

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«КАЛИНИНГРАДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ»

В.А. ХАЛЯПИН

ФИЗИКА
МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА И ТЕРМОДИНАМИКА

Утверждено редакционно-издательским советом ФГБОУ ВО «КГТУ»
в качестве учебно-методического пособия по лабораторным работам для
студентов бакалавриата и специалитета в области техники и технологий

Калининград
Издательство ФГБОУ ВО «КГТУ»
2021

Рецензенты:

Доцент кафедры физики ФГБОУ ВО КГТУ В.А. Шуманов.

Халяпин В.А.

Физика. Молекулярная физика и термодинамика: учебно-методическое пособие по лабораторным работам для студентов бакалавриата и специалитета в области техники и технологий / В.А. Халяпин. – Калининград: Изд-во ФГБОУ ВО «КГТУ», 2021. – 95 с.

Учебно-методическое пособие рассмотрено и одобрено кафедрой физики ФГБОУ ВО «КГТУ» 18. 06. 2021 г., протокол №5

Учебно-методическое пособие рассмотрено и рекомендовано к печати учебно-методической комиссией факультета фундаментальной подготовки ФГБОУ ВО «КГТУ» 28. 10. 2021 г., протокол №02

© Федеральное государственное
бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Калининградский государственный
технический университет», 2021 г.
© Халяпин В.А., 2021 г.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
Лабораторная работа № 100 Введение в физику: основы физических измерений.....	5
Лабораторная работа № 300 Мощность, теплоемкость и КПД нагревателя.....	13
Лабораторная работа № 303 Определение теплоемкости металлов методом охлаждения.....	25
Лабораторная работа № 304 Кривая фазового равновесия воды	38
Лабораторная работа № 306 Изучение изотермического процесса. Проверка закона Бойля-Мариотта	53
Лабораторная работа № 307 Определение коэффициента теплопроводности воздуха методом нагретой нити.....	59
Лабораторная работа № 309 Определение влажности воздуха..	68
Лабораторная работа № 310 Определение отношений теплоёмкостей воздуха методом адиабатного расширения.....	73
Лабораторная работа № 313 Определение коэффициента внутреннего трения жидкости по “методу Стокса”.....	80
Лабораторная работа № 314 Определение коэффициента внутреннего трения, длины свободного пробега и эффективного диаметра молекул воздуха	85
ПРИЛОЖЕНИЯ	93

ВВЕДЕНИЕ

Физика – это наука о явлениях и свойствах материального мира Вселенной, изучающая взаимосвязи между явлениями и свойствами материи. Эти взаимосвязи называются физическими законами.

Законы физики лежат в основе современного естествознания и всей современной техники.

Физика – как наука – основана на опыте и прошла долгий период становления. Опыт (человеческий) можно подразделить на три формы:

1. Наблюдения за явлениями природы
2. Практическая деятельность
3. Эксперимент

Такое подразделение несколько условно, т.к. эти формы, особенно первая и вторая – взаимосвязаны. Изучение взаимосвязи между явлениями природы и опытными данными стало возможным только в условиях специально организованного эксперимента.

Эксперимент – это искусственное воспроизведение явлений природы с целью их детального изучения.

В процессе эксперимента появилась потребность систематизации характерных свойств явлений, необходимость использования и развития математического аппарата. Возникли – вначале – разнообразные системы единиц для количественных расчетов. Стали разрабатываться способы измерений, приборы и т.д.

В эксперименте появилось понятие физической величины, системы единиц и были установлены правила измерений и правила обработки результатов измерений.

Настоящее пособие содержит лабораторные работы по молекулярной физике и термодинамике. Дадим краткие определения этих направлений.

Молекулярная физика – раздел физики, изучающий свойства тел в зависимости от характера движения и взаимодействия частиц, образующих тело. Молекулярная физика исходит из представления об атомно-молекулярном строении вещества и рассматривает теплоту как беспорядочное движение атомов и молекул.

Термодинамика (от термо и динамика) - раздел физики, изучающий наиболее общие свойства макроскопических систем, находящихся в состоянии термодинамического равновесия, и процессы перехода между этими состояниями. (Неравновесные процессы изучает термодинамика неравновесных процессов.) Термодинамика строится на основе фундаментальных принципов - начал термодинамики, которые являются обобщением многочисленных наблюдений и результатов экспериментов (см. Первое начало термодинамики, Второе начало термодинамики, Третье начало термодинамики). Термодинамика возникла в 1-й пол. 19 в. в связи с развитием теории тепловых машин (С. Карно) и установлением закона сохранения энергии (Ю. Р. Майер, Дж. Джоуль, Г. Гельмгольц).

Лабораторная работа № 100.

ВВЕДЕНИЕ В ФИЗИКУ: ОСНОВЫ ФИЗИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ

Цель работы: формирование умений и навыков по использованию теоретических основ физических измерений и определению погрешностей измерений.

Задание:

1. Определить погрешности прямых измерений: случайных, приборных, округления.
2. Определить погрешности косвенных измерений

Методические указания и справочные данные по лабораторной работе:

1. Основные понятия теории измерений

Определение. Физическая величина – это понятие, определяющее некоторое свойство материального объекта, общее в качественном отношении для многих объектов, но в количественном отношении – индивидуальное для каждого объекта.

Примеры: длина, объем, масса, скорость, сила, напряженность поля, заряд и т.п.

Количественная характеристика физической величины – это ее численное значение (обозначим буквой x).

Качественная характеристика физической величины определяется ее размерностью (обозначим – $[x]$).

Обозначение физической величины X :

$$X = x \cdot [x]$$

Итак, любая физическая величина обозначается в виде произведения ее числового значения и размерности.

Для каждой физической величины имеется единичная мера. Сводка таких мер с указанием размерности называется системой единиц физических величин. В настоящее время принята Международная система единиц (СИ), утверждены 7 основных единиц: метр, килограмм, секунда, Ампер, Кельвин, канделла, моль. Остальные единицы – называются производными, т.к. получаются комбинациями основных единиц. (Примечание: Хорошим пособием с описанием эталонов основных единиц СИ является книга: А. Г. Чертов. Единицы физических величин. М.: Высшая школа, 1977.- 287 стр.)

Определение. Измерением называется процедура нахождения численного значения исследуемой физической величины с помощью специальных технических средств: мер и приборов.

Мера – это эталон для сравнения исследуемой физической величины с единицей. (Примеры: линейки, разновесы (гири), специальные наборы электросопротивлений, электроемкостей и т.п.)

Прибор – это устройство для преобразования сведений об исследуемой физической величине в сигнал, доступный органам чувств человека. (Примеры: амперметры, вольтметры, манометры, осциллографы, спектрографы и т.д.)

Измерения подразделяются на два основных вида: прямые и косвенные измерения.

Определение. Измерения называются прямыми, если численное значение исследуемой физической величины определяется с помощью меры либо непосредственно с помощью показаний прибора. (Примеры: измерение линейных размеров, взвешивание, измерение напряжения в сети вольтметром, силы тока – амперметром и т.д.)

Определение. Измерения называются косвенными, если численное значение исследуемой физической величины определяется расчетом с помощью формулы, куда подставляют данные прямых измерений. (Примеры: измерение объемов по данным линейных замеров, плотности массы по данным взвешивания тел и др.)

Определение. Результатом измерения является (называется) совокупность среднего значения исследуемой физической величины и доверительного интервала, внутри которого с заданной доверительной вероятностью находится численное значение данной физической величины.

Результат измерения представляется в виде:

$$X = (\langle x \rangle \pm \Delta x) \cdot [x]$$

Интервал: $(\langle x \rangle - \Delta x) < x < (\langle x \rangle + \Delta x)$ – называется *доверительным интервалом*.

Здесь: $\langle x \rangle$ – среднее значение, где угловые скобки $\langle \dots \rangle$ – это символ, указывающий, что выполнена математическая операция усреднения; $[x]$ – размерность. Δx – отклонение от среднего, определяющее ширину доверительного интервала.

Примечание: величину Δx часто называют погрешностью измерений, т.к. ее значение зависит от квалификации персонала, качества приборов и ряда других причин; значение Δx может быть уменьшено, но не до нуля, т.к. абсолютно точных («истинных») числовых значений физических величин в природе не существует. Точные числа (например, 4.5 или 10) – это всегда абстракция. Можно сказать: «в комнате 10 столов», – но стол – это не физическая величина, если измерять размеры и массы этих столов – они всегда будут различаться между собой, кроме того, массу и размеры каждого стола также можно измерить лишь в некоторых интервалах числовых значений.

Рассмотрим понятие «доверительная вероятность», которую обычно обозначают – p , и ее значение:

$$0 < p < 1$$

Смысл p – как доверительной вероятности – в том, что она определяет количество попаданий в найденный интервал $\pm \Delta x$ из полного числа измерений данной физической величины. Если $p=0,5$ – это значит, что, например, из 10 выполненных измерений 5 найденных значений окажутся внутри интервала; при $p=0,9$ – 9 значений из 10 будут внутри интервала.

Примечание. В технике существует понятие «надёжность». Это понятие тесно увязано с понятием «доверительная вероятность», т.к. надёжность техники обеспечивается качеством изготовления, которое контролируется измерениями.

Надёжность обозначается α и находится в интервале $0 < \alpha < 1$. Допустим, надёжность партии телевизоров $\alpha = 0,9$; это значит, что из 100 изготовленных телевизоров для 90 штук гарантируется безотказная работа на гарантийный срок, 10 штук – могут преждевременно выйти из строя, и для них завод-изготовитель выпускает запасные блоки для бесплатного ремонта.

Если представить, что пассажирские самолеты имеют надёжность $\alpha = 0,9$ – это значит, что из 100 изготовленных самолетов 10 штук могут потерпеть аварию в первом же рейсе. Такая низкая надёжность авиатранспорта недопустима. В авиации $\alpha \approx 0,997$, т.е. на 1 тысячу изготовленных самолетов допускается 3 аварии. Дальнейшее повышение надёжности обходится очень дорого.

2. Два главных правила прямых измерений

Первое правило – в том, что каждое измерение следует выполнить несколько раз, чтобы избежать промаха, т.е. ошибки в регистрации численного значения исследуемой величины. (Пословица: «семь раз отмерь – потом отрезай»)

Второе правило: необходимо выбрать средство измерения (меру или прибор) и количество измерений таким образом, чтобы обеспечить заданную точность определения среднего численного значения исследуемой физической величины.

Точностью определения среднего значения называется отношение полуширины интервала Δx к среднему значению $\langle x \rangle$, вычисляемое обычно в процентах и обозначаемое буквой ε :

$$\varepsilon = \frac{\Delta x}{\langle x \rangle} 100\%$$

Примечание: иногда значение ε называют относительной ошибкой измерения.

Пояснение: Выполнение второго правила требует достаточной квалификации и в учебной лаборатории обычно заранее указывают каким способом выполняется измерение, т.е. каким прибором и сколько раз требуется выполнять измерение. Точность определения среднего значения вычисляется при обработке результатов измерения.

3. Порядок выполнения и обработка результатов прямых измерений

В теории прямых измерений установлено, что доверительный интервал Δx определяется двумя видами отклонений: случайными и систематическими отклонениями.

Случайные отклонения вызваны флуктуациями измеряемой физической величины и органов чувств человека.

Систематические отклонения вызваны техническими свойствами средств измерений.

Совокупность случайных отклонений определяет значение $\Delta x_{сл}$, которое принято называть случайной статистической ошибкой (или погрешностью).

В учебной лаборатории обычно для прямых измерений некоторой величины (например, линейного размера, интервала времени и т.д.) указано количество измерений – n , которое называется в теории измерений выборкой.

В процессе измерений получают ряд значений выборки:

$$x_1; x_2; x_3; x_4; x_5 \dots x_n$$

Затем вычисляют среднее значение:

$$\langle x \rangle = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}$$

и случайные отклонения Δx_i :

$$\Delta x_i = x_i - \langle x \rangle, \text{ где } i=1 \dots n$$

Значения Δx_i могут быть положительными, отрицательными либо равными нулю.

Обычно выполняется проверка достоверности выборки, т.е. заданного количества измерений. Для этого вычисляют сумму случайных отклонений: $\sum \Delta x_i$. Если $\sum \Delta x_i \approx 0$, количество измерений достаточно и можно выполнять обработку результатов.

Затем вычисляется величина, называемая стандартным среднеквадратичным отклонением:

$$S_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\Delta x_i)^2}{n(n-1)}}$$

Для расчета $\Delta x_{сл}$ требуется учесть заданную в эксперименте доверительную вероятность p и найти в специальной таблице (см. Приложение) значение коэффициента Стьюдента: $t_{p,n}$, величина которого зависит от p и количества измерений n .

Примечание. Английский математик У.С.Госсет (псевдоним Student – Студент) в 1903 г. доказал: для ограниченного числа (выборки) случайных событий (величин) существует закон распределения, на основе которого можно вычислять доверительные интервалы при малом числе измерений. Необходимые для таких расчетов коэффициенты получили название – коэффициенты Стьюдента.

Значение $\Delta x_{сл}$ равно:

$$\Delta x_{сл} = t_{p,n} \cdot S_x$$

Совокупность систематических отклонений определяет значение Δx_{np} , которое принято называть систематической ошибкой (или погрешностью). Иногда к систематическим приборным отклонениям добавляют ошибку округления $\Delta x_{окр}$ на шкале прибора. Для расчётов этих величин существуют разработанные правила.

Значение $\Delta x_{окр}$ для приборов, имеющих указатель в виде стрелки, определяется формулой:

$$\Delta x_{окр} = p \frac{h}{2}$$

где h – цена деления шкалы прибора. Для линейек, штангенциркулей, микрометров значение $\Delta x_{окр}$ вычисляется по такой же формуле. При этом всегда учитывается цена минимального деления шкалы.

Для цифровых приборов существуют особые правила расчета $\Delta x_{окр}$, но обычно этой величиной пренебрегают ввиду ее малости.

Значение Δx_{np} для приборов, имеющих указатель в виде стрелки, определяется формулой:

$$\Delta x_{np} = \lambda_p \frac{\sigma_{np}}{3}; \text{ где } \sigma_{np} = \frac{kX_{max}}{100} - \text{ стандартное отклонение прибора; } X_{max} -$$

предельное значение шкалы; k – класс точности прибора; λ_p – значение коэффициента Стьюдента при $n > 100$ (см. Приложение 1). Существует 9 классов точности: 0,02; 0,05; 0,1; 0,2; 0,5; 1; 1,5; 2,5; 4. Эти данные обычно указаны на приборе в виде цифры, обведенной кружком.

Для линейек, штангенциркулей, микрометров значение Δx_{np} обычно равно цене минимального деления. Для цифровых приборов значение Δx_{np} даны в аттестате.

Значение доверительного интервала вычисляется с помощью формулы:

$$\Delta x = \sqrt{\Delta x_{сл}^2 + \Delta x_{np}^2 + \Delta x_{окр}^2}$$

В некоторых случаях значения $\Delta x_{окр}$ и Δx_{np} не учитываются ввиду их малости по сравнению с $\Delta x_{сл}$. На практике, однако, иногда выполняют измерения при условиях: $\Delta x_{np} \gg \Delta x_{сл}$ и $\Delta x_{окр} \gg \Delta x_{сл}$ – когда значение доверительного интервала определяется только систематическими отклонениями, обусловленными качеством средств измерений.

После завершения всех расчетов, необходимых для обработки измерений, результат прямых измерений представляется в указанном выше виде:

$$X = (\langle x \rangle \pm \Delta x)[x]$$

4. Обработка результатов косвенных измерений

Результат косвенного измерения определяется с помощью некоторой формулы, куда подставляют результаты прямых измерений. При этом должны

быть известны средние значения и доверительные интервалы для результатов прямых измерений.

Представим формулу для расчёта в виде функции, где переменными являются результаты прямых измерений.

Например, объём шара:

$$V = f(r) = \frac{4}{3} \pi r^3,$$

площадь прямоугольника:

$$S = f(a, b) = a \cdot b,$$

плотность массы:

$$\rho = f(V, m) = \frac{m}{V},$$

объем параллелепипеда:

$$V = f(a, b, c) = a \cdot b \cdot c$$

Формулы могут иметь более сложный вид, содержать степенные либо тригонометрические функции, иметь большое число переменных.

Рассмотрим в общем виде функцию двух переменных:

$$F = f(x, y)$$

где x, y – результаты прямых измерений;

$$x = \langle x \rangle \pm \Delta x;$$

$$y = \langle y \rangle \pm \Delta y;$$

В теории измерений доказано, что среднее значение результата косвенных измерений вычисляется подстановкой в соответствующую формулу средних значений результатов прямых измерений:

$$\langle F \rangle = f(\langle x \rangle, \langle y \rangle)$$

Для расчёта доверительного интервала $\pm \Delta F$ используется правило вычисления *дифференциала* функции. При этом учитывается физическое содержание (физическое понятие) дифференциала, а именно: дифференциал определяет область (интервал) существования значений данной функции в зависимости от области (интервала), в котором заданы переменные.

Итак, выполняя дифференцирование функции двух переменных, имеем:

$$dF = \frac{\partial f}{\partial x} dx + \frac{\partial f}{\partial y} dy$$

Эта математическая формула преобразуется в теории измерений к другому виду, во-первых, заменой $dF \rightarrow \Delta F; dx \rightarrow \Delta x; dy \rightarrow \Delta y$ и, во-вторых, вычислением модуля значений величины ΔF , т.к. производные от функции могут иметь положительный и отрицательный знаки, но погрешности измерений не могут «компенсировать» друг друга, а должны только суммироваться. Применяя известное правило вычисления *модуля*, получим формулу:

$$\Delta F = \sqrt{(\Delta F)^2} = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x} \Delta x\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial y} \Delta y\right)^2}$$

В этой формуле под знаком корня «отброшены» удвоенные произведения как величины более высокого порядка малости. Положительное значение

радикала определяет модуль значения ΔF - интервала, в котором существует найденное в эксперименте численное значение результата косвенных измерений. Окончательный результат имеет вид:

$$F = (\langle F \rangle \pm \Delta F) \cdot [F]$$

Следует помнить, что все значения для результатов прямых измерений должны вычисляться при одной и той же доверительной вероятности p . При этом же значении p будет определен интервал ΔF .

5. Правила представления результатов измерений

Численное значение отклонений при расчете доверительного интервала определяется одной – двумя значащими цифрами. Напомним, что для записи чисел используется десять цифр: 0; 1; 2; 3; 4; 5; 6; 7; 8; 9. Значащими цифрами числа называются все цифры, начиная с первой слева, отличной от нуля, до последней. Например, при измерении некоторых линейных размеров L найдено: $L_1 = 1200$ м; $L_2 = 208$ м; $L_3 = 0.0406$ м. Число L_1 содержит четыре значащие цифры, L_2 – три значащих цифры, L_3 – три значащих цифры.

