступает от центробежного насоса 1 и циркулирует по замкнутому циклу. Предельное теоретически достижимое остаточное давление воздуха практически равно давлению насыщенных паров воды при данной температуре.

Кювета 3 частично заполнена водой. Она соединяется с вакуумным насосом посредством гибкого шланга и крана 4. Вода подогревается инфракрасным нагревателем, встроенным в основание установки. Температура измеряется платиновым термосопротивлением, помещенным в изогнутый тонкостенный кожух из нержавеющей стали. Разность внешнего давления и давления паров воды в кювете измеряется с помощью манометра (показания манометра: $P_{\text{ман}} = P_{\text{пара}} - P_{\text{атм}}$; заметим, что атмосферное давление не является постоянной величиной и зависит от дня проведения эксперимента, внося определен-

ную погрешность в измерение). Текущее значение температуры выводится на дисплей измерителя – регулятора 5, управляющего работой инфракрасного нагревателя по заданной программе.

Основные понятия и соотношения

Если жидкость в сосуде, имеющую свободную поверхность, нагревать при постоянном внешнем давлении, то сначала образование пара носит спокойный характер. Оно идет лишь со свободной поверхности жидкости. Такой процесс парообразования называется *испарением*. По достижении определенной температуры, называемой *температурой кипения*, образование пара начинает происходить не только со свободной поверхности, но и в объеме жидкости. Внутри жидкости возникают, растут и поднимаются на поверхность пузыри пара, увлекая за собой и саму жидкость. Процесс парообразования приобретает бурный характер. Этот процесс называется *кипением*. По существу кипение есть особый вид испарения. Дело в том, что жидкость никогда не бывает физически однородной. В ней всегда имеются пузырьки воздуха или других газов, часто настолько малые, что они невидимы невооруженным глазом. На поверхности каждого пузырька непрерывно идет испарение жидкости и конденсация пара, пока не наступит состояние динамического равновесия, при котором эти два противоположно направленные процесса компенсируют друг друга. В состоянии механического равновесия сумма давлений воздуха и пара внутри пузырька должна равняться внешнему давлению. Последнее складывается из давления атмосферы и гидростатического давления окружающей жидкости. Если нагреть жидкость до такой температуры, чтобы давление насыщенного пара стало равным давлению вне пузырька, то пузырек начнет расти за счет испарения жидкости с его внутренней поверхности и подниматься вверх под действием силы Архимеда. Двухфазная система – жидкость с воздушными пузырьками – становится механически неустойчивой, и начинается процесс кипения. Граница устойчивости определяется такой температурой, при которой давление насыщенного пара равно сумме атмосферного и гидростатического давлений на рассматриваемой высоте. Это и есть температура кипения.

Задания для самостоятельной работы

1. Включить переключатель "сеть" на передней панели прибора.
2. Включить переключатель "нагрев", 1 ступень. Выждать, пока показания температуры на табло электронного измерителя-регулятора перестанут изменяться. Это означает, что инфракрасный нагреватель отключился после достижения заданной температуры воды.
3. а) включить заданной центробежный насос выключателем "насос"; б) перевести рычаг вакуумного крана на четверть оборота по часовой стрелке, тем самым, соединив откачиваемый объем с вакуумным водоструйным насосом.
4. Дождаться закипания воды; а) перевести рычаг крана в первоначальное положение; б) выключить насос. Снять показания температуры и давления на табло измерителя-регулятора и манометра.
5. Включить переключатель "нагрев", 2 ступень, одновременно снимая показания температуры и давления и записывая их в таблицу. Продолжать нагрев до температуры 60° С. Для произвольной промежуточной температуры

вновь произвести откачку в описанном выше порядке. Убедиться, что установилось динамическое равновесие между водой и насыщенным паром, и продолжительность процесса откачки не влияет на давление водяного пара. Выключить нагреватель.