Количество и порядок знаков (цифр) при расчете средних значений определяется порядком знаков (цифр) у доверительного интервала. Если значение отклонения определяется целым числом, тогда среднее значение также должно быть найдено в виде целого числа. Если значения отклонений определяются десятками, сотыми и т.д. долями – тогда средние значения должны быть вычислены с тем же количеством знаков десятичной дроби.

Рекомендуется записывать среднее значение измеренной физической величины в виде десятичной дроби так, чтобы перед запятой сохранялась одна значащая цифра, а после запятой – количество значащих цифр, соответствующее порядку величины погрешности (при этом сама погрешность содержит одну-две значащие цифры).

Общий порядок результата измерения выносится за скобку в виде множителя 10^N , где N – показатель степени – положительное либо отрицательное целое число.

В качестве примеров покажем современные результаты измерений некоторых фундаментальных физических констант.

Скорость света в вакууме $C = (2.99792458 \pm 0.00000012) \cdot 10^8$ м/с.

Масса электрона $m_e = (9.1093826 \pm 0.0000016) \cdot 10^{-31}$ кг

Постоянная Планка $h = (6.6260693 \pm 0.0000011) \cdot 10^{-34}$ Дж·с

Атомная единица массы (а.е.м.) = $(1.66053886 \pm 0.00000028) \cdot 10^{-27}$ кг

Примечание. На практике допускается представление результатов в более простой форме, например:

$$L = (3152 \pm 28) \text{ м}$$

$$U = (12.56 \pm 0.14) \text{ В}$$

При более строгих требованиях эти же результаты должны быть записаны в виде:

$$L = (3.152 \pm 0.028) \cdot 10^3 \text{ м}$$

$$U = (1.256 \pm 0.014) \cdot 10 \text{ В}$$

В отчетах, содержащих результаты измерений, требуется также указать точность ε и доверительную вероятность p полученного результата.

6. Примеры формул для расчёта отклонений от среднего (погрешностей) функций одной и нескольких переменных

Вид функции x, y, z – переменные; A, a, b, c - Const	Погрешность Δf
$f(x) = cx$	$c \cdot \Delta x$
$f(x) = cx^3$	$3 \cdot c \cdot x^2 \cdot \Delta x$
$f(x) = cx^n$	$n \cdot c \cdot x^{(n-1)} \cdot \Delta x$
$f(x) = \sqrt[n]{x}$	$\frac{1}{n} \cdot \frac{\sqrt[n]{x}}{x} \cdot \Delta x$
$f(x) = e^{cx}$	$Ce^{cx} \cdot \Delta x$
$f(x) = A^{cx}$	$c \cdot A^{cx} \cdot \ln A \cdot \Delta x$
$f(x) = \ln x$	$\frac{\Delta x}{x}$
$f(x) = \sin(cx)$	$c \cdot \cos(cx) \cdot \Delta x$
$f(x) = \sin(cx^2)$	$2c \cdot x \cdot \cos(cx^2) \cdot \Delta x$
$f(x) = \cos(cx)$	$c \cdot \sin(cx) \cdot \Delta x$
$f(x) = \sin x + \cos x$	Δx
$f(x, y) = \sin x + \cos y$	$\sqrt{(\cos x \cdot \Delta x)^2 + (\sin y \cdot \Delta y)^2}$
$f(x, y) = \sin x \cdot \cos y$	$\sqrt{(\cos x \cdot \cos y \cdot \Delta x)^2 + (\sin x \cdot \sin y \cdot \Delta y)^2}$
$f(x) = \operatorname{tg}(cx)$	$c \cdot \frac{1}{\cos^2(cx)} \cdot \Delta x$
$f(x) = \operatorname{ctg}(cx)$	$c \cdot \frac{1}{\sin^2(cx)} \cdot \Delta x$
$f(x) = \arcsin(x)$	$\frac{\Delta x}{\sqrt{1-x^2}}$
$f(x, y) = ax^2 + by^3$	$\sqrt{(2ax \cdot \Delta x)^2 + (3by^2 \cdot \Delta y)^2}$
$f(x, y, z) = ax + by + cz$	$\sqrt{(a\Delta x)^2 + (b\Delta y)^2 + (c\Delta z)^2}$
$f(x, y, z) = ax - by - cz$	$\sqrt{(a\Delta x)^2 + (b\Delta y)^2 + (c\Delta z)^2}$
$f(x, y) = xy$	$\sqrt{(y \cdot \Delta x)^2 + (x \cdot \Delta y)^2}$
$f(x, y) = x^2y^3$	$\sqrt{(2x \cdot y^3 \cdot \Delta x)^2 + (3y^2 \cdot x^2 \cdot \Delta y)^2}$

$f(x, y) = \frac{x}{y}$	$\frac{\sqrt{(y \cdot \Delta x)^2 + (x \cdot \Delta y)^2}}{y^2}$
$f(x, y) = \frac{x}{x + y}$	$\frac{\sqrt{(y \cdot \Delta x)^2 + (x \cdot \Delta y)^2}}{(x + y)^2}$
$f(x, y) = \frac{x}{x - y}$	$\frac{\sqrt{(y \cdot \Delta x)^2 + (x \cdot \Delta y)^2}}{(x - y)^2}$
$f(x, y, z) = x \cdot y + z$	$\sqrt{(y \cdot \Delta x)^2 + (x \cdot \Delta y)^2 + (\Delta z)^2}$
$f(x, y, z) = x(y + z)$	$\sqrt{(y + z)^2 \cdot \Delta x^2 + x^2(\Delta y^2 + \Delta z^2)}$

Примечание. Область существования переменных x, y, z ограничена интервалами, для которых функции и дифференциалы функций не имеют бесконечных значений.

7. Задания для самостоятельного решения

1. Найти Δf для функций: $f(x) = \arctg x$; $f(x, y) = \sqrt{x^2 + y^2}$; $f(x, y) = y \cdot x^y$; $f(x, y) = y^{x^2}$; $f(x, y) = (x^2 - y^2)/(x^2 + y^2)$; $f(x, y) = \ln(x^2 + y^2)$.

2. Измерены радиус R и масса m шара: $R = (10,0 \pm 0,2) \text{ мм}$; $m = (3,6 \pm 0,1) \cdot 10^{-2} \text{ кг}$. Определить плотность: $\rho = (\langle \rho \rangle \pm \Delta \rho) [\text{кг/м}^3]$ и точность определения плотности: $\varepsilon = (\Delta \rho / \langle \rho \rangle) \cdot 100\%$.

3. Автомобиль проходит точку A с начальной скоростью $v_0 = (2,0 \pm 0,1) \text{ м/с}$ и движется дальше по прямолинейному участку шоссе с постоянным ускорением $a = (0,20 \pm 0,01) \text{ м/с}^2$ до точки B .

Расстояние от A до B равно $l = (800 \pm 8) \text{ м}$. Требуется найти среднюю скорость автомобиля $\langle v \rangle$ в точке B и величину интервала Δv , в котором будет определена скорость $v = \langle v \rangle \pm \Delta v$.

Примечание. Все отклонения (погрешности) $\Delta v_0, \Delta a, \Delta l$ заданы с одинаковой доверительной вероятностью p , конкретная величина которой не существенна для данной задачи.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 300 МОЩНОСТЬ, ТЕПЛОЁМКОСТЬ И КПД НАГРЕВАТЕЛЯ

Цель работы: формирование умений и навыков по овладению методикой многофакторного эксперимента с учётом помех и потерь.

Задание: Изучение теплового баланса нагревателя. Определение электросопротивления печи. Определение мощности потерь и теплоёмкости системы. Определение КПД нагревателя.

Методические указания и справочные данные по лабораторной работе:

ОБОРУДОВАНИЕ И ПРИНАДЛЕЖНОСТИ:

- | | |
|--|--|
| 1. Измерительная система ИСТ-2М. | 11. Мультиметр. |
| 2. Модуль M01 – печь-термостат. | 12. Соединительные провода. |
| 3. Секундомер. | |
| 4. Пустой тигель. | |
| 5. Теплоизолирующий кожух (для тигля). | |
| 6. Глицерин. | Примечание: мультиметр и секундомер хранятся в сейфе лаборатории, остальное – в выдвижных ящиках установки. |
| 7. Пипетка. | |
| 8. Салфетка. | |
| 9. Перчатка защитная. | |
| 10. Вода водопроводная. | |

1. ВВЕДЕНИЕ

Термодинамика, не входя в микроскопическое рассмотрение процессов, позволяет делать целый ряд выводов относительно их общего протекания. Весьма обширный класс технических проблем, связанный с переводом энергии из одних форм в другие и с получением за счёт энергии работы, может быть разобран с термодинамической точки зрения.

Одним из основных тепловых свойств является *теплоёмкость*. Теплоёмкостью тела называется физическая величина, численно равная отношению теплоты δQ , сообщаемой телу, к изменению dT температуры тела в рассматриваемом термодинамическом процессе:

$$C = \frac{\delta Q}{dT} \quad \left[\frac{\text{Дж}}{\text{К}} \right] \quad (1)$$

Теплоёмкость тела зависит от его химического состава, массы тела, его термодинамического состояния, от вида процесса изменения состояния тела, в котором поступает теплота δQ . Для характеристики тепловых свойств однородных тел используются понятия удельной и молярной теплоёмкости.

Удельной теплоёмкостью называется физическая величина c , численно равная теплоте, которую нужно сообщить одному килограмму вещества для изменения его температуры на 1К в рассматриваемом термодинамическом процессе:

$$c = \frac{1}{m} \cdot \frac{\delta Q}{dT} \quad \left[\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}} \right] \quad (2)$$

Молярной теплоёмкостью называется физическая величина C_μ , численно равная теплоте, которую нужно сообщить одному молю вещества для изменения его температуры на 1К в рассматриваемом термодинамическом процессе:

$$C_\mu = \frac{1}{\nu} \cdot \frac{\delta Q}{dT} = \frac{\mu}{m} \cdot \frac{\delta Q}{dT} = \mu \cdot c \quad \left[\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}} \right], \quad (3)$$

где μ - молярная масса вещества;

$\nu = \frac{m}{\mu}$ - количество вещества.

Таким образом, связь между δQ и dT для однородного тела имеет вид:

$$\delta Q = m \cdot c \cdot dT = \frac{m}{\mu} \cdot C_{\mu} \cdot dT = \nu \cdot C_{\mu} \cdot dT \quad (4)$$

Внутренняя энергия системы U зависит только от внутреннего состояния системы. Внутренняя энергия системы включает в себя энергию всевозможных видов движения и взаимодействия всех частиц (молекул, атомов, ионов и т.д.), образующих рассматриваемую систему. Внутренняя энергия является функцией состояния системы. В отношении функции состояния можно говорить о её запасе в каждом из состояний.

Каждое состояние системы может быть определено заданием определённых величин, характеризующих это состояние. Такие величины называются *параметрами*. Переход системы из одного состояния в другое происходит под влиянием внешних воздействий, к числу которых относится не только работа внешних сил δA , но и передача некоторого количества теплоты δQ . В отличие от внутренней энергии системы, которая является однозначной функцией состояния этой системы, понятие теплоты и работы имеет смысл только в связи с процессом изменения состояния системы. Они являются энергетическими характеристиками этого процесса. Нельзя говорить о запасе тепла и работы, которыми обладает система, в различных состояниях.

Первое начало термодинамики:

$$\delta Q = dU + \delta A \quad (5)$$

- *теплота, сообщаемая системе, расходуется на изменение внутренней энергии и на совершение системой работы против внешних сил.*

Первое начало термодинамики выражает всеобщий закон сохранения и превращения энергии, но не позволяет определить направление протекания процессов.

Второе начало термодинамики:

- *невозможен процесс, единственным результатом которого является превращение всей теплоты, полученной от некоторого тела, в эквивалентную ей работу;*

или - *невозможен процесс, единственным результатом которого является передача энергии в форме теплоты от тела менее нагретого к телу более нагретому.*

Из второго начала термодинамики следует независимость работы и теплоты как двух форм передачи энергии.

2. МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ МОЩНОСТИ ПОТЕРЬ, ТЕПЛОЁМКОСТИ СИСТЕМЫ И КПД НАГРЕВАТЕЛЯ

Используемая лабораторная установка позволяет исследовать параметры нагревателя печи – термостата.

При подаче на печь некоторого напряжения U_0 возникает ток I_0 . Для определения сопротивления печи используется закон Ома: $I_0 = U_0 / R$. Откуда сопротивление печи:

$$R = \frac{U_0}{I_0} \quad (6)$$

Из уравнения мощности нагрева $W = \frac{U^2}{R}$ находится напряжение, соответствующее желаемой мощности нагрева:

$$U = \sqrt{W \cdot R} \quad (7)$$

При измерении зависимости температуры печи от времени выбирается интервал ΔT градусов при двух мощностях нагрева W_1 и W_2 . Полагаем, что для одного и того же интервала температур ΔT мощность потерь W' одинакова в обеих процедурах. Из уравнений:

$$\begin{aligned} Q = W_{\text{п1}} \cdot \Delta t_1 & \quad Q = C_0 \cdot \Delta T & \quad W_{\text{п1}} = W_1 - W' \\ Q = W_{\text{п2}} \cdot \Delta t_2 & \quad Q = C_0 \cdot \Delta T & \quad W_{\text{п2}} = W_2 - W' \end{aligned} \quad (8)$$

где

Q - теплота, полученная системой;

$W_{\text{п}}$ - полезная мощность;

W' - мощность потерь;

$\Delta t_1, \Delta t_2$ - интервалы времени, за которые система проходит интервалы температур $\Delta T = 20$ °С при первом и втором нагреве;

C_0 - теплоёмкость системы

получаем уравнения

$$\begin{aligned} (W_1 - W') \cdot \Delta t_1 &= C_0 \cdot \Delta T \\ (W_2 - W') \cdot \Delta t_2 &= C_0 \cdot \Delta T \end{aligned} \quad (9)$$

Из системы (9) находим W' и C_0 :

$$W' = \frac{(W_1 \cdot \Delta t_1 - W_2 \cdot \Delta t_2)}{(\Delta t_1 - \Delta t_2)} \quad (10)$$

$$C_0 = \frac{(W_2 - W_1) \cdot \Delta t_1 \cdot \Delta t_2}{(\Delta T \cdot (\Delta t_1 - \Delta t_2))} \quad (11)$$

Мощность потерь W' зависит от конфигурации установленных на плите объектов.

Если поместить в тигель исследуемый образец и провести цикл нагрева с мощностью W , то при прохождении интервала температур ΔT за время Δt образец получит количество тепла:

$$Q = (W - W') \cdot \Delta t - C_0 \cdot \Delta T \quad (12)$$

Для определения КПД нагревателя необходимо воспользоваться формулой:

$$\eta = \frac{W_{\text{п}}}{W} \cdot 100\% \quad W_{\text{п}} = W - W' \quad ,$$

откуда

$$\eta = \frac{W - W'}{W} \cdot 100\% \quad (13)$$

3. ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

3.1. МОДУЛЬ M01. ПЕЧЬ-ТЕРМОСТАТ

Модуль M01(см.рис.2) состоит из плиты 3, установленной на основании прибора 6 на ножках 5 и окружённой теплоизолирующим кожухом 1. В плиту встроены два тепловыделяющих элемента (ТВЭЛ) 4 и датчик температуры 2. Снизу плита может охлаждаться вентилятором 7.

Сопротивление ТВЭЛ печи равно 10 Ом, максимальное напряжение питания ~20 В, максимальная мощность 40 Вт.

Изучаемый (нагреваемый) объект 8 устанавливается на плите и прижимается к ней стержнем 9 с помощью двух пружин 10. Пружины прицеплены к двум штырям 11 и при необходимости могут быть сняты. На объект надевается теплоизолирующий кожух.

Через разъём 12 модуль подключается к измерительной системе ИСТ-2М. Тумблер «ВЕНТ» включает вентилятор. Гнёзда «Н1» и «Н2» включены параллельно нагревателю и используются для измерения напряжения на нагревателе при необходимости точного определения выделяемой в нагревателе мощности настольным прибором - мультиметром (вольтметр измерительной системы ИСТ-2М не учитывает падения напряжения на проводах кабеля, что приводит к погрешности в определении мощности).

3.2. ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА ИСТ-2М.

На переднюю панель ИСТ-2М вынесены следующие элементы схемы или органы управления (см.рис.1):

«СЕТЬ» - тумблер включения сети;

Н1 – 4-разрядный цифровой индикатор. Его свечение свидетельствует о включении питания прибора. Интерпретация показаний определяется нажатой кнопкой переключателя;

«U_н» - напряжение питания нагревателя, вольт (В);

«I_н» - ток питания нагревателя, миллиампер (мА);

«Т1» - температура подключённого к системе датчика Д1 в °С с разрешением 0.1 °С ;

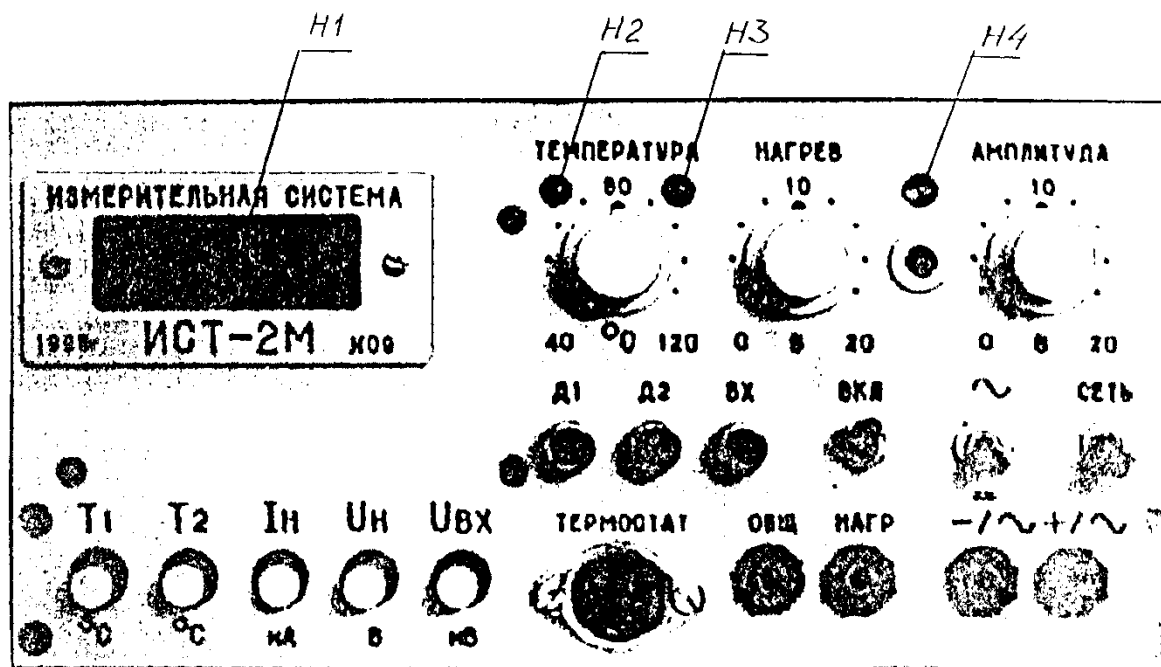


Рис.1

«Т2» - температура подключённого к системе датчика Д2 в $^{\circ}\text{C}$ с разрешением 0.1°C ;

« $U_{\text{ВХ}}$ » - действующее значение переменного напряжения, поданного на разъём «ВХ» с разрешением 1 мВ и пределом измерения 20 В.

«ТЕРМОСТАТ» - разъём термостата. Назначение контактов разъёма:

- 1 – датчик Д1;
- 2 – общий чистый (общий датчиков, корпуса узлов);
- 3 – питание «+12 В» относительно контакта 6;
- 4 – датчик Д2;
- 5 – питание «-12 В» относительно контакта 6;
- 6 – общий силовой;
- 7 – питание нагревателя.

Датчики температуры подключаются к системе через соответствующие контакты разъёма «ТЕРМОСТАТ» или через разъёмы Д1 и Д2.

«Д1», «Д2» - входы термометра для подключения датчиков. Эти входы включены параллельно соответствующим контактам разъёма термостата. К каждому входу подключается *только один датчик*: или через гнездо Д1/Д2, или через разъём «ТЕРМОСТАТ». Термометр измеряет температуру соответствующего датчика, если нажата кнопка «Т1» или «Т2». Если к одному входу подключены одновременно два датчика (*нештатный режим!*), показания будут выше максимальной температуры этих датчиков.

«ТЕМПЕР. 40...80...120» - ручка регулировки максимальной температуры датчика в пределах 40 -120 $^{\circ}\text{C}$;

«НАГРЕВ 0...10...20» - ручка регулировки напряжения питания нагревателя в пределах от 0 до 20 В;

«ВКЛ» - тумблер включения нагревателя. При поднятой рукоятке включён ТВЭЛ устройства, подключённого к разъёму «ТЕРМОСТАТ», и подаётся напряжение на гнезда «НАГР»;

«Н2», «Н3», «Н4» - индикаторы режима работы термостата.

Если температура подключённого к системе и выбранного для измерений датчика ниже установленной регулятором «ТЕМПЕРАТУРА» или вход Д1 не задействован (к нему не подключён датчик температуры), то на нагреватель подаётся напряжение, заданное регулятором «НАГРЕВ». При этом светится зелёный индикатор Н2.

Если температура подключённого к входу Д1 датчика приближается к установленной регулятором «ТЕМПЕРАТУРА», то включается автомат управления температурой, и напряжение на нагревателе снижается: система переходит в режим термостатирования. При этом светятся два индикатора: зелёный Н2 и красный Н3. Выход на режим термостатирования легко определить по прекращению роста температуры объекта. Режим термостатирования реализуется, только если датчик нагреваемого объекта подключён к входу Д1.

Если температура датчика Д1 выше установленной регулятором «ТЕМПЕРАТУРА», то питание нагревателя отключено, и светится только красный индикатор Н3. Система перейдет в режим термостатирования при остывании объекта.

Вход Д2 служит только для измерения температуры, к системе термостатирования он не подключён. Если датчик нагреваемого объекта подключён к входу Д2, то объект будет нагреваться до тех пор, пока не сработает система защиты от перегрева.

При достижении любым из подключённых к системе датчиков температуры 125-130 °С или при коротком замыкании цепи датчика, питание нагревателя отключается, загорается индикатор Н4 и раздается прерывистый звуковой сигнал. Так будет до тех пор, пока объект не остынет до температуры 125 °С, или до ликвидации замыкания.

При перегрузке источника питания нагревателя его выходной ток сбрасывается до 0,3 А, загорается индикатор Н4 и раздается непрерывный звуковой сигнал. Для сброса режима защиты нужно отключить и вновь подключить нагрузку или снизить до нуля и вновь восстановить напряжение питания

регулятором «НАГРЕВ» или выключить и вновь включить сетевое питание.

4. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

ЗАДАНИЕ 1. Определение I_0 , U_0 , R , $U_{1\text{нач}}$, $U_{2\text{нач}}$.

1. Соедините разъём «ТЕРМОСТАТ» системы ИСТ-2М с разъёмом модуля М01. Установите на мультиметре предел измерения $=20\text{ В}$, при этом на его индикаторе засветятся нули.
2. Присоедините мультиметр к гнездам «Н1» и «Н2» модуля М01 проводами – чёрный провод к гнезду Н2.

3. Нанесите на плиту печи 2-3 капли глицерина (для теплового контакта).
4. Установите плотно на плиту пустой тигель, разотрите глицерин дном тигля.
5. Наденьте на тигель теплоизолирующий кожух, прижмите его к плите стержнем с пружинами.
6. Включите вилку установки в розетку $\sim 220\text{ В}$, при этом во внутреннюю розетку установки на задней стенке должны быть постоянно включены два чёрных кабеля, питающих её модули.
7. Проверьте исходное положение органов управления установки:
 - на модуле М01 тумблеры вентилятора и компрессора выключены;
 - на системе ИСТ-2М рукоятки «ТЕМПЕРАТУРА» и «НАГРЕВ» выведены против часовой стрелки до упора;
 - тумблеры «СЕТЬ» и «ВКЛ» выключены;
 - тумблер « \approx , \Rightarrow » в положении « \Rightarrow »;
 - на секундомере обнулена шкала, подготовлены таблицы 1 и 2.
8. Включите тумблер «СЕТЬ», при этом начнёт светиться шкала индикатора системы ИСТ-2М и зелёная сигнальная лампа «ТЕМПЕРАТУРА» (Н2).
9. Регулятор «ТЕМПЕРАТУРА» установить в положение, соответствующее максимальной температуре ($120\text{ }^{\circ}\text{C}$) – по часовой стрелке до упора.
10. Включите тумблер «ВКЛ».
11. Утопив кнопку «Т1», запишите температуру $t_{\text{ном}}$ в помещении.
12. Утопите кнопку « $U_{\text{н}}$ », на шкале индикатора появится некоторое значение напряжения в вольтах.
13. Вращением регулятора «НАГРЕВ» по часовой стрелке подайте на печь напряжение $U_0 = (6 \pm 0,1)\text{ В}$, контролируя его значение на мультиметре, запишите конкретное значение U_0 .
14. Утопите кнопку « $I_{\text{н}}$ » и запишите со шкалы индикатора системы ИСТ-2М значение I_0 в амперах (шкала в мА).
15. Выведите регуляторы «НАГРЕВ» и «ТЕМПЕРАТУРА» против часовой стрелки до упора.
16. Выключите тумблер «ВКЛ».
17. Снимите кожух с тигля.
18. Включите вентилятор тумблером «ВЕНТ», утопите кнопку «Т1» для контроля температуры, охладите печь до комнатной температуры.

Модуль 01. ПЕЧЬ-ТЕРМОСТАТ

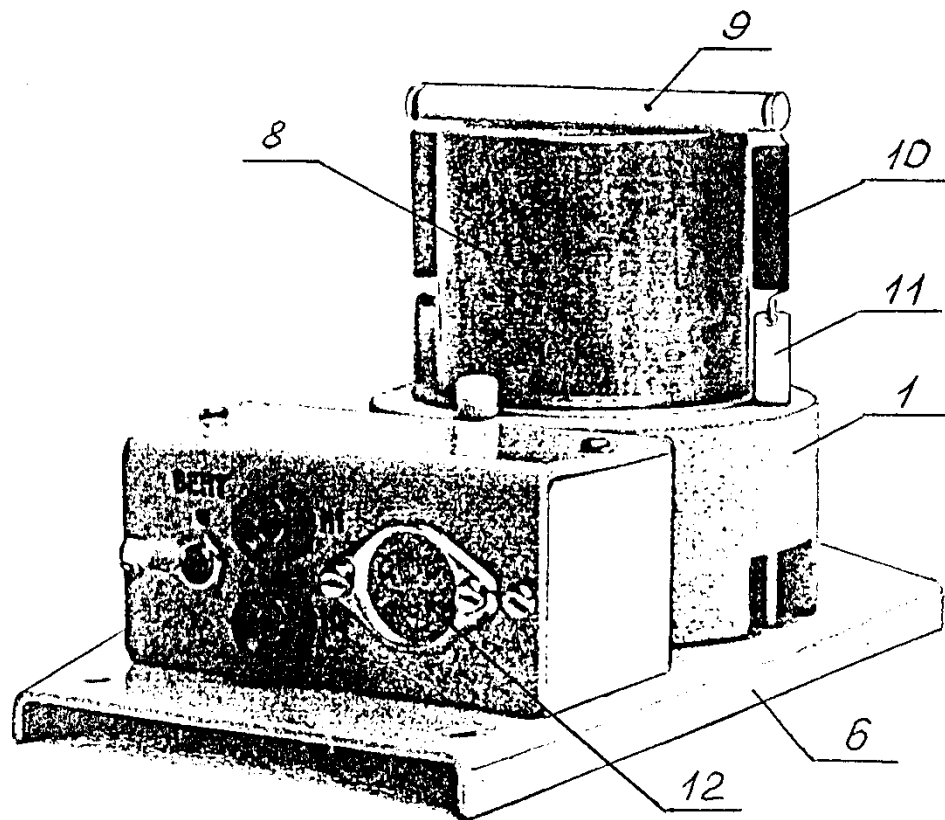
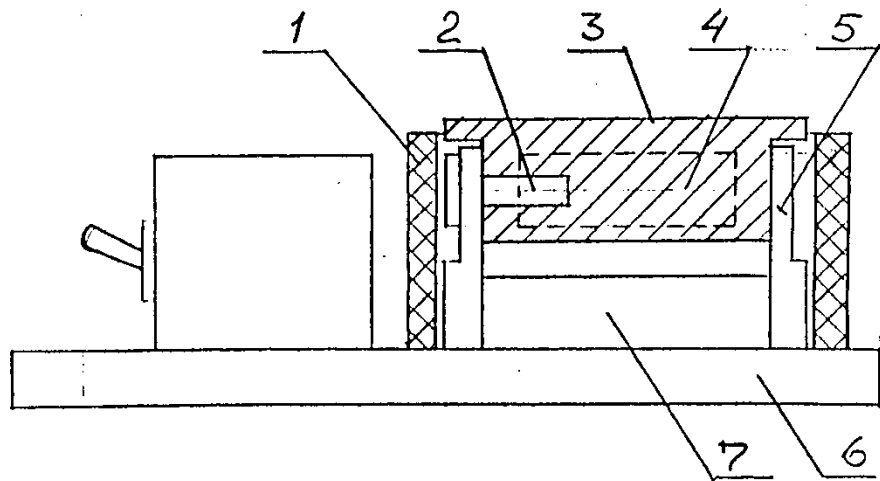


Рис. . Модуль 01. ПЕЧЬ-ТЕРМОСТАТ

Рис. 2.

Примечание: для ускорения процесса охлаждения налейте в тигель водопроводную воду из-под крана, меняйте её в процессе охлаждения.

19. Определите сопротивление нагревателя печи R по формуле (6). Данные занесите в таблицу 1.

20. По формуле (7) определите напряжение $U_{1\text{нач}}$, соответствующее начальной мощности $W_{1\text{нач}} = 20 \text{ Вт}$, и $U_{2\text{нач}}$, соответствующее начальной мощности $W_{2\text{нач}} = 30 \text{ Вт}$.

21. Выключите вентилятор, вылейте воду из тигля, протрите его салфеткой досуха.

ЗАДАНИЕ 2. Измерение зависимости температуры печи от времени с интервалом $20 \text{ }^\circ\text{C}$ при начальной мощности $W_{1\text{нач}} = 20 \text{ Вт}$.

1. Установите плотно на плиту тот же пустой тигель.
2. Наденьте на тигель теплоизолирующий кожух.
3. Прижмите тигель к плите стержнем с пружинами.
4. Регулятор «ТЕМПЕРАТУРА» установите в положение, соответствующее максимальной температуре ($120 \text{ }^\circ\text{C}$).
5. Включите тумблер «ВКЛ».
6. Утопите кнопку « $U_{\text{н}}$ ».
7. Регулятором «НАГРЕВ» подайте на печь напряжение $U_{1\text{нач}}$ (см. п.20 ЗАДАНИЯ 1), контролируя его значение на мультиметре, после чего утопите кнопку «Т1».
8. При достижении температуры $40 \text{ }^\circ\text{C}$ включите секундомер, последующие операции выполняйте без его остановки.
9. В моменты времени, когда температура печи будет достигать заданных значений ($50, 70, 90$) $^\circ\text{C}$, фиксируйте на мультиметре величины напряжения U_1 и тока I_1 на приборе ИСТ-2М при утопленной кнопке « $I_{\text{н}}$ ». После записи тока утапливайте кнопку «Т1», данные заносите в таблицу 2, соответствующие клетки отмечены знаком «+».
10. В промежутках между фиксацией напряжения и тока фиксируйте и вносите в таблицу 2 значения времени t_1 при температурах ($60, 80, 100$) $^\circ\text{C}$, соответствующие клетки также отмечены знаком «+».
11. После последней записи времени выключите регулятором «НАГРЕВ» напряжение питания нагревателя, остановите и обнулите секундомер.
12. Выведите регулятор «ТЕМПЕРАТУРА» против часовой стрелки до упора.
13. Выключите тумблер «ВКЛ».
14. Используя прилагаемую защитную перчатку, осторожно снимите кожух с тигля и тигель с плиты.
15. Налейте в тигель холодную воду и поставьте его обратно на плиту.
16. Включите вентилятор тумблером «ВЕНТ», охладите печь до комнатной температуры, выключите вентилятор. Для ускорения процесса охлаждения меняйте воду в тигле.
17. Снимите тигель с плиты, вылейте из него воду, протрите салфеткой досуха, поставьте обратно плотно на плиту.

ЗАДАНИЕ 3. Измерение зависимости температуры печи от времени с интервалом $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ при начальной мощности $W_{2\text{нач}} = 30\text{ Вт}$.

Повторите пункты 1-17 из ЗАДАНИЯ 2, устанавливая в п.7 значение $U_{2\text{нач}}$ и занося в таблицу значения U_2, I_2, t_2 .

18. Выключите тумблер «СЕТЬ», вытащите вилку установки из розетки.

19. Выключите мультиметр, разберите электрическую схему и верните в соответствующие выдвижные ящики использовавшиеся при выполнении работы принадлежности (мультиметр и секундомер уберите в сейф).

5. ДАННЫЕ УСТАНОВКИ И ТАБЛИЦА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ

Таблица 1

$U_0, \text{В}$	$I_0, \text{А}$	$R, \text{Ом}$	$t_{\text{ном}}, \text{ }^{\circ}\text{C}$	$U_{1\text{нач}}, \text{В}$	$U_{2\text{нач}}, \text{В}$	$W_{1\text{нач}}, \text{Вт}$	$W_{2\text{нач}}, \text{Вт}$
						20	30

Таблица 2

$T, \text{ }^{\circ}\text{C}$	$t_1, \text{ с}$	$t_2, \text{ с}$	$U_1, \text{ В}$	$I_1, \text{ А}$	$W_1, \text{ Вт}$	$U_2, \text{ В}$	$I_2, \text{ А}$	$W_2, \text{ Вт}$	$\Delta t_1, \text{ с}$	$\Delta t_2, \text{ с}$	$W', \text{ Вт}$	$C_0, \text{ Дж/К}$	η
40	0	0											
50			+	+	+	+	+	+					
60	+	+							+	+	+	+	+
70			+	+	+	+	+	+					
80	+	+							+	+	+	+	+
90			+	+	+	+	+	+					
100	+	+							+	+	+	+	+

6. ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ

6.1. По полученным значениям токов и напряжений рассчитайте фактические значения мощностей, а также диапазонов времени, данные внесите в таблицу 2.

6.2. По формуле (10) найдите значения мощностей потерь W' для каждого из диапазонов температур (40 – 60), (60 – 80), (80 – 100) $^{\circ}\text{C}$ и соответствующих мощностей, данные внесите в таблицу 2.

6.3. По формуле (11) найдите значения теплоёмкостей системы C_0 для тех же диапазонов температур, времени и мощностей, данные внесите в таблицу 2.

6.4. По формуле (13) рассчитайте КПД нагревателя.

6.5. Рассчитайте косвенную погрешность ΔR печи.

6.6. Рассчитайте косвенную погрешность $\Delta W'$ для каждого диапазона температур.

6.7. Рассчитайте косвенную погрешность ΔC_0 для каждого диапазона температур.

ВНИМАНИЕ! При расчёте косвенных погрешностей примите следующие значения приборных ($\Delta_{пр}$) погрешностей прямых измерений:

- для тока $\pm 1 \text{ мА}$;
- для напряжения $\pm 0,1 \text{ В}$;
- для температуры $\pm 0,1 \text{ }^\circ\text{С}$;
- для времени $\pm 2 \text{ с}$.

Случайную погрешность не считайте, погрешностями округления пренебрегите. Учтите, что величины W , ΔT , Δt являются косвенными и погрешность для них необходимо рассчитать предварительно.

Величину доверительной вероятности примите равной 0,95.

При расчёте погрешностей руководствуйтесь методическими указаниями №100.

7. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ:

7.1. Определение сопротивления печи.

7.2. Мощность нагрева.

7.3. Определение мощности потерь. От чего она зависит?

7.4. Определение теплоёмкости системы.

7.5. Понятие теплоёмкости. Виды теплоёмкости. Единицы измерения теплоёмкости.

7.6. Определение количества тепла, полученное образцом за время Δt .

7.7. Понятие силы тока, сопротивления, напряжения.

7.8. Закон Ома, закон Джоуля-Ленца.

7.9. Внутренняя энергия.

7.10. Работа. Графический смысл работы.

7.11. Первое начало термодинамики.

7.12. Второе начало термодинамики.

7.13. Тепловая машина. КПД тепловой машины.

8. ЛИТЕРАТУРА

8.1. Савельев И.В. Курс общей физики, т.2, Москва, «Наука», 1988г.

8.2. Трофимова Т.И. Курс физики, Москва, «Высшая школа», 2003г.

8.3. Терентьев А.Д., Введение в физику: Основы физических измерений, Методическое пособие № 100, КГТУ, 2006 г.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 303

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕПЛОЁМКОСТИ МЕТАЛЛОВ МЕТОДОМ ОХЛАЖДЕНИЯ

Цель работы: формирование умений и навыков по овладению методикой расчета теплоемкости металлов.

Задание: Определить теплоемкость неизвестного металла.

Методические указания и справочные данные по лабораторной работе:

ПРИНАДЛЕЖНОСТИ: миллиметровка А4.

1. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ВВЕДЕНИЕ

Различные тела, обладающие одной и той же массой, нагреваются по-разному при сообщении им одного и того же количества тепла. Говорят, что они различаются теплоёмкостью.