6. По данным таблицы построить график зависимости $\ln \frac{P_0}{P}$ от $1/T$, убедиться в его линейности. По угловому коэффициенту, а также методом наименьших квадратов определить L – теплоту парообразования воды (см. Приложение).
7. Произвести напуск воздуха в установку, для чего перевести рычаг вакуумного крана на четверть оборота против часовой стрелки.

Приложение

Зависимость температуры кипения жидкости от внешнего давления можно определить двумя способами.

Способ первый

Рассмотрим сосуд, площадью сечения S , с одним молем воды (молярный объем $V_1=18$ мл). Для того, чтобы паровой фазы не было, непосредственно на жидкости лежит поршень m_n . На поршне находится груз m_{zp} , причем масса груза намного меньше массы поршня ($m_{zp} \ll m_n$). Исходное состояние жидкости характеризуется температурой T и давлением $P=P_{атм}+(m_n+m_{zp})g/S$ (гидростатическим давлением ρgh можно пренебречь, т.к. высота столба жидкости очень мала). Состояние системы графически изображается точкой A на горизонтальной части изотермы реального газа (рис.2), соответствующей температуре газа T (по оси абсцисс отложен молярный объем).

Пусть $T_n=T$ – температура нагревателя, при которой давление насыщенного водяного пара превышает $P=P_{атм}+(m_n+m_{zp})g/S$ на малую величину. Это условие является необходимым для кипения жидкости. Приведем сосуд в контакт с нагревателем (рис.3). За счет теплоты нагревателя жидкость начинает испаряться, в результате чего поршень поднимается – происходит изотермическое расширение пара. Давление при этом сохраняется прежним, равным P , ибо ни одна из величин, входящих в выражение для P , не изменяется, и пар все время остается насыщенным.

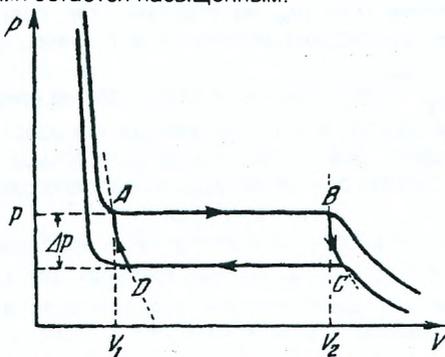


рис.2

Будем продолжать этот процесс до испарения всей жидкости. При этом система получает от нагревателя количество теплоты Q_0 . В результате объем пара увеличится до значения V_2 , занимаемого одним молеи пара при давлении P и температуре T . Состояние системы, в этот момент, графически изображается точкой B (рис.2). После этого отделим систему от нагревателя и дополнительно расширим пар адиабатно, так, чтобы его температура понизилась на ΔT , а давление – на ΔP . Для осуществления адиабатного процесса необходимо поместить сосуд в теплоизолированную оболочку и снять с поршня груз бесконечно малой массы m_{ap} . Эта часть цикла изображается участком BC . Точка C изображает состояние пара при давлении $P - \Delta P$ и температуре $T - \Delta T$.

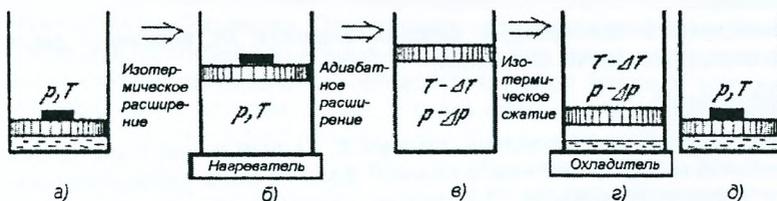


рис. 3

В этом состоянии приведем нашу систему в контакт с охладителем, обладающим температурой немного меньшей $T - \Delta T$. Произойдет изотермическое сжатие пара при постоянном давлении $P - \Delta P$ до почти полной его конденсации, т.е. пар перейдет в состояние, соответствующее точке D вдоль прямой CD новой изотермы, при этом часть теплоты Q_1 передается охладителю. Контакт охладителя с системой следует прекратить в строго определенный момент, а именно когда параметры системы в состояниях, соответствующих точкам D и A , станут удовлетворять уравнению адиабаты, т.е. точки D и A на диаграмме будут лежать на одной адиабате. В этот момент в сосуде будет жидкость и небольшое количество пара.