Теплоёмкостью (истинной) C тела называется отношение элементарного количества тепла δQ , сообщённого телу в каком-либо процессе, к соответствующему изменению температуры тела:

$$C = \lim_{\Delta T \rightarrow 0} \frac{\Delta Q}{\Delta T} = \frac{\delta Q}{dT}$$

Примечание. Поскольку теплота (как и работа) является функцией процесса изменения состояния системы, то элементарное количество тепла не является полным дифференциалом, что и нашло своё отражение в обозначениях этой формулы (δQ , а не dQ).

Средней C_{cp} теплоёмкостью тела в интервале температур от T_1 до $T_2 > T_1$ называется отношение количества тепла Q , необходимого для повышения температуры тела, к разности этих температур:

$$C_{cp} = \frac{Q}{(T_2 - T_1)}$$

Связь между средней и истинной теплоёмкостями тела имеет вид:

$$C_{cp} = \frac{1}{T_2 - T_1} \int_{T_1}^{T_2} C dT$$

Теплоёмкость зависит от массы тела, его химического состава, термодинамического состояния и вида процесса сообщения тепла.

Теплоёмкость можно отнести к единице массы, к одному молю и к единице объёма тела. Соответственно этому теплоёмкость называется удельной, молярной, объёмной.

Единицами измерения теплоёмкости в системе СИ являются Дж / град и внесистемная единица кал / град или ккал / град. Удельную, молярную и объёмную теплоёмкости в системе СИ измеряют соответственно в Дж / кг·град, Дж / моль·град и Дж / м³·град. Внесистемными единицами являются кал / кг·град, кал / моль·град, кал / м³·град или ккал / кг·град, ккал / моль·град, ккал / м³·град.

Поскольку количество тепла является функцией процесса, то значение теплоёмкости зависит от условий теплопередачи. Однако, если условия теплопередачи фиксированы, то теплоёмкость выражается через функцию состояния тела. Так, для газов, в зависимости от характера термодинамического процесса, различают теплоёмкость при постоянном объёме C_v и теплоёмкость при постоянном давлении C_p . В первом случае нагревание (или охлаждение) осуществляется при неизменном объёме газа, во втором случае поддерживается постоянное давление.

Теплоёмкость тела характеризует его способность изменять свою внутреннюю энергию при сообщении телу теплоты.

Теплоёмкость твёрдого тела связана с энергией атомов, совершающих колебания вокруг своих положений равновесия. При достаточно высокой температуре эти колебания можно рассматривать с помощью классической механики.

Молекула, находясь в поступательном колебательном движении, обладает тремя степенями свободы. На каждую степень свободы приходится средняя кинетическая энергия $\frac{kT}{2}$, где $k = 1,380662 \cdot 10^{-23} \frac{\text{Дж}}{\text{К}}$ (постоянная Больцмана).

Находясь в колебательном движении, молекула обладает также потенциальной энергией. Причём, в этом случае среднее значение потенциальной энергии равно среднему значению кинетической энергии. Следовательно, на каждую из трёх степеней свободы атома приходится средняя энергия kT (сумма средней потенциальной и средней кинетической энергии).

$$\langle W \rangle = kT \quad (1)$$

Умножив kT на 3 (число степеней свободы), получим среднюю энергию, приходящуюся на один атом твёрдого тела. Этот предел, однако, для сколь угодно сложных соединений никогда не достигается, так как вещество уже раньше плавится или разлагается. Для многих простых элементов этот предел достигается при обычных температурах.

Полную энергию одного моля твёрдого тела получим, если умножим среднюю энергию одной частицы на число независимо колеблющихся частиц, содержащихся в одном моле. Это число равно числу Авогадро

$$N_A = 6,02 \cdot 10^{26} \text{ кмоль}^{-1}$$

$$U = 3N_A \langle W \rangle \quad (2)$$

$$U = 3N_A kT = 3RT, \quad (3)$$

где R — универсальная газовая постоянная.

Отсюда атомная (молярная) теплоёмкость будет равна:

$$C_\mu = \frac{dU}{dT} = 3R = 25 \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}} = 5,97 \frac{\text{кал}}{\text{моль} \cdot \text{К}} \quad (4)$$

Этот результат находится в согласии с экспериментально установленным в 1819 г. *законом (правилом) П.Дюлонга и А.Пти*:

Молярная теплоёмкость всех химически простых кристаллических твёрдых тел приблизительно равна $6 \frac{\text{кал}}{\text{моль} \cdot \text{К}}$.

Закон Дюлонга и Пти сравнительно хорошо подтверждается на опыте при не слишком низких температурах. Из рис.1 видно, что для многих веществ это правило соблюдается уже при температуре 0°C .

Многочисленные опыты по определению теплоёмкости большого числа кристаллических твёрдых тел в широком диапазоне температур показали, что результаты, выражаемые формулами (3) и (4), являются весьма приближёнными, а в некоторых случаях просто неверными. Из формул (3) и (4) следует, что молярная теплоёмкость не зависит ни от температуры, ни от конкретных свойств кристаллов. Опыты же показали, что в действительности такая зависимость существует, причём особенно резко она проявляется при низких температурах (см. рис.1).

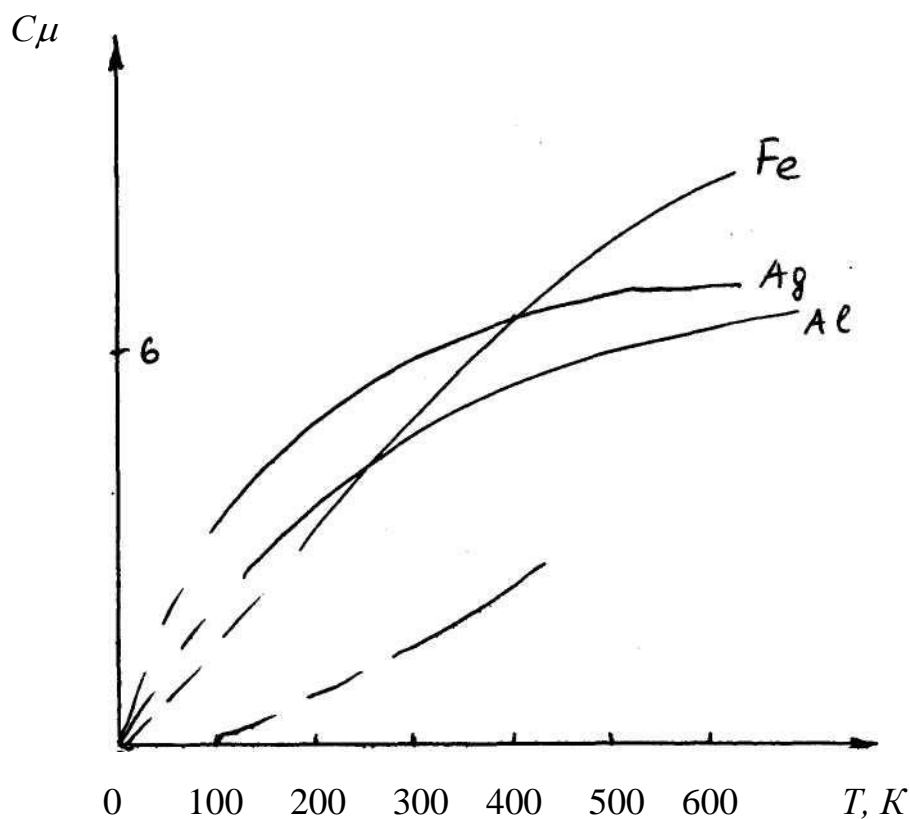


Рис.1.

При достаточно низких температурах теплоёмкость всех твёрдых тел быстро уменьшается с понижением температуры, следуя закону Дебая:

$$C_{\mu} = \frac{96\pi^7}{5} R \left(\frac{kT}{h\nu_{\text{макс}}} \right)^3 \quad (5)$$

Таким образом, при абсолютной температуре, стремящейся к нулю, теплоёмкость твёрдых тел также стремится к нулю. Теплоёмкость некоторых тел, например, алмаза и бора, весьма заметно зависит от температуры даже при сравнительно высоких температурах.

Причина расхождения классической теории теплоёмкостей твёрдых тел с опытами состоит в ограниченной применимости закона равномерного распределения энергии по степеням свободы. Ведь именно этот закон приводит к формулам (3), (4) и, следовательно, к независимости теплоёмкости твёрдых тел от температуры. Трудности классической теории теплоёмкости твёрдых тел были преодолены в современной квантовой теории.

Первоначально квантовая теория теплоёмкости твёрдых тел была разработана А.Эйнштейном в 1905 г. В её основе лежало предположение о том, что каждый атом, колеблющийся в узле кристаллической решётки, имеет три степени свободы, причём в кристалле, построенном из частиц одного сорта, все атомы колеблются независимо друг от друга с одинаковой частотой. Кроме этого, А.Эйнштейн предположил, что энергия атома, гармонически колеблющегося в

узле решётки с частотой ν , может принимать не любые, а только вполне определённые значения, кратные величине кванта энергии $h\nu$, где $h = 6,625 \cdot 10^{-34}$ Дж·с - постоянная Планка. Энергия, приходящаяся на одну степень свободы, принимает значения:

$$W = nh\nu \quad (n = 0, 1, 2, 3, \dots) \quad (6)$$

Впоследствии выяснилось, что необходимо принимать во внимание так называемую нулевую энергию $\frac{h\nu}{2}$, которая сохраняется даже при абсолютном нуле температуры. Эта энергия не связана с тепловым движением атомов и не влияет на теплоёмкость кристаллов.

Задача определения среднего значения энергии частицы, гармонически колеблющейся около некоторого центра, была решена в 1900 г., когда М.Планком была получена следующая формула для $\langle W \rangle$:

$$\langle W \rangle = \frac{h\nu}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1} \quad (7)$$

При высокой температуре, когда $kT \gg h\nu$, показательная функция $e^{\frac{h\nu}{kT}}$ близка к единице и можно воспользоваться следующей приближённой формулой, справедливой при $x \ll 1$:

$$e^x = 1 + x$$

Тогда формула (7) приводит к классическому результату (1):

$$\langle W \rangle = \frac{h\nu}{1 + \frac{h\nu}{kT} - 1} = kT$$

Таким образом, при высоких температурах средняя энергия, приходящаяся на одну колебательную степень свободы атома, не зависит от частоты ν его колебаний. В этих условиях для теплоёмкости твёрдого тела справедлив закон Дюлонга и Пти (4).

При низких температурах положение существенным образом изменяется.

Если $kT \ll h\nu$, или $\frac{h\nu}{kT} \gg 1$, то $e^{\frac{h\nu}{kT}} \gg 1$.

Поэтому в знаменателе формулы (7) можно пренебречь единицей. Тогда средняя энергия $\langle W \rangle$ оказывается равной

$$\langle W \rangle = h\nu e^{-\frac{h\nu}{kT}}, \quad (8)$$

то есть очень быстро убывает с уменьшением температуры. Квантовые представления позволяют объяснить, почему теплоёмкость стремится к нулю при $T \rightarrow 0$: при очень низких температурах расстояние между соседними энергетическими уровнями велико и нагревание твёрдого тела на 1° не может перевести атомы с самого низкого энергетического уровня на следующий уровень, то есть kT значительно меньше, чем высота $h\nu$ одной "ступеньки" энергетической лестницы (6).

Температура T_c , при которой теплоёмкость твёрдого тела начинает быстро уменьшаться, определяется из условия

$$kT_c = h \cdot \nu_{\text{макс}} , \quad (9)$$

где $\nu_{\text{макс}}$ - наибольшая частота колебаний атомов в решётке твёрдого тела. Температуру T_c называют *характеристической температурой Дебая*. При $T \gg T_c$ справедлив закон Дюлонга и Пти.

2. МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕПЛОЁМКОСТИ ТВЁРДОГО ТЕЛА

В данной работе металлический образец нагревается до определённой температуры и охлаждается в воздухе. Количество теплоты q , теряемой образцом металла за промежуток времени $d\tau$, записывается выражением:

$$q = \int C\rho \frac{dT}{d\tau} dV , \quad (10)$$

где T - температура образца, C - удельная теплоёмкость металла, ρ - его плотность.

Интегрирование проводится по объёму образца V . Это же количество теплоты может быть выражено из закона Ньютона:

$$q = \int \alpha(T - T_0) dS , \quad (11)$$

где T_0 - температура окружающей среды (воздуха), α - коэффициент теплоотдачи от охлаждаемого образца к воздуху. Интегрирование проводится по поверхности образца (S). Тогда

$$\int C\rho \frac{dT}{d\tau} dV = \int \alpha(T - T_0) dS \quad (12)$$

Так как величины $\frac{dT}{d\tau}$, C , ρ не зависят от координат точек объёма, а величины S , T , T_0 не зависят от координат точек поверхности образца, можно записать:

$$-V \rho C \frac{dT}{d\tau} = \alpha(T - T_0)S \quad (13)$$

Отсюда, заменив произведение объёма на плотность образца массой m , получим:

$$\frac{dT}{T - T_0} = -\alpha S \frac{d\tau}{Cm} \quad (14)$$

Интегрируя (14), получим:

$$T - T_0 = (T_m - T_0) e^{-\frac{\alpha S}{Cm} \tau}, \quad (15)$$

где T_m - температура тела в начальный момент времени ($\tau = 0$). Логарифмируя выражение (15), имеем:

$$\ln(T - T_0) = \ln(T_m - T_0) - \frac{\alpha S \tau}{Cm} \quad (16)$$

Примечание. Следует иметь в виду, что операция логарифмирования именованных (имеющих размерности) величин не имеет смысла, поэтому будем считать, что мы логарифмируем алгебраическое выражение.

Уравнение (16) есть уравнение прямой. Величина $\frac{\alpha S}{Cm}$ представляет собой отношение величин катета ординаты $\ln(T - T_0)$ к катету абсциссы τ $\text{tg} \alpha = \ln(T - T_0) / \tau$ треугольника, гипотенузой которого является прямая графика. Получив из опыта значения температуры образца для ряда значений времени, нужно взять логарифмы от величин $(T - T_0)$ или, что одно и то же, от величин $(t - t_0)$ и на миллиметровке построить график зависимости полученных значений от времени.

Имея графики, соответствующие формуле (16) для двух образцов, отличающихся друг от друга теплоёмкостями и массами (величины α и S принимаем одинаковыми в одних и тех же интервалах температур), определяем по ним отношения $\text{tg} \alpha_1$ и $\text{tg} \alpha_2$ этих двух графиков и выполняем следующие преобразования:

$$\frac{C_2 m_2}{C_1 m_1} = \frac{\text{tg} \alpha_1}{\text{tg} \alpha_2},$$

в результате получаем рабочую формулу:

$$C_2 = \frac{C_1 m_1 \operatorname{tg} \alpha_1}{m_2 \operatorname{tg} \alpha_2} \quad (17)$$

3. ПРАКТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Для нагрева образцов (см. рис.2) служит электропечь *A*. Термопары *C* укреплены на подвижной планке, а их спаи зачеканены в образцы *B*, представляющие собой металлические цилиндры длиной 60 мм и диаметром 9 мм. Сигнал с термопар в милливольтмах поступает на цифровой вольтметр. Для перевода показаний вольтметра из мВ в °С прилагается градуировочная характеристика (см. рис.3). Температура образца равна сумме температур термопары и окружающей среды t_0 (воздуха в лаборатории), определяемой по термометру в помещении, поэтому для определения истинной температуры образца из полученного значения необходимо вычесть величину температуры в помещении.

Принадлежности:

1. Электропечь. 2. Набор образцов с термопарами (масса медного образца 34,0 г; масса неизвестного образца 10,3 г). 3. Вольтметр цифровой. 4. Секундомер. 5. График градуировки термопары (рис. 3). 6. График теплоёмкости медного образца (рис.4). 7. Термометр бытовой.

Порядок выполнения работы:

3.1. Убедитесь в наличии и целостности заземляющего провода, присоединённого к корпусу электропечи и к заземляющей шине лабораторного помещения.

3.2. Включите сетевые шнуры электропечи и вольтметра в розетки ~ 220 В.

3.3. Подключите к гнездам вольтметра штекеры проводов, утопите на вольтметре кнопку «=». В случае появления на шкале знака “-“ поменяйте штекеры в гнездах местами.

3.4. Определите по красному цвету торца медный образец, поднимите

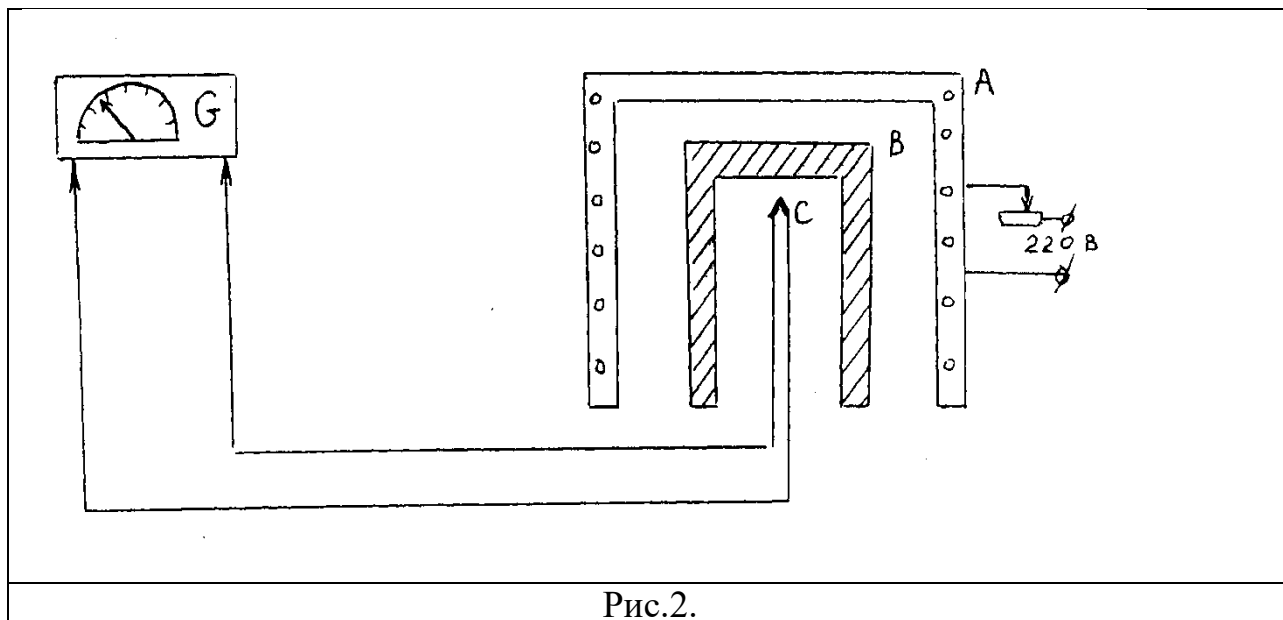


Рис.2.

подвижную планку электропечи до отказа вверх, затем подведите образец к горловине печи и опустите его внутрь печи до упора планки.

3.5. Запишите в таблицу по показаниям бытового термометра значение температуры воздуха t_0 в помещении.

3.6. Переведите переключатель на панели планки в сторону термопары, помещённой вместе с образцом в печь.

3.7. Нажмите на корпусе печи кнопку подачи напряжения - загорится сигнальная лампа, начнётся нагрев печи.

3.8. Следя за показаниями вольтметра, нагрейте печь с образцом до показания, соответствующего температуре 250°C (для перевода показаний в милливольты воспользуйтесь градуировочным графиком термопары на рис. 3). Обратите внимание на то, что показания на шкале вольтметра отображаются в *Вольтах*.

3.9. По достижении заданной температуры поднимите планку вверх до выхода образца из горловины печи, одновременно включите секундомер и поверните планку на 90 градусов. Отключите питание электропечи кнопкой на её корпусе.

3.10. В процессе охлаждения образца до 100°C каждые 30 секунд без остановки секундомера записывайте в таблицу 1 показания вольтметра в *милливольтгах*, то есть значения на шкале вольтметра умножайте на 10^3 , с точностью до десятых. Остановите и обнулите секундомер

3.11. Выполните в том же порядке нагрев и охлаждение неизвестного образца (не забудьте переместить переключатель термопар в сторону нагреваемой термопары), по окончании нагрева обесточьте электропечь кнопкой на её корпусе. Данные занесите в таблицу 2.

3.12. Отсоедините от сети $\sim 220\text{ В}$ провод электропитания установки.

Таблица 1(2)

Образец: (1 - медь, 2 - неизвестный)		Масса образца _____ , <i>г</i>		
τ, c	$t_{1(2)}$		$[t_{1(2)} - t_0]$	$\ln [t_{1(2)} - t_0]$
	<i>мВ</i>	$^{\circ}C$		
0	13,6	250		
30		Дальше		
Дальше че- рез 30 с до $t_{1(2)}=100^{\circ}C$	4,3	Дальше до $100^{\circ}C$		

3.13. С помощью градуировочной характеристики переведите полученные значения температур из *мВ* в $^{\circ}C$, рассчитайте разности температур ($t - t_0$) и определите значения натуральных логарифмов этих разностей.

3.14. По данным опыта отдельно для каждого из образцов постройте на миллиметровках формата *A4* графики зависимостей $\ln(t - t_0) = f(\tau)$, где по осям ординат откладываете значения функции, а по осям абсцисс - значения аргумента.

3.15. Из построенных графиков определите величины $tg\alpha_1$ и $tg\alpha_2$ графиков.

3.16. Вычислите по формуле (17) значение теплоёмкости неизвестного металла C_2 с точностью до тысячных для температуры $20^{\circ}C$, при этом значение C_1 для меди возьмите из таблицы 3.

3.17. Полученное значение теплоёмкости неизвестного металла запишите в протокол измерений, по таблице 3 определите неизвестный металл по наиболее близкому значению теплоёмкости в сравнении с полученным значением и внесите его наименование также в протокол.

3.18. Рассчитайте относительную погрешность ε (%) полученной величины теплоёмкости установленного металла по сравнению с табличным значением.

Таблица 3

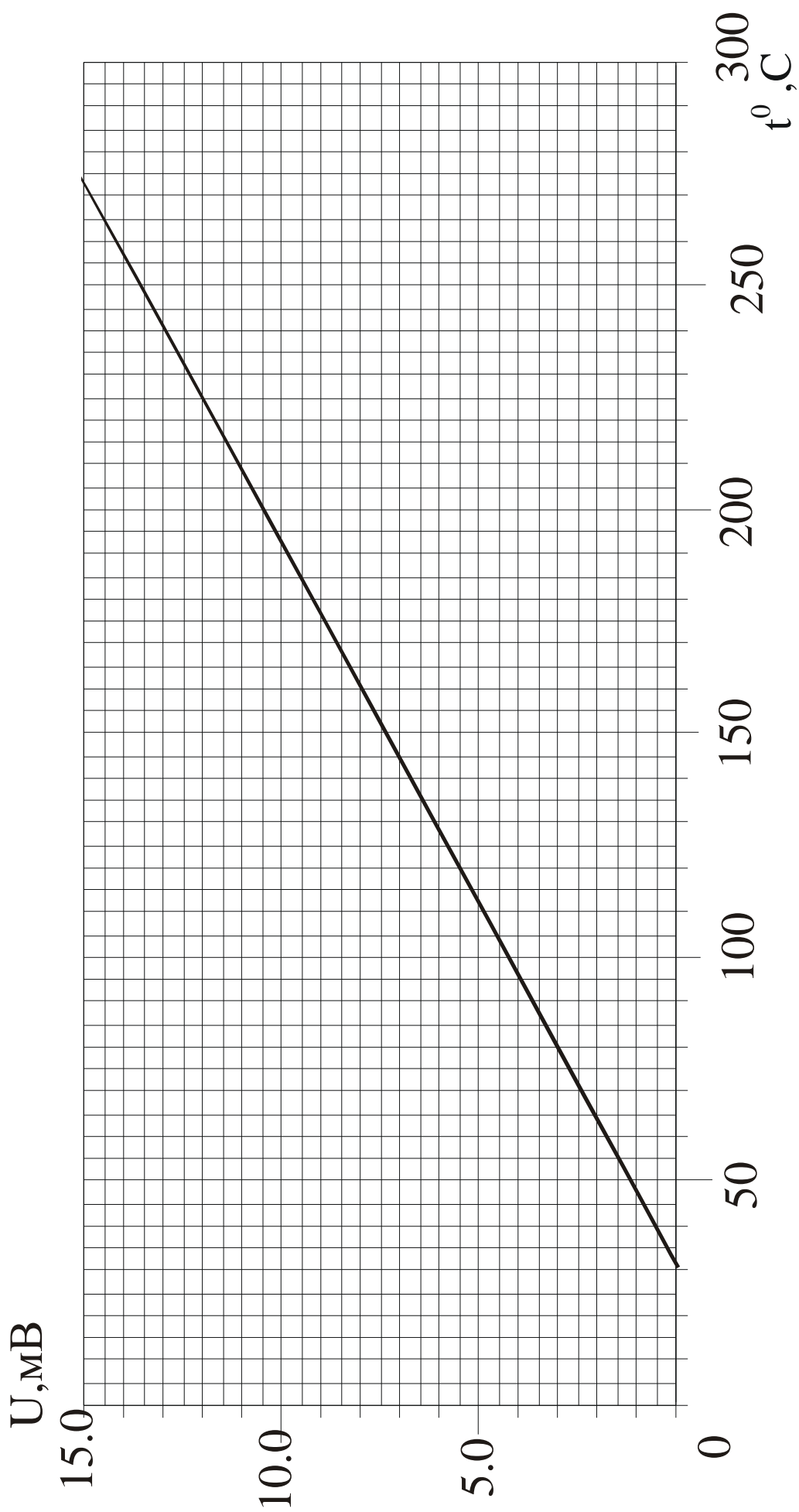
Материал	Вольфрам	Олово	Медь	Никель	Сталь	Алюминий
Удельная теплоёмкость при 20 °С, кал/г·град	0,032	0,052	0,092	0,107	0,115	0,214

4. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ (ПРИМЕРНЫЕ):

- 4.1. Что называется теплоёмкостью? В каких единицах она измеряется?
- 4.2. Почему при точных измерениях величины U и I нельзя измерять стрелочными приборами?
- 4.3. Что называется удельной (молярной) теплоёмкостью?
- 4.4. Как зависит теплоёмкость вещества от характера термодинамического процесса?
- 4.5. Какое свойство вещества характеризует теплоёмкость?
- 4.6. Сформулируйте закон *Дюлонга и Пти*. Когда справедлив этот закон?
- 4.7. Как зависит теплоёмкость тела от его температуры?
- 4.8. В чём заключается данный метод определения теплоёмкости металла?

5. ЛИТЕРАТУРА

- 5.1. А.А. Детлаф, Б.М. Яворский, Л.Б. Милковская, Курс физики, т.1.
- 5.2. И.К. Кикоин, А.К.Кикоин, Молекулярная физика, гл.9.



Градуировочная характеристика термометра

Рис.3

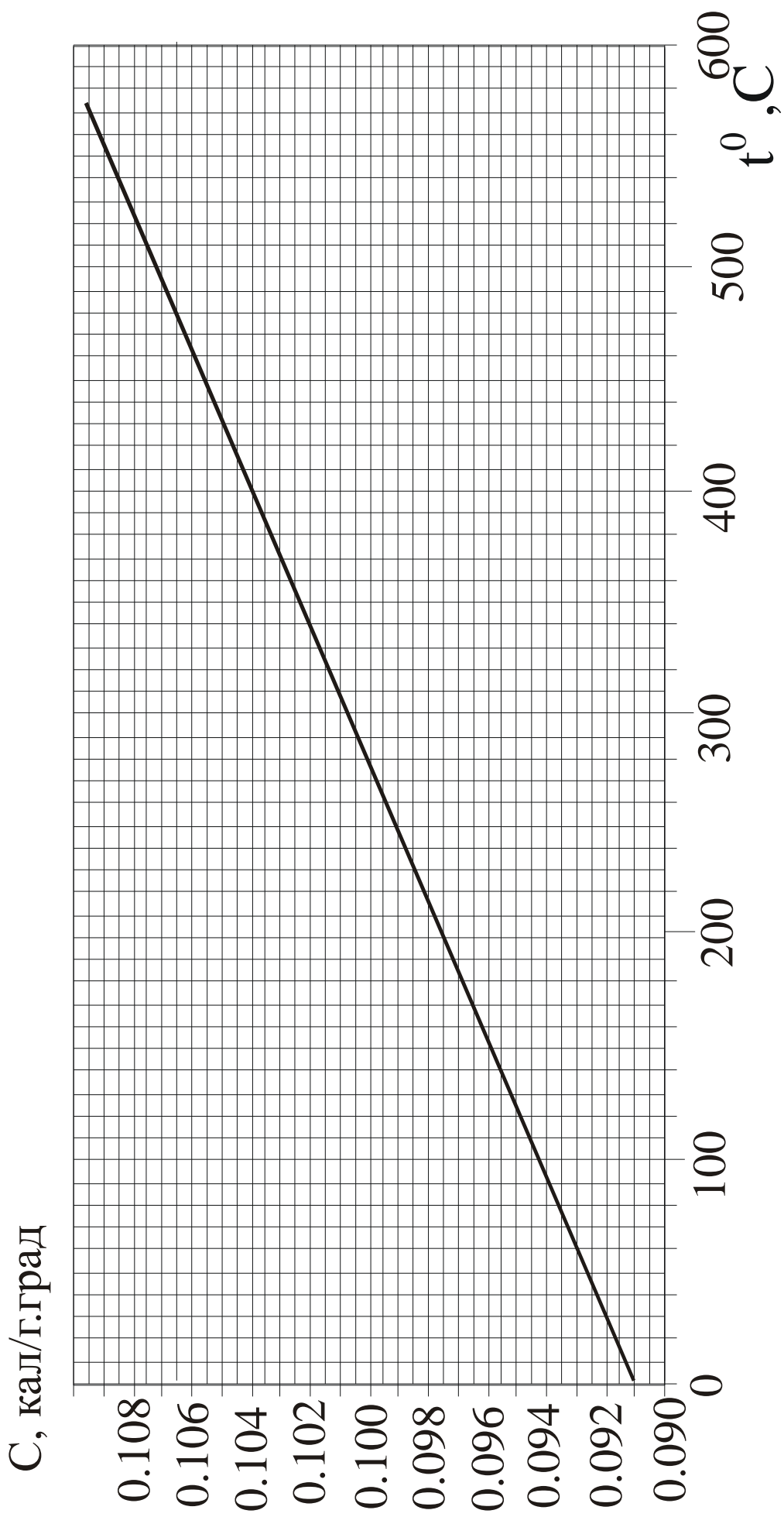


Рис. 4. График теплоёмкости меди

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 304

КРИВАЯ ФАЗОВОГО РАВНОВЕСИЯ ВОДЫ

Цель работы: формирование умений и навыков по овладению методикой расчета теплоты испарения.

Задание: Определить теплоту испарения жидкости.

Методические указания и справочные данные по лабораторной работе:

Приборы и принадлежности: миллиметровка А4, секундомер, шприц с присоединённой хлорвиниловой трубкой.

1. ВВЕДЕНИЕ

В жидкостях всегда имеется некоторое число молекул, энергия которых достаточна для преодоления притяжения к другим молекулам и которые способны оторваться от поверхности жидкости и перейти в окружающее их пространство. Этот процесс называется испарением и происходит на свободной поверхности жидкости.

Вследствие теплового движения молекул испарение возможно при любой температуре. Но с повышением температуры скорость испарения возрастает. В замкнутом пространстве (закрытом сосуде) испарение происходит при заданной постоянной температуре до тех пор, пока пространство над жидкостью не заполнится насыщенным паром.

Напомним. Паром называется вещество в газообразном состоянии при температуре ниже критической. Для индивидуальных веществ критическая температура определяется как температура, при которой исчезает различие в физических свойствах между жидкостью и паром, находящимся в равновесии с собственной жидкостью. При критической температуре плотности жидкости и пара становятся одинаковыми, граница между ними исчезает, и теплота парообразования обращается в нуль. Пар называется насыщенным, если он находится в динамическом равновесии со своей жидкостью.

Давление насыщенного пара $P_{нас}$ зависит только от температуры T и повышается с её увеличением. Зависимость $P_{нас} = f(T)$ называется равновесной кривой испарения. Если $P_{нас}$ становится равным внешнему давлению или его превышает, то испарение переходит в кипение. Наиболее высокой температурой кипения является критическая температура данного вещества. Критическая температура и давление определяют критическую точку – конечную точку на равновесной кривой испарения. Выше этой точки сосуществование двух фаз (жидкости и пара) в равновесии невозможно.

При переходе из жидкости в пар молекула должна преодолеть силы молекулярного сцепления в жидкости. Работа против этих сил (работа выхода), а также против внешнего давления уже образовавшегося пара совершается за счет кинетической энергии теплового движения молекул. В результате испарения жидкость охлаждается. Поэтому, чтобы процесс испарения протекал

при постоянной температуре, необходимо сообщать каждой единице массы вещества определённое количество теплоты, называемое *теплотой испарения*.

Теплота испарения уменьшается с ростом температуры, особенно быстро вблизи критической точки, обращаясь в этой точке в нуль. Теплота испарения связана с производной давления насыщенного пара по температуре *уравнением Клапейрона – Клаузиуса*:

$$L = T \frac{\partial P}{\partial T} (V_2 - V_1),$$

где T – температура перехода (процесс изотермический);

$\frac{\partial P}{\partial T}$ – значение производной от давления по температуре на кривой

фазового равновесия;

$(V_2 - V_1)$ – изменение объёма вещества при переходе его из первой фазы во вторую.

Напомним. Уравнение было получено в 1834 году французским ученым Б. П. Э. Клапейроном из анализа цикла Карно для конденсирующегося пара, находящегося в тепловом равновесии с жидкостью. В 1850 году немецкий физик Р. Клаузиус усовершенствовал уравнение и обобщил его на другие фазовые переходы. Уравнение Клапейрона – Клаузиуса применимо к любым фазовым переходам, сопровождающимся поглощением или выделением теплоты (т. н. фазовым переходам 1-го рода) и является следствием условия фазового равновесия. Уравнение может использоваться для расчёта любой из величин, входящих в уравнение, если остальные известны. В частности, с его помощью рассчитываются теплоты испарения, экспериментальное определение которых сопряжено со значительными трудностями.

Часто уравнение Клапейрона – Клаузиуса записывают относительно производной:

$$\frac{\partial P}{\partial T} = \frac{L}{T(V_2 - V_1)}$$

Таким образом, уравнение является дифференциальным уравнением кривой фазового перехода в переменных P , T . Для его решения необходимо знать, как изменяются с температурой и давлением величины теплоты фазового перехода, начального и конечного объёма, что представляет сложную задачу. Обычно эту зависимость устанавливают эмпирически и решают уравнение численно.

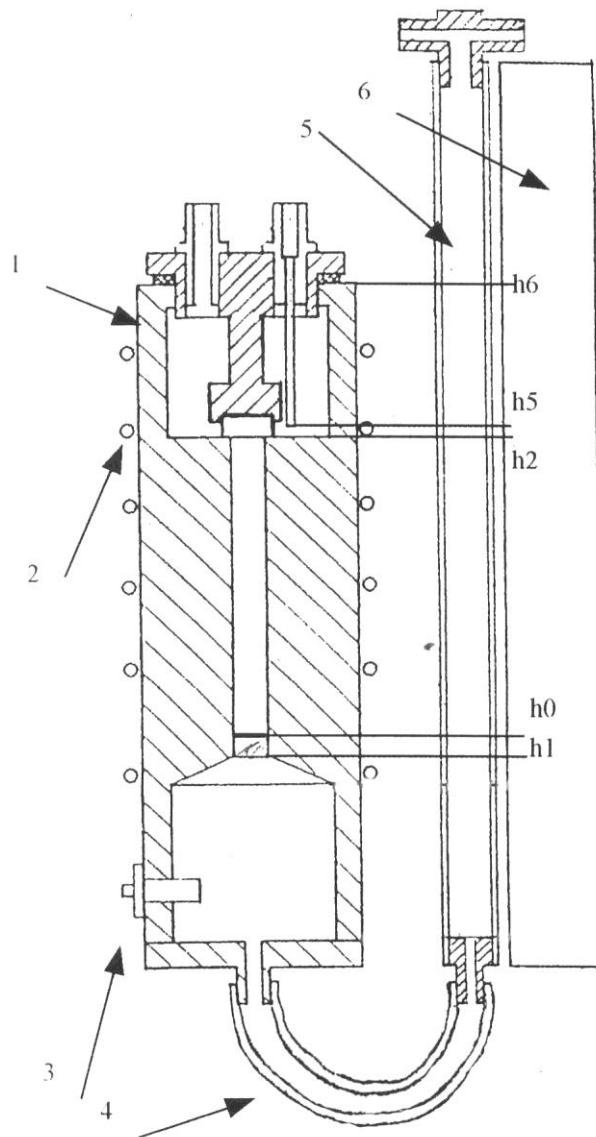
Скорость испарения резко снижается при наличии на поверхности жидкости достаточно прочной плёнки нелетучего вещества. Испарение жидкости в газовой среде, например, в воздухе, происходит медленнее, чем в разрежённом пространстве (вакууме), так как вследствие соударений с молекулами газа часть частиц пара вновь возвращается в жидкое состояние (конденсируется). Испарение относится к фазовым переходам 1-го рода. При процессе, обратном испарению, т. е. при образовании из пара жидкой фазы (конденсации пара) происходит выделение теплоты испарения.