Наконец, отделим систему от охладителя и над оставшимся паром произведем адиабатное сжатие; для этого поместим сосуд в теплоизолированную оболочку и вернем груз m_{ap} на поршень, т.е. повысим давление и температуру системы до исходных значений P и T , завершив, таким образом, цикл Карно.

Часть теплоты Q_0 , подведенной к системе, идет на приращение внутренней энергии системы, другая часть – на совершение работы ΔA . Работа ΔA , произведенная за цикл, равна, как известно, площади $ABCD$, которую приближенно можно считать равной площади параллелограмма:

$$\Delta A = (V_2 - V_1) \Delta p \quad (1)$$

Однако на внешнюю работу ΔA тратится лишь небольшая часть теплоты Q_0 , т.е. отношение ΔA к Q_0 гораздо меньше единицы (так, при нагревании на один градус давление насыщенного водяного пара возрастает на 0,0352 атм и, если пренебречь удельным объемом жидкости, а водяной пар считать иде-

альным газом, то $\frac{\Delta A}{Q_0} = \frac{R\Delta T}{Q_0} = 0,076$). Следовательно, Q_0 можно считать равной

молярной скрытой теплоте испарения L . Поэтому коэффициент полезного действия проведенного цикла, определяемый отношением полученной работы к затраченному количеству теплоты (т.е. к количеству теплоты, полученному от нагревателя), равен:

$$\eta = \frac{V_2 - V_1}{L} \Delta p. \quad (2)$$

С другой стороны, коэффициент полезного действия цикла Карно во всех случаях определяется равенством:

$$\eta = \frac{T_1 - T_2}{T_1} = \frac{\Delta T}{T}. \quad (3)$$

Приравнявая оба эти выражения для η , получим:

$$\frac{V_2 - V_1}{L} \Delta p = \frac{\Delta T}{T} \quad \text{или} \quad \frac{\Delta p}{\Delta T} = \frac{L}{T(V_2 - V_1)}. \quad (4)$$

Перейдя в последнем уравнении к пределу, получим:

$$\frac{dp}{dT} = \frac{L}{T(V_2 - V_1)} \quad (5)$$

Уравнение (5), определяющее вид температурной зависимости давления насыщенного пара, называется уравнением *Клапейрона-Клаузиуса*. Оно справедливо не только для перехода жидкость – пар, но и для всех других фазовых переходов, выражая собой изменение давления, при котором фазы находятся в равновесии, с изменением температуры.

В уравнении (5) V_2 и V_1 представляют собой молярные объемы пара и жидкости. Известно, что если вещество находится в состоянии, далеком от критического, то молярный объем жидкости значительно меньше молярного объема пара. Поэтому величиной V_1 в уравнении можно пренебречь по сравнению с V_2 . Заметим, что при сравнительно небольших давлениях насыщенного пара объем V_2 может быть выражен через давление по уравнению Клапейрона ($V_2 = RT/p$), поэтому уравнение (5) можно переписать в виде:

$$\frac{dp}{dT} = \frac{L}{T \frac{RT}{p}} \quad \text{или} \quad \frac{dp}{p} = \frac{L}{R} \frac{dT}{T^2} \quad (6)$$

Интегрируя последнее уравнение, в предположении, что L не зависит от температуры, получаем:

$$\int_p^{P_0} \frac{dp}{p} = \int_{T_0}^{T_0} \frac{L}{R} \frac{dT}{T^2} \Rightarrow \ln \frac{P_0}{p} = -\frac{L}{RT_0} + \frac{L}{RT}, \quad (7)$$

где P_0 давление насыщенного водяного пара при температуре T_0 (значение P_0 можно взять из таблицы давлений насыщенного водяного пара при любой температуре T_0). Так, при $T_0=373$ К, что соответствует температуре кипения дистиллированной воды при нормальном внешнем давлении, давление насыщенного водяного пара P_0 равно атмосферному давлению ($P_0=101325$ Па). Необходимо отметить, что вода в кювете может содержать некоторые примеси, что влияет на точность измерения.