Испарение применяется в технике как средство очистки веществ или разделения жидких смесей перегонкой. Процесс испарения лежит в основе работы двигателей внутреннего сгорания, холодильных установок, а также всех процессов сушки материалов. В естественных условиях испарение является единственной формой передачи влаги с поверхности океанов и суши в атмосферу и основной составляющей круговорота воды в природе.

2. ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

Приборы и оборудование: лабораторный комплекс ЛКТ-2 НТЦ «Владис» (модуль М05 «АВТОКЛАВ –МАНОМЕТР» в блоке №2 «ГАЗ-ЖИДКОСТЬ», измерительная система ИСТ-2М, кабель для соединения модуля М05 и системы ИСТ-2М, компрессор в модуле М01) шприц медицинский объёмом 20 мл в комплекте с хлорвиниловой трубкой, вода кипячёная охлаждённая.

Модуль "АВТОКЛАВ-МАНОМЕТР" (рис.1) предназначен для изучения зависимости давления насыщенного пара воды от температуры. Основная часть автоклава – труба 1 с верхней и нижней полостями, соединёнными круглым каналом диаметром 6 мм. На трубе имеется нагревательная обмотка 2. В трубу ввёрнут датчик температуры 3. Полость автоклава соединена шлангом 4 с мерной трубкой 5, расположенной вдоль линейки 6, по которой отсчитываются координаты характерных точек прибора и уровни жидкости h .



Модуль "АВТОКЛАВ-
МАНОМЕТР"
Рис.1

Верхний торец калиброванного канала герметизирован заглушкой с резиновой шайбой. Для удобства вворачивания (особенно при нагревом автоклава) заглушка снабжена пластмассовой ручкой.

На блоке "ГАЗ-ЖИДКОСТЬ" расположен разъем для присоединения кабеля.

Для установки заданы:

Высота верхнего края канала: $h_2 = (93,0 \pm 0,5) \text{ мм}$

Площадь сечения мерной трубки: $S = (75,4 \pm 0,6) \text{ мм}^2$

Площадь сечения калиброванного канала: $S_0 = (28,3 \pm 0,2) \text{ мм}^2$

Высота нижнего края канала: $h_1 = (27,0 \pm 0,5) \text{ мм}$

Начальный уровень воды $h_0 = (h_1 + 5) \text{ мм} = (32,0 \pm 0,5) \text{ мм}$.

Измерительная система ИСТ-2М (рис.2) предназначена для обеспечения электропитания модуля "АВТОКЛАВ-МАНОМЕТР", управления температурой нагревателя и его термостатирования и для измерения параметров (в данной работе - напряжения питания нагревателя, температуры нагревателя).

В данной работе используются следующие органы управления и контроля, расположенные на лицевой панели системы ИСТ-2М:

- тумблер "СЕТЬ" для подачи электропитания в систему;
- цифровой индикатор Н1, показывающий соответствующие параметры;
- тумблер "НАГР.-ВКЛ.", подающий электропитание на нагреватель;
- тумблер рода напряжения «≈, =»;
- электроразъём "ТЕРМОСТАТ" для присоединения кабеля;
- кнопки "Т₁" и "U_н" для вывода этих параметров на индикатор;
- рукоятка "ТЕМПЕРАТУРА" для установки величины рабочей температуры нагревателя (40 – 120) °С;
- рукоятка "НАГРЕВ" для установки величины рабочего напряжения на нагревателе (0 – 20) В;
- индикаторы режима работы термостата (Н2 – зелёный, Н3 – красный).

Кроме того, используется секундомер, расположенный на корпусе комплекса слева (допускается использовать наручные часы).

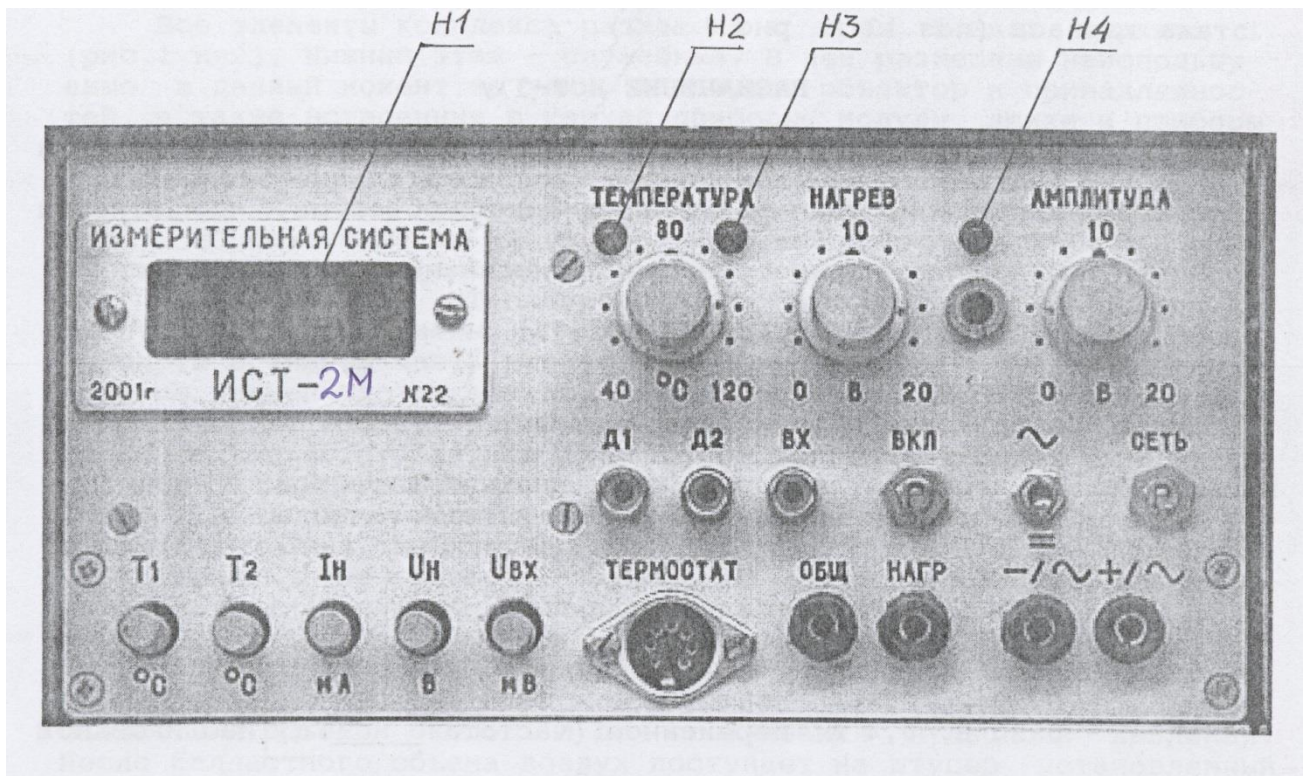
В процессе нагрева автоклава до заданной температуры светится зелёный индикатор, после достижения заданной температуры автоматически включается система термостатирования и светятся оба индикатора, в случае перевода рукоятки "ТЕМПЕРАТУРА" на меньшее значение система термостатирования отключается, начинает светиться только красный индикатор, и нагрев автоклава прекращается.

Срабатывание третьего индикатора (Н4) с одновременным появлением звукового сигнала свидетельствует о неполадках в работе системы, в этом случае необходимо весь комплекс ЛКТ-2 обесточить.

Для подключения комплекса к сети ≈ 220 В используется кабель (белого цвета) с заземляющим проводом, соединённым с заземляющей клеммой корпуса установки. Внутри установки на задней стенке имеется электророзетка, в которую постоянно включены два кабеля чёрного цвета.

В исходном состоянии органы управления комплекса ЛКТ-2, модуля "АВТОКЛАВ-МАНОМЕТР" и измерительной системы ИСТ-2М находятся в следующих положениях:

- комплекс обесточен, модуль и измерительная система электрически разъединены;
- запорное отверстие модуля закрыто заглушкой;
- на панели ИСТ-2М рукоятки всех потенциометров должны находиться в левом (против часовой стрелки) положении до упора, тумблер "НАГР.-



Измерительная система ИСТ-2М
Рис.2

ВКЛ." в положении "НАГР.", тумблер "СЕТЬ" в нижнем положении, тумблер «≈,=» в положении «=», кнопки "T1...U_{vx}" выключены (выдвинуты из корпуса);

- секундомер обнулён.

До начала работы в протоколе испытаний необходимо приготовить таблицы для записи измеряемых значений и полученных после обработки результатов эксперимента по предлагаемым ниже формам:

Таблица 1

$P_o, \text{кПа}$	$t_o, ^\circ\text{C}$	$h_o, \text{мм}$	$t_n, ^\circ\text{C}$	$h, \text{мм}$

Таблица 2

$T_o, \text{К}$	$T_n, \text{К}$	$V_o, \text{см}^3$	$V, \text{см}^3$	$P_n, \text{кПа}$	$1/T_n, 10^{-3} \text{K}^{-1}$	$\ln P_n$	$L, \text{МДж/кг}$
!	!	!	!	!	!	!	!

3. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ ТЕПЛОТЫ ИСПАРЕНИЯ

В полость корпуса автоклава через верхнее отверстие наливают дистиллированную или кипячёную отстоянную воду до уровня h_0 на 3 – 5 мм выше уровня h_1 нижнего торца канала (см рис. 1). Вода заполняет нижнюю полость и входит в нижнюю часть канала. При закрывании канала заглушкой в канале образуется герметизированная, заполненная воздухом полость, начальный объём V_0 которой определяется площадью S_0 сечения канала, начальным уровнем жидкости h_0 (определяется по шкале мерной трубки после завёртывания пробки) и уровнем верхнего торца канала h_2 :

$$V_0 = S_0 (h_2 - h_0) \quad (1)$$

Начальная температура t_0 и атмосферное давление P_0 определяются по термометру и по барометру-анероиду, которые находятся в помещении.

При нагревании корпуса, а вместе с ним и его содержимого до новой температуры T_n , воздух в канале расширяется, кроме того, к нему добавляются пары воды. Вода из полости вытесняется в мерную трубку, где поднимается до нового уровня h . Объём вытесненной жидкости:

$$V = S (h - h_0), \quad (2)$$

где S – площадь сечения канала трубки. Значения используемых геометрических величин см. на листе 5.

Суммарное давление воздуха $P_в$ и паров P_n практически равно атмосферному давлению P_0 (давление столба жидкости в трубке нужно учитывать только при очень точных, прецизионных измерениях). По формуле $P = \rho g h$, где ρ – плотность воды, g – ускорение силы тяжести, h – высота мерной трубки, можно оценить давление столба жидкости в трубке как не превосходящее 2 кПа, в то время как нормальное атмосферное давление составляет около 100 кПа. Таким образом, относительная погрешность рассчитанного давления не превосходит 2 %.

Давление воздуха $P_в = P_0 - P_n$. Используя уравнение объединённого газового закона для воздуха

$$\frac{P_0 \cdot V_0}{T_0} = \frac{P_в (V + V_0)}{T_n}, \quad (3)$$

находим давление пара

$$P_n = P_0 \left(1 - \frac{T_n \cdot V_0}{T_0 (V + V_0)} \right). \quad (4)$$

Исходя из уравнений Клапейрона – Менделеева и Клапейрона – Клаузиуса, по зависимости $\ln (P_n)$ от $1/T_n$ можно найти теплоту испарения

$$L = -\frac{R}{M} \cdot \frac{d(\ln P_n)}{d\left(\frac{1}{T_n}\right)}, \quad (5)$$

где $R = 8,31 \text{ Дж}/(\text{моль } K)$ – универсальная газовая постоянная,
 $M = 18 \cdot 10^{-3} \text{ Кг}/\text{моль}$ – молярная масса воды.

Примечание. Следует иметь в виду, что операция логарифмирования именованных (имеющих размерности) величин не имеет смысла, поэтому будем условно считать, что логарифмирование проводится для отвлечённых величин.

3.1. Порядок выполнения работы

3.1.1. Проверьте надёжность уплотнения автоклава заглушкой, наличие воды в автоклаве и её уровень в мерной трубке. При необходимости долейте воду до заданного уровня (см. первый абзац раздела 3), шприц находится в одном из средних выдвижных ящиков комплекса ЛКТ-2. Данная процедура должна быть выполнена предварительно инженером лаборатории.

3.1.2. Запишите в табл.1 значения начального уровня воды в мерной трубке h_0 , температуры в помещении t_0 и атмосферного давления P_0 .

3.1.3. Подключите соединительный кабель (находится в левом выдвижном ящике комплекса ЛКТ-2) к электроразъёмам блока "ГАЗ-ЖИДКОСТЬ" и измерительной системы ИСТ-2М, включите комплекс в сеть $\approx 220 \text{ В}$, включите тумблер "СЕТЬ". При этом загорятся зелёная лампочка у рукоятки "ТЕМПЕРАТУРА" и цифровой индикатор. Рукояткой "НАГРЕВ" установите рабочее напряжение (19 -19,5) В. Контроль напряжения ведите по четырехразрядному цифровому индикатору при нажатой кнопке " U_n " - напряжение питания нагревателя в *вольтах*.

3.1.4. Включите нагреватель, для чего тумблер "НАГР.-ВКЛ." переведите в положение "ВКЛ.". Нажмите кнопку переключателя " T_1 " – температура подключённого к системе датчика в $^{\circ}\text{C}$ с разрешением 0,1 градуса. Температуру задавайте рукояткой "ТЕМПЕРАТУРА", совмещая прорезь на рукоятке с точками на лицевой панели системы ИСТ-2М. Первое значение температуры t_n получите в исходном положении рукоятки, то есть против часовой стрелки до упора.

Следите за повышением температуры и при скорости изменения не более 0,1 град/мин (наступление стабилизации) запишите в табл.1 значения t_n с индикатора и h с измерительной линейки блока "ГАЗ-ЖИДКОСТЬ". Значения с измерительной линейки считывайте по правой кромке водяного мениска с точностью $\pm 1 \text{ мм}$, значения температуры с точностью до целых.

3.1.5. Так же, как и в предыдущем пункте, запишите в табл.1 значения t_n и h , последовательно устанавливая рукоятку и дожидаясь стабилизации температур в точках (50, 60, 70, 80, 90) $^{\circ}\text{C}$. В протокол записывайте **фактические** значения температур с индикатора, они будут несколько ниже устанавливаемых номинальных значений.

После установки очередной температуры проверяйте значение напряжения нагрева (устанавливая кнопку « U_n »), поддерживая его в заданных пределах.

ВНИМАНИЕ!

В указанные в п.4 положения регулятор температуры устанавливать вращением *только по часовой стрелке*, оставляя те фактические значения температуры, которые стабилизируются и высвечиваются на индикаторе. Корректировать температуру вращением регулятора *против часовой стрелки* категорически **ЗАПРЕЩАЕТСЯ!**

3.1.6. После выполнения п.3.1.5 выведите рукоятки "ТЕМПЕРАТУРА" и "НАГРЕВ" против часовой стрелки до упора, верните тумблер "НАГР.-ВКЛ." в положение "НАГР.", а тумблер "СЕТЬ" в нижнее положение. Отсоедините от обоих разъёмов кабель, уберите его и шприц для налива воды в средний выдвижной ящик комплекса ЛКТ-2.

3.1.7. Отсоедините комплекс от сети $\approx 220 \text{ В}$.

Замечания:

1. При заливании в систему сырой воды результаты будут искажены растворённым в воде воздухом. Пользуйтесь только кипячёной отстоянной и охлаждённой водой.

2. При температуре вблизи комнатной результаты могут быть искажены начальным давлением водяного пара, оставшегося при завёртывании заглушки.

3.2. Обработка результатов эксперимента

3.2.1. Рассчитайте по формуле (1) и внесите в табл.2 значение V_0 и значения T_0, T_n в кельвинах.

3.2.2. Рассчитайте по формуле (2) и внесите в табл.2 значения объёмов вытесненной жидкости V .

3.2.3. Рассчитайте по формуле (4) и внесите в табл.2 значения давлений пара P_n .

3.2.4. Постройте на миллиметровке формата А4 равновесную кривую испарения, т. е. зависимость $P_n = f(T_n)$. Рассчитайте и внесите в табл.2 значения $1/T_n$ и значения натуральных логарифмов от значений P_n .

3.2.5. Постройте на миллиметровке формата А4 зависимость давления насыщенного пара от температуры в полулогарифмическом масштабе, т. е. зависимость $\ln P_n = f\left(\frac{1}{T_n}\right)$. График (прямую линию) необходимо провести по максимальному количеству экспериментальных точек, лежащих на прямой.

3.2.6. По второму графику определите с учётом знака производную $d \ln P_n / d(1/T)$ и рассчитайте значение теплоты испарения.

3.2.7. Сравните полученный результат с табличным значением (2256 Дж/г), рассчитайте относительную погрешность ε и сделайте вывод.

4. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ (ПРИМЕРНЫЕ)

4.1. Что означает понятие «фаза» в термодинамике?

- 4.2. Что такое фазовый переход? Виды переходов.
- 4.3. Что такое двухфазная система в термодинамике?
- 4.4. Какая зависимость называется «кривой фазового равновесия»?
- 4.5. Что называется удельной теплотой испарения?
- 4.6. Что такое испарение, сублимация и конденсация? Опишите изменение внутренней энергии.
- 4.7. Что включает в себя понятие «химический потенциал фазы»?
- 4.8. Каковы условия фазового равновесия?
- 4.9. Объясните, какой знак будет иметь производная dP/dT в таких процессах как испарение, конденсация, плавление.

5. СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 5.1. Трофимова Т.И. Курс физики / Т.И.Трофимова – М., 2003, 541 с.
- 5.2. Савельев И.В. Курс общей физики: Учеб пособие в 3-х т. / Савельев – М., 1992, т.1, 432 с.
- 5.3. Курс физики: Учебник для вузов в 2-х т. / Под ред. В.Н.Лазовского, СПб, 2001, 576 с.
- 5.4. Бондарев Б.В. Курс общей физики: Учеб. Пособие / Б.В.Бондарев, Г.Г.Спирин, М., Высш.шк., 2005, 560 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Глобальный круговорот воды

1. Общие сведения о гидросфере земли.

В природе нашей планеты Земля некоторые вещества находятся в жидком агрегатном состоянии. Наиболее заметные объёмы в естественных условиях имеют расплавленные недра Земли, вода и нефть.

Особое значение имеет вода, со знакомства с которой у каждого человека с ранних лет и появляются сведения о жидком состоянии вещества, ещё до осознания той главенствующей роли, которую эта жидкость (вода) представляет для существования всего животного и растительного мира Земли. Жизнь миллионов видов растений и животных (в том числе и человека) непосредственно связана и обеспечивается наличием гидросферы - водной оболочки нашей планеты, которая включает в себя, главным образом, водоёмы с открытой поверхностью (океаны, моря, реки, озера и т.п.) и подземные воды. В состав гидросферы входят также не жидкие фазы: а) льды Антарктики, Арктики,

Гренландии и горных вершин; б) водяной пар в атмосфере, образующий туманы и облака.

Поверхности Мирового океана, пресноводных бассейнов и ледяного покрова составляют около 75% всей площади поверхности Земли. Масса всей гидросферы относительно невелика и равна $\sim 1,5 \cdot 10^{21}$ кг, т.е. $\sim 0,025\%$ массы Земли. Основная часть гидросферы ($1,37 \cdot 10^{21}$ кг) находится в жидкой фазе Мирового океана при средней его глубине, равной $\sim 3,8$ км. Подземные воды и ледники образуют около 9% массы гидросферы. Масса воды открытых пресноводных бассейнов составляет $\sim 0,04\%$ массы гидросферы. Ещё меньше водяного пара в атмосфере: $\sim 0,001\%$ массы гидросферы.

2. Понятие об атмосферном круговороте воды.

Отметим особое значение атмосферной части гидросферы, т.е. водяных паров, масса которых (если бы эту массу мгновенно измерить) равна $\sim 1,4 \cdot 10^{16}$ кг. Эта часть гидросферы непрерывно возобновляется, т.к. появляется в результате особого физического процесса - испарения, главным образом, с поверхности Мирового океана, затем - водяные пары сгущаются в туманы и облака и, в результате следующего особого физического процесса - конденсации, возвращаются на поверхность Земли.

Эти два процесса: испарение и конденсация в гидросфере — образуют атмосферный круговорот воды. В нём участвует и биологическая составляющая планеты - биосфера, например, для прироста одного грамма своей биомассы растения типа кустарника и дерева должны "пропустить" через свои тела и испарить около 100 граммов воды. Сформировавшиеся растения на суше также непрерывно испаряют воду, как бы откачивая её из грунта с помощью корневой системы. Например, эвкалипты прокачивают и испаряют до 150 кг воды в сутки, берёза в умеренных широтах — до 20 кг воды в сутки.

Однако, основная масса воды в этом круговороте испаряется с поверхности Мирового океана. За одни сутки (24 часа) с поверхности океана испаряется столько же воды, сколько её находится в реках всей нашей планеты. За год

испаряется $\sim 5 \cdot 10^{17}$ кг воды и, если такую массу паров сразу сконденсировать в жидкое состояние, тогда нашу планету можно было бы покрыть слоем воды в 1 м. Но испарившаяся вода удерживается в атмосфере не более 10 суток, т.е. достаточно равномерно в течение года возвращается на поверхность планеты в виде осадков: дождя либо снега.

Особое значение атмосферной части гидросферы проявляется в следующем:

А. Участвуя в круговороте "испарение - конденсация", атмосферная влага регулярно восполняется и обновляет запасы воды в пресноводных бассейнах, что необходимо для существования всего животного и растительного мира на поверхности Земли, не занятой Мировым океаном. При этом выпадающие на поверхность суши водяные осадки обеспечивают естественное увлажнение почвы, т.е. способствуют сохранению растительного покрова нашей планеты.

Б. Наличие атмосферной влаги в виде водяных паров имеет огромное значение для формирования климата, который определяется балансом энергии, направленной к Земле от Солнца в виде потока излучения мощностью $W_c = 1,75 \cdot 10^{17} \text{ Вт}$. Оказывается, что около 30% этой энергии отражается от нашей планеты, так что коэффициент отражения (называемый в космологии *альбедо*) $A \approx 0,32$. Около 70% потока солнечной энергии проникает до поверхности Земли, поглощается (в основном, поверхностью Мирового океана), затем при некоторой установившейся температуре сама Земля излучает энергию в Космос. Применяя закон *Стефана-Больцмана*, нетрудно рассчитать, что в условиях равновесия средняя температура на поверхности Земли должна быть равной: $t = -20 \text{ }^\circ\text{C}$. Однако, реальная средняя температура на поверхности Земли равна: $t = 16 \text{ }^\circ\text{C}$, т.е. на $36 \text{ }^\circ\text{C}$ выше вычисленной из условия баланса поступающего и излучаемого потоков энергии. Это явление объясняется тем, что поток энергии, излучаемый поверхностью Земли в инфракрасной области спектра, поглощается водяным паром в атмосфере и частично возвращается назад в виде излучения, а также с водными осадками. В результате, энергетический баланс с Космосом устанавливается при более высокой температуре, равной $t = 16 \text{ }^\circ\text{C}$. Далее,

оказывается, что при такой средней температуре около 35% солнечной энергии расходуется на испарение с поверхности Мирового океана. Эта энергия возвращается при конденсации водяных паров и ветровыми течениями атмосферы распределяется по поверхности Земли, определяя климатические условия на поверхности нашей планеты.

3. Понятие о глобальном круговороте воды

Атмосферный круговорот воды является лишь одной составляющей более обширного процесса, получившего в 20-м веке название глобального круговорота воды. Глобальный круговорот включает в себя, кроме атмосферного, еще биосферный и планетарно-космический круговороты воды.

3.1. Биосферный круговорот связан с жизнедеятельностью растительного и животного мира Земли и является объектом особо тщательного изучения методами физики, химии и биологии. Установлено, что растения на суше, водоросли Мирового океана и некоторые бактерии в процессе фотосинтеза, необходимого для их роста (т.е. образования клеток) разлагают воду, поставляя в атмосферу ежегодно $\sim 10^{14}$ кг чистого кислорода. Однако, количество кислорода в атмосфере не увеличивается, т.к. этот элемент расходуется на другие процессы, связанные с окислением пород Земли, гниением (распадом) органики и, главное, потребляется всеми представителями животного мира, в частности, через органы дыхания.

Установлено также, что современный состав атмосферы Земли ($\sim 78\%$ — азот, $\sim 21\%$ — кислород, $\sim 0,9\%$ — аргон и $\sim 0,1\%$ — остальное, т.е. водяной пар, углекислый газ, гелий и пр.) сформировался, в основном, благодаря растениям, зародившимся вначале в водах Мирового океана. А затем — та же растительность - участвует в стабилизации состава атмосферы, что необходимо, как отмечено выше в п. 1.2, для формирования климата нашей планеты. Новые открытия совершаются в области биохимии, изучающей роль воды в существовании биосферы. Все представители биосферы потребляют и "прокачивают" сквозь себя воду. При этом сами организмы содержат в себе постоянно от 50% до 90% воды, хотя масса этой воды сравнительно невелика $\sim 1-10^{15}$ кг, т.е. примерно

равна половине массы воды в реках. Однако, постоянное "прокачивание" воды вместе с растворёнными в ней элементами обеспечило, как показали новые исследования, наличие почвенного слоя, т.е. слоя глин, песков, известняков, доломитов, песчаников и т.д., находящегося на поверхности земной литосферы.

Пропуская воду сквозь свои организмы, представители биосферы регулируют и её химический состав. Например, уникальная прозрачность воды Байкала объясняется тем, что в нём существует особый вид животного - байкальский *рачок эвизура* (*Evischura baicalensis*), который всю воду озера трижды за год "прокачивает" сквозь себя, очищая от примесей.

К концу 20-го века стала известна особая роль фито- и зоопланктона в регулировке состава вод Мирового океана. Морская вода - это солевой раствор при средней солёности 35 граммов солей на 1 литр воды. В состав солей входят, в основном, ионы *Cl*, *Na*, *Mg*, *Ca*, *K* и *Bz*. Солёность морской воды объясняется не только выпариванием вод, стекающих в Океан по рекам. Когда было установлено, что фито- и зоопланктон за один год дважды "прокачивает" сквозь себя всю воду Мирового океана, возникла новая теория регулировки состава и солёности морской воды.

3.2. Представление о планетарно-космическом круговороте воды появилось в 20-м веке в связи с развитием теории происхождения гидросферы на основе новых опытных данных, полученных в ходе Международных геофизических, океанологических и космических исследований. Ранее в 19-м - начале 20-го века существовала теория космогенного происхождения воды. Считалось, что молекулы воды содержались в "протооблаке космической пыли", из которой ~ 5 млрд. лет тому назад формировались планеты Солнечной системы. В процессе гравитационного сжатия молекулы воды, выдавленные из протовещества, образовали Древний океан, покрывающий поверхность Земли. В ходе геологических процессов, длившихся миллиарды лет, сформировались участки суши и нынешние очертания Океана.

Однако, новые исследования показали, что океанизация нашей планеты произошла около 70 млн. лет тому назад, т.е. Мировой океан (сравнительно с

возрастом Земли) относительно молод. Воды Океана и всей гидросферы поступали (и продолжают поступать) на поверхность Земли в виде водяного пара при извержении вулканов и при дегазации магмы (вещества мантии) через рифтовые разломы (трещины в литосфере - каменной оболочке нашей планеты толщиной от 10 до 70 км.). Эта вода, поступающая из мантии, получила название ювенильной воды.

По разным оценкам в настоящее время из земных глубин ежегодно поступает (10^{12} - 10^{14}) кг ювенильной воды. Сейчас нет единой точки зрения на физические процессы синтеза молекул ювенильной воды. Одни ученые полагают, что эти молекулы содержатся в "протовеществе" самой мантии. Другие считают, что вода поступает в мантию через литосферу при увлажнении донных осадков Океана, а затем - в виде паров ювенильной воды возвращается на поверхность, образуя цикл планетарного круговорота.

Для расчёта полного баланса необходимо учесть, что некоторое количество воды исчезает при фотолизе в верхних слоях атмосферы. Фотолиз - это явление распада молекул воды на кислород и водород под действием космических частиц и ультрафиолетового излучения Солнца. Часть освобожденного при фотолизе водорода улетает в Космос (со скоростью более 8 км/с). Потери воды при этом составляют (10^8 - 10^{12}) кг/год.

Некоторое количество воды в виде молекул, связанных с метеорным веществом, поступает на Землю из Космоса. Установлено, что метеориты ежегодно приносят в земную атмосферу около $2,5 \cdot 10^7$ кг воды.

Наблюдения и специальные эксперименты показали, что в верхних слоях атмосферы под действием космического излучения, кроме фотолиза (распада молекул воды), возможны процессы синтеза молекул воды. Однако, остаётся неизвестным, могут ли объёмы такого синтеза компенсировать потери воды при фотолизе. Остаётся также неисследованной проблема синтеза молекул воды в земных недрах и сопутствующая этому процессу конденсация в форме ювенильной воды, истекающей из рифтовых разломов на поверхность Земли.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 306

ИЗУЧЕНИЕ ИЗОТЕРМИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА. ПРОВЕРКА ЗАКОНА БОЙЛЯ-МАРИОТТА

Цель работы: изучить параметры изотермического процесса, экспериментально проверить справедливость закона Бойля-Мариотта.

Задание: рассчитать теоретическое значение давления и сравнить его с экспериментальным. Рассчитать абсолютную и относительную погрешности.

Методические указания и справочные данные по лабораторной работе:

Приборы и принадлежности: лабораторный комплекс ЛКТ- 9; цилиндрические пластмассовые сосуды (2 шт.) с крышками; резиновая груша-помпа; винтовой зажим металлический; манометр, силиконовые соединительные трубки; термометр спиртовой и барометр (в помещении лаборатории); миллиметровка А4.

1. Теоретическое введение

Уравнение состояния как для идеальных, так и для реальных газов описывается тремя параметрами P, V, T . *Уравнение состояния идеального газа имеет вид:*

$$PV = nR_m T = \frac{m}{M} R_m T, \text{ где} \quad (1)$$

n – количество газа (кмоль);

m – масса газа (кг);

M – молярная масса газа (кг/кмоль);

R_m – универсальная (молярная) газовая постоянная (Дж/кмоль*К).

Для одного моля любого газа это соотношение принимает вид:

$$PV = R_m T$$

Уравнение, устанавливающее связь между давлением, объёмом и температурой газа, было получено в середине XIX века французским физиком Б. Клапейроном и имело вид:

$$PV = (n_1 + n_2 + n_3 + \dots) R_m T$$

В форме (1) оно было впервые записано Д.И. Менделеевым. Поэтому уравнение состояния газа называется *уравнением Клапейрона–Менделеева*.

Объединённый газовый закон для любой постоянной массы газа (а значит, и для одного моля газа) имеет вид:

$$\frac{P_1 V_1}{T_1} = \frac{P_2 V_2}{T_2}$$

или:

$$\frac{PV}{T} = \text{const}$$

Следует отметить, что задолго до того, как уравнение состояния идеального газа было теоретически получено на основе молекулярно-кинетической модели, закономерности поведения газов в различных условиях были хорошо изучены экспериментально. Поэтому уравнение $PV = \frac{m}{M} R_m T$ можно рассматривать как обобщение опытных фактов, которые находят объяснение в молекулярно-кинетической теории.

Газ может участвовать в различных тепловых процессах, при которых могут изменяться все параметры, описывающие его состояние (P , V и T). Процессы могут быть изображены на *диаграмме состояний* (например, в координатах P , V) в виде некоторой траектории, каждая точка которой представляет равновесное состояние.

Интерес представляют процессы, в которых один из параметров (P , V или T) остаётся неизменным. Такие процессы называются *изопроцессами*.

Для пояснения приведём пример.

Возьмём цилиндрический сосуд с плотно притёртым поршнем. Если, перемещая поршень, изменять объём газа в сосуде, то температура газа тоже будет изменяться, однако если, охлаждая сосуд при сжатии газа или нагревая при расширении, можно достичь того, что температура будет постоянной при изменениях объёма и давления, такой процесс называется *изотермическим* ($T = \text{const}$).

Предоставим газу возможность расширяться и производить при этом работу против сил внешнего давления. Это можно осуществить следующим образом. Пусть в большой ёмкости находится сжатый воздух, имеющий комнатную температуру. Сообщим ёмкость с внешним воздухом, дадим воздуху в ёмкости возможность расширяться, выходя из небольшого отверстия наружу, и поместим в струе расширяющегося воздуха термометр. Термометр покажет температуру заметно более низкую, чем комнатная, что будет указывать на понижение температуры воздуха в струе.

Следовательно, сжатие газа внешней силой вызывает его нагревание, а расширение газа сопровождается его охлаждением.

Из уравнения $PV = nR_m T$ состояния идеального газа следует, что при постоянной температуре T и неизменном количестве газа n в сосуде произведение давления P газа на его объём V должно оставаться постоянным:

$$pV = \text{const}$$

Процесс изменения давления и объёма газа при постоянной температуре называется *изотермическим процессом*. График зависимости давления газа от его объёма при изотермическом процессе называется *изотермой*. На плоскости

(P, V) изотермы изображаются при различных значениях температуры T семейством гипербол $p \sim 1/V$ (рис.1).

Так как коэффициент пропорциональности в этом соотношении увеличивается с ростом температуры, изотермы, соответствующие более высоким значениям температуры, располагаются на графике выше изотерм, соответствующих меньшим значениям температуры.

Уравнение изотермического процесса, выражающее зависимость давления от объёма газа при постоянной температуре, было получено из эксперимента английским физиком Р. Бойлем (1662 г.) и независимо французским физиком Э. Мариоттом (1676 г.). Поэтому это уравнение называют **законом Бойля–Мариотта**.

$$\frac{P_1}{P_2} = \frac{T_2}{T_1}$$

Однако закон Бойля-Мариотта перестаёт оправдываться, если перейти к большим давлениям.

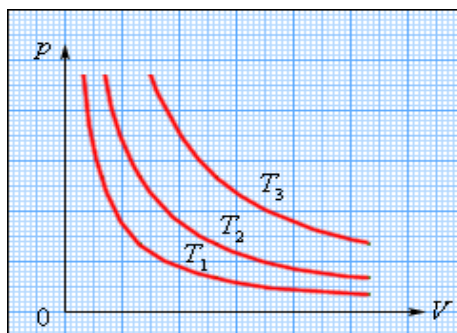


Рис.1.

**Семейство изотерм на плоскости
(p, V). $T_3 > T_2 > T_1$**

2. Описание и устройство комплекса ЛКТ-9

Общий вид комплекса ЛКТ-9 приведён на рис.2., пневмосхема на рис.3, принадлежности показаны на рис.4.

Основной элемент комплекса - электрочайник 8, используемый в качестве водяной бани, нагревателя и калориметра. Чайник постоянно подключён к электрической розетке внутри пульта управления, которая через два предохранителя на 10 А соединена с кабелем питания, заканчивающимся вилкой "Евро". Для подключения к розеткам "Азия" имеется переходник.

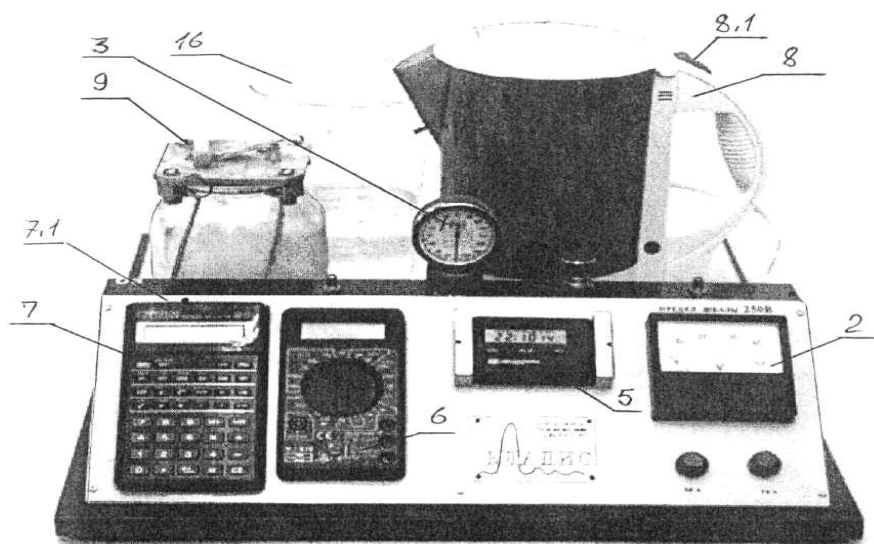


Рис. 2.
Комплекс ЛКТ – 9

Пульт управления установкой позволяет измерять сетевое напряжение вольтметром 2, давление в исследуемом объёме - манометром 3, интервалы времени - секундомером 5, температуру, сопротивление нагревателя и другие параметры - мультиметром 6.

Штуцер Ш1 подключён к манометру постоянно, штуцер Ш2 - с помощью виниловой трубки через кран К1. Нормальное состояние этого крана открытое (виниловая трубка не сжата), при вращении его головки по часовой стрелке эта трубка, соединяющая штуцер Ш2 с манометром, сжимается и соединение штуцера Ш2 с манометром прекращается. По завершении эксперимента кран К1 необходимо открыть, так как от длительного сжатия возможно слипание стенок трубки.