Проведем замену: $\ln \frac{P_0}{p} = Y$, а $\frac{1}{T} = X$. Заметим, что зависимость Y от X линейная, и ее можно представить в виде:

$$Y = A X + B, \quad (8)$$

где $A = \frac{L}{R}$ и $B = -\frac{L}{RT_0}$.

Для получения коэффициентов A и B , наилучшим образом удовлетворяющих экспериментальным значениям $\ln \frac{P_0}{p_i} = Y_i$ и $\frac{1}{T_i} = X_i$, воспользуемся методом наименьших квадратов (МНК).

Согласно МНК наилучшей прямой соответствует минимум суммы:

$$S = \sum_{i=1}^N (AX_i + B - Y_i)^2,$$

где N – число экспериментальных точек.

Условия минимума суммы $\frac{\partial S}{\partial A} = 0$ и $\frac{\partial S}{\partial B} = 0$ приводят к следующей системе из двух уравнений для определения неизвестных A и B :

$$\begin{cases} Aq + Bp = z_1 \\ Ap + BN = z_2 \end{cases},$$

где

$$\begin{aligned} q &= \sum_{i=1}^N X_i^2, & p &= \sum_{i=1}^N X_i, \\ z_1 &= \sum_{i=1}^N Y_i X_i, & z_2 &= \sum_{i=1}^N Y_i \end{aligned}$$

Решая систему, находим:

$$A = \frac{Nz_1 - pz_2}{Nq - p^2}, \quad B = \frac{qz_2 - pz_1}{Nq - p^2}.$$

Поскольку значения Y_i определены с погрешностью ΔY , то и постоянные A и B определяются с некоторой погрешностью. Погрешности в определении постоянных A и B вычисляются по формулам:

$$\Delta A = \frac{N}{N-2} \frac{\sum_{i=1}^N (AX_i + B - Y_i)^2}{Nq - p^2},$$

$$\Delta B = \left(\frac{1}{N} + \frac{q}{Nq - p^2} \right) \frac{\sum_{i=1}^N (AX_i + B - Y_i)^2}{N-2}$$

Способ второй

Воспользуемся законом Больцмана, согласно которому число молекул n в единице объема (концентрация), обладающих при равновесии потенциальной энергией U , определяется равенством:

$$n = n_0 \cdot e^{-\frac{U}{kT}}, \quad (9)$$

где n_0 концентрация молекул, обладающих нулевой энергией, T – абсолютная температура, k – постоянная Больцмана.

Уравнение (9) можно применить к интересующему нас случаю равновесия жидкости с соприкасающимся с ней насыщенным паром. Молекулы в жидкости обладают отрицательной потенциальной энергией. В парообразном состоянии, если считать пар идеальным газом, потенциальная энергия молекул жидкости равна нулю. Следовательно, при испарении потенциальная энергия молекул увеличивается на величину L/N_a , где L – молярная скрытая теплота испарения и N_a – число Авогадро.

Молярная теплота испарения – это количество тепла, которое необходимо подвести к жидкости, чтобы испарить один моль ее без изменения температуры, при внешнем давлении, равном давлению насыщенных паров.

Величина L/N_a и есть энергия U , входящая в формулу (9), напомним, как отмечалось ранее, работой против внешних сил можно пренебречь. Поэтому концентрация молекул пара n_n определяется равенством:

$$n_n = n_{\text{ж}} \cdot e^{-\frac{L}{N_a k T}}, \quad (10)$$

где $n_{\text{ж}}$ – концентрация молекул жидкости, потенциальную энергию которых принимаем равной нулю.

Согласно известной формуле кинетической теории газов концентрация молекул водяного пара связана с его давлением равенством:

$$n_n = \frac{p}{k T} \quad (11)$$

Подставляя выражение (11) в (10), получим:

$$p = n_n k T = n_{\text{ж}} k T \cdot e^{-\frac{L}{N_a k T}} \quad (12)$$

Аналогичное уравнение можно получить зная давление насыщенного водяного пара P_0 при температуре T_0 :

$$p_0 = n_n k T_0 = n_{\text{ж}} k T_0 \cdot e^{-\frac{L}{N_a k T_0}} \quad (13)$$

Поделим уравнение (13) на уравнение (12), и после несложных преобразований, учтя, что $N_a k = R$, получим:

$$\ln \frac{p_0}{p} = -\frac{L}{R T_0} + \frac{L}{R T} - \ln \frac{T}{T_0} \quad (14)$$

Учтем, что величина $\ln \frac{T}{T_0}$ пренебрежимо мала. Таким образом, полученные разными способами уравнения (14) и (7) совпадают.

Заметим, что при строгом рассмотрении уравнения (12) необходимо учитывать, что входящие в него величины L и $n_{\text{ж}}$ сами зависят от температуры. Может возникнуть вопрос, также, о правомерности использования модели идеального газа для описания поведения пара. Более подходящим было бы здесь уравнение состояния Ван-дер-Ваальса:

$$\left(p + \frac{a}{V^2}\right) \cdot (V - b) = RT$$

Однако, как показывают расчеты, пренебрежение слагаемым a/V^2 для водяного пара при атмосферном давлении вносит погрешность <3% (при меньшем давлении – еще меньше), а пренебрежение b – погрешность <0,5%. Таким образом, использование уравнения (12) не вносит значительной погрешности.

Контрольные вопросы

1. Начертите график зависимости температуры жидкости от времени нагрева при неизменном давлении и поясните его смысл.
2. Начертите график зависимости температуры кипения жидкости от внешнего давления и поясните его смысл.
3. Дайте определение скрытой удельной теплоты парообразования и конденсации жидкости.
4. Выведите уравнение Клапейрона-Клаузиуса.
5. Выведите зависимость температуры кипения жидкости от внешнего давления двумя способами.

Литература

1. Кембровский Г.С. Приближенные вычисления и методы обработки результатов измерений в физике. – Минск: Изд-во “Университетское”, 1990. – 189 с.
2. Кикоин А.К., Кикоин И.К. Молекулярная физика. – М.: Наука, 1976. – 480 с.
3. Матвеев А.Н. Молекулярная физика. – М.: Высшая школа, 1987. – 360 с.
4. Савельев И.В. Курс общей физики. – М.: Наука, 1982. Т. 1. Механика. Молекулярная физика. – 432 с.
5. Сивухин Д.В. Общий курс физики. – М.: Наука, 1990 Т. 2. Термодинамика и молекулярная физика – 592 с.
6. Физический практикум. / Под ред. Кембровского Г.С. – М.: Изд-во “Университетское”, 1986. – 352 с.

УЧЕБНОЕ ИЗДАНИЕ

Составители: Чугунов Сергей Владимирович
Чопчиц Николай Игнатьевич
Янусик Ирина Семеновна

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

к выполнению лабораторной работы М21

«Изучение зависимости кипения воды от внешнего давления»

по дисциплине
«Физика»

Ответственный за выпуск: Чугунов С.В.
Редактор: Строкач Т.В.
Компьютерная вёрстка: Кармаш Е.Л.
Корректор: Никитчик Е.В.

Подписано к печати 14.12.2007. Бумага писчая. Формат 60x84 $\frac{1}{16}$.
Усл.печ.л. 0,69. Уч.изд.л. 0,45. Тираж 60 экз. Заказ № 1314. Отпечатано на
ризографе Брестского государственного технического университета.
224017, Брест, ул. Московская, 267.