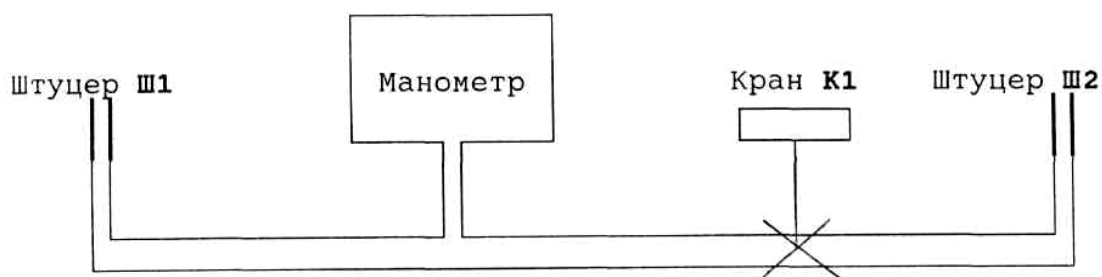


Рис. 3.
Схема пневмосистемы

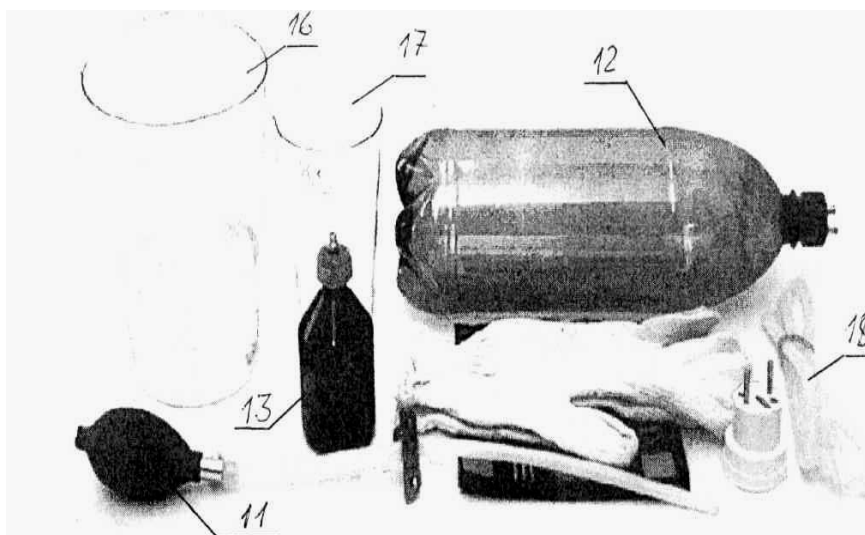


Рис.4.
Принадлежности комплекса ЛКТ-9

3. Экспериментальная проверка закона Бойля-Мариотта

Если сосуд объёмом V_1 , в котором находится газ под давлением P_1 , соединить с сосудом объёмом V_2 с газом под давлением P_2 , то при одинаковой и постоянной температуре сосудов установившееся в них давление равно:

$$P = \frac{P_1 V_1 + P_2 V_2}{V_1 + V_2}, \quad (2)$$

а приращение давления в первом сосуде:

$$P - P_1 = \frac{(P_2 - P_1) \cdot V_2}{V_1 + V_2} \quad (3)$$

Примечание. В качестве измеряемых величин используются избыточные давления.

4. Порядок выполнения работы

4.1. Убедитесь в том, что на обоих полиэтиленовых сосудах надёжно затянуты крышки, к их штуцерам присоединены виниловые трубки, а к одной из трубок сосуда ёмкостью 1065 см^3 присоединена помпа-груша с винтовым зажимом (зажим должен быть открыт).

4.2. Присоедините вторую трубку (без зажима) сосуда объёмом $V_1 = 1065 \text{ см}^3$ к манометру через штуцер Ш1 комплекса.

4.3. Перекрыв кран К1, накачайте помпой-грушей в сосуд воздух до давления (180-220) мм рт.ст., после чего затяните винтовой зажим.

4.4. Подождите 1-2 минуты до установления комнатной температуры T_1 воздуха в сосуде и зарегистрируйте значение давления P_1 .

4.5. При закрытом кране К1 присоедините к штуцеру Ш2 комплекса сосуд объёмом $V_2 = 642 \text{ см}^3$ с одним штуцером, в котором находится воздух при атмосферном давлении и температуре T_2 . Для того, чтобы температуры воздуха в сосудах равнялись комнатным, не держите их за цилиндрическую часть, а берите за горловины.

4.6. Откройте кран К1, подождите 1- 2 минуты и зарегистрируйте давление $P_{\text{экс}}$.

4.7. Полученные данные занесите в таблицу.

Таблица

Обозначения величин	$V_1,$ см^3	$V_2,$ см^3	$P_1,$ мм <i>рт.ст.</i>	$P_2,$ мм <i>рт.ст.</i>	$P_{\text{экс}},$ мм <i>рт.ст.</i>	$P,$ мм <i>рт.ст.</i>	$\varepsilon,$ $\%$
Расчётные данные							

4.8. Откройте винтовой зажим на трубке груши-помпы, приоткройте крышки на обоих сосудах, чтобы из них вышел воздух.

4.9. Рассчитайте значение давления P по формуле (2) и сравните его со значением $P_{\text{экс}}$ – рассчитайте абсолютную и относительную погрешности. При выполнении расчёта значения P учтите **Примечание** к разделу 3.

4.10. Сделайте выводы о справедливости закона Бойля-Мариотта.

4.11. На миллиметровке формата А4 постройте график изотермы $PV = 100$ Дж в диапазоне объёмов (500-2000) см^3 , используя основные единицы измерения системы «СИ».

5. Требования к отчёту

Отчёт должен содержать:

5.1. Титульный лист, где указывается номер работы, её название, номер группы, фамилия и инициалы студента.

5.2. Цель работы.

5.3. Данные экспериментальной проверки закона Бойля-Мариотта, график.

5.4. Вывод.

6. Контрольные вопросы

6.1. Как из уравнения состояния для идеального газа получить закон Бойля-Мариотта?

6.2. Привести график изотермы на P - V диаграмме.

6.3. Привести схему пневмосистемы комплекса ЛКТ-9.

6.4. Как выглядит график изотермического процесса в P, T и V, T -координатах?

6.5. Как по графику изотермы определить совершённую работу?

6.6. Поясните порядок проведения экспериментальной работы.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 307

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ВОЗДУХА МЕТОДОМ НАГРЕТОЙ НИТИ

Цель работы: Формирование умений и навыков по расчёту теплопроводности.

Задание: Рассчитать среднее значение теплопроводности воздуха.

Методические указания и справочные данные по лабораторной работе:

Приборы и принадлежности: лабораторный комплекс ЛКТ-6, мультиметры (2 шт.).

1. ЭЛЕМЕНТАРНАЯ ТЕОРИЯ ЯВЛЕНИЯ

Различают три вида *теплообмена* или *теплопередачи*: тепловое излучение (перенос энергии электромагнитными волнами), конвекция (перенос энергии за счёт движения макроскопических частей газа или жидкости в пространстве из областей с более высокой температурой в области с низкой температурой) и теплопроводность.

Теплопроводность – это процесс передачи теплоты от более нагретого слоя газа к менее нагретому за счёт хаотического теплового движения молекул. При теплопроводности осуществляется непосредственная передача энергии от молекул с большей энергией к молекулам с меньшей энергией. Для стационарного процесса, при котором разность температур в слое газа не изменяется со временем, количество теплоты δQ , которая переносится вследствие теплопроводности за время $d\tau$ через поверхность площадью S , перпендикулярную к направлению переноса энергии, в направлении уменьшения температуры, определяется по **закону Фурье**:

$$\delta Q = -\lambda \frac{dT}{dx} S d\tau, \quad (1)$$

где λ – коэффициент теплопроводности; dT/dx – градиент температуры, равный скорости изменения температуры на единицу длины x в направлении переноса энергии.

Для идеального газа

$$\lambda = \frac{1}{3} c_v \rho \langle v \rangle \langle l \rangle, \quad (2)$$

здесь c_v – удельная теплоёмкость газа при постоянном объёме; ρ – плотность газа;

$\langle v \rangle = \sqrt{\frac{8RT}{\pi M}}$ – средняя арифметическая скорость теплового движения молекул; $\langle l \rangle$

– средняя длина свободного пробега молекул.

Теплопроводность (перенос энергии), наряду с диффузией (перенос массы) и внутренним трением или вязкостью (перенос импульса молекул), относится к *явлениям переноса*. Все три явления переноса описываются похожими по

структуре уравнениями.

Рассмотрим два коаксиальных (имеющих общую ось) цилиндра, пространство между которыми заполнено газом. Если внутренний цилиндр нагревать, а температуру наружного цилиндра поддерживать постоянной и ниже температуры нагревателя, то в кольцевом слое газа возникает радиальный поток теплоты, направленный от внутреннего цилиндра к наружному. При этом температура слоёв газа, прилегающих к стенкам цилиндров, равна температуре стенок. Выделим в газе кольцевой слой радиусом r , толщиной dr и длиной (высотой цилиндра) l . По закону Фурье (1) тепловой поток $q = \frac{\delta Q}{d\tau}$, т.е. количество теплоты, которая проходит через этот слой площадью S за одну секунду, можно записать в виде

$$q = -\lambda \frac{dT}{dr} S = -\lambda \frac{dT}{dr} 2\pi r \cdot l. \quad (3)$$

После разделения переменных и интегрирования, получается:

$$\ln \frac{R_2}{R_1} = \frac{2\pi\lambda l}{q} (T_1 - T_2), \quad (4)$$

здесь T_1 , R_1 и T_2 , R_2 – соответственно температуры поверхностей и радиусы внутреннего и наружного цилиндров.

Из уравнения (4) получим формулу для определения коэффициента теплопроводности газа:

$$\lambda = \frac{q \ln \frac{R_2}{R_1}}{2\pi l (T_1 - T_2)}. \quad (5)$$

Формулу (5) получили в предположении, что теплота переносится от внутреннего к наружному цилиндру только благодаря теплопроводности. Это предположение достаточно обосновано, поскольку поток лучистой энергии при невысоких температурах и малом диаметре нагревателя составляет незначительную часть количества теплоты, которая переносится, а конвекция почти устраняется подбором диаметра наружного цилиндра и его вертикальным расположением в экспериментальной установке. Внутренним цилиндром может служить тонкая нить (проволока), обычно никелиновая, которая нагревается электрическим током. Тогда после установления стационарного режима тепловой поток можно принять равным мощности электрического тока, протекающего через нить:

$$q = W_n = I_n U_n = I_n^2 \cdot R_n$$

где I_n – ток через нить; U_n – напряжение на нити.

Если последовательно с нитью включить эталонный резистор сопротивлением R_p , то

$$I_n = \frac{U_p}{R_p},$$

и тогда

$$q = W_n = \frac{U_p U_n}{R_p}, \quad (6)$$

где U_p – напряжение на эталонном резисторе.

Используя равенство (6) в формуле (5), получим:

$$\lambda = \frac{W_n \ln \frac{D}{d}}{2\pi l(t_1 - t_2)}, \quad (7)$$

здесь D и d – диаметры наружного цилиндра и нити; $\Delta T = T_n - T_T$ – разность температур нити и наружного цилиндра (трубки).

Температуру трубки T_T можно принять равной температуре окружающего воздуха. Для вычисления разности температур ΔT в слое газа напишем формулы, по которым определяют сопротивление нити при температуре окружающего воздуха и в нагретом состоянии:

$$\begin{aligned} R_{n0} &= R_0(1 + \alpha t_0), \\ R_n &= R_0(1 + \alpha t), \end{aligned}$$

где R_0 – сопротивление нити при $t=0^\circ\text{C}$; α – температурный коэффициент сопротивления материала нити.

Исключив из этих равенств R_0 , найдем

$$\Delta T = t - t_0 = \frac{R_n - R_{n0}}{\alpha R_{n0}}(1 + \alpha t_0).$$

Сопротивление нити измеряем *методом сравнения напряжений на нити и на эталонном резисторе*. Учитывая, что $R_n = \frac{U_n}{I_n}$, $I_n = \frac{U_p}{R_p}$ и $R_{n0} = \frac{U_{n0}}{I_{n0}}$, $I_{n0} = \frac{U_{p0}}{R_p}$,

получим:

$$\Delta T = \frac{\left(\frac{U_n}{U_p} - \frac{U_{n0}}{U_{p0}} \right) (1 + \alpha t_0)}{\frac{U_{n0}}{U_{p0}} \alpha}, \quad (8)$$

где U_n , U_{n0} – напряжение на нити соответственно в нагретом состоянии и при температуре окружающего воздуха t_0 ; U_p , U_{p0} – напряжение на эталонном резисторе соответственно при нагретой нити и при температуре окружающего воздуха t_0 .

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

2.1. Устройство установки

Установка для определения коэффициента теплопроводности входит в состав лабораторного комплекса ЛКТ-6 (рис.1). Он состоит из двух функциональных модулей и общей системы электропитания и измерений ИСТ-2М, смонтированных на каркасе.

Модуль для определения величины теплопроводности (поз.4.2 рис.1) представляет собой закрытую с обоих торцов металлическую трубу, внутри которой натянута металлическая нить из никелевого сплава. Наружу на внешний кожух выведены гнезда для подключения системы ИСТ-2М, а также два штуцера для продувки внутренней полости трубы в случае проведения испытания на другом газе. В трубу ввёрнут датчик температуры Д1 для измерения температуры её стенки. Схемы конструкции модуля и электрических соединений

показаны на рис.2. В качестве вспомогательного реквизита при проведении измерений используются мультиметры типа M830E (2 шт.), комплект проводов «Ш4-Ш4» (3 пары) и кабель типа «Тюльпан».

Система ИСТ-2М обоих модулей размещена под ними внутри каркаса комплекса (поз.2 рис.1). Общий вид её передней панели показан на рис.3. Здесь расположены следующие элементы и органы управления:

«СЕТЬ» - тумблер включения сети $\sim 220 В$;

«Н1» - четырёхразрядный цифровой индикатор, интерпретация показаний которого определяется утопленной кнопкой переключателя под ним («U_н» - напряжение нагревателя, В; «I_н» - ток питания нагревателя, мА; «Т1» - температура датчика резонатора, °С; «Т2» - температура датчика модуля теплопроводности, °С);

«ТЕРМОСТАТ» - разъём для соединения системы с модулем теплопроводности;

«ТЕМПЕРАТУРА» - рукоятка установки температуры датчиков;

«НАГРЕВ» - рукоятка установки напряжения питания нагревателя резонатора или модуля теплопроводности (максимальная величина 20 В);

«Д2» - гнездо для соединения с датчиком температуры модуля теплопроводности;

«ВКЛ» - тумблер включения нагревателя;

«Н2» - индикатор подачи напряжения на нагреватель (зелёный);

«Н3» - индикатор работы системы термостатирования (красный), система термостатирования работает только от датчика температуры Д1;

«Н4» - индикатор аварийной ситуации (красный), срабатывает в случае перегрева свыше 125 градусов или короткого замыкания.

На задней стенке системы установлен разъём сетевого питания, предохранители и розетка на 220 В. На правой боковине каркаса установлена клемма заземления. Провода и кабели находятся в выдвижном ящике комплекса, мультиметры – в сейфе рабочего помещения.

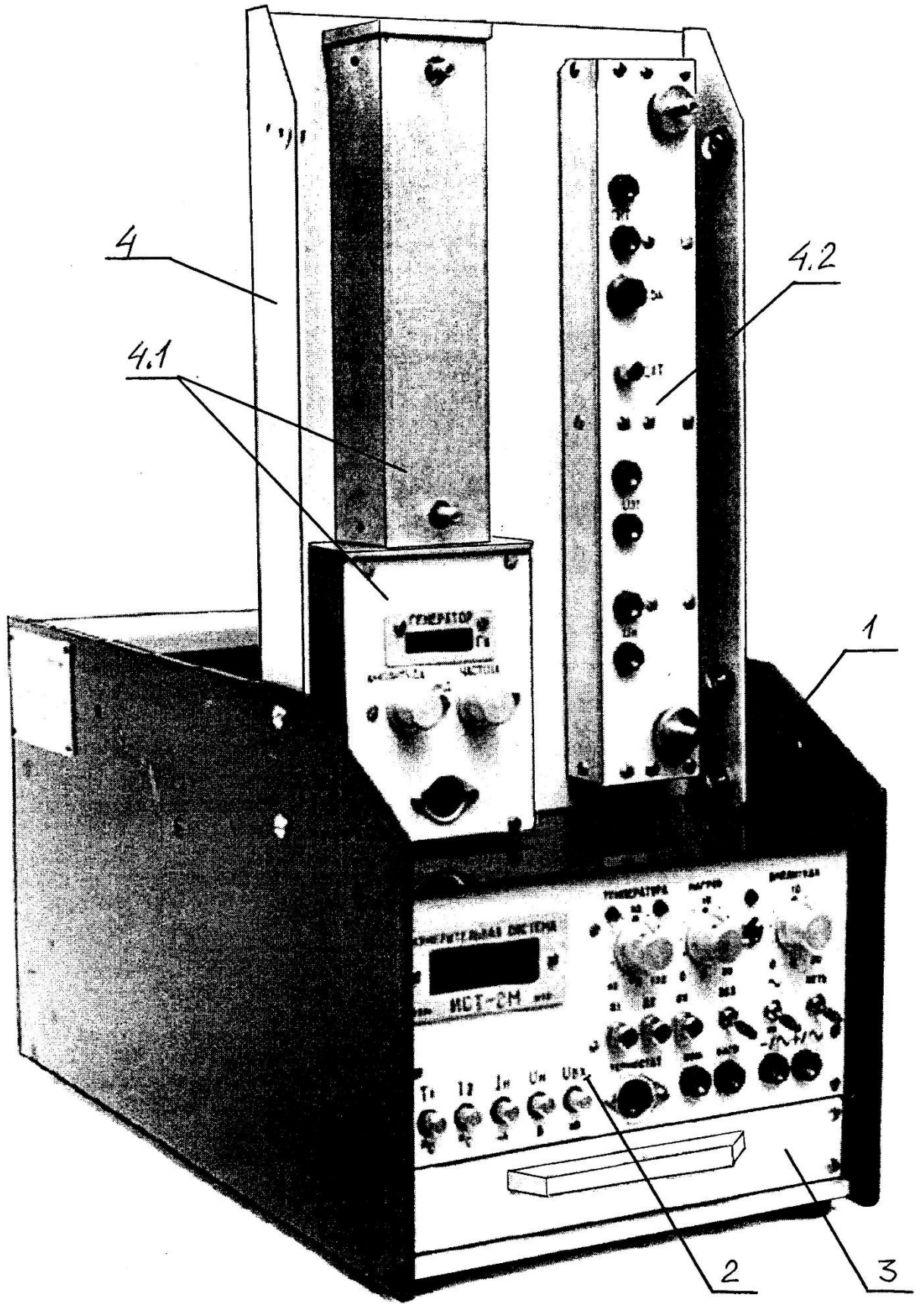


Рис.1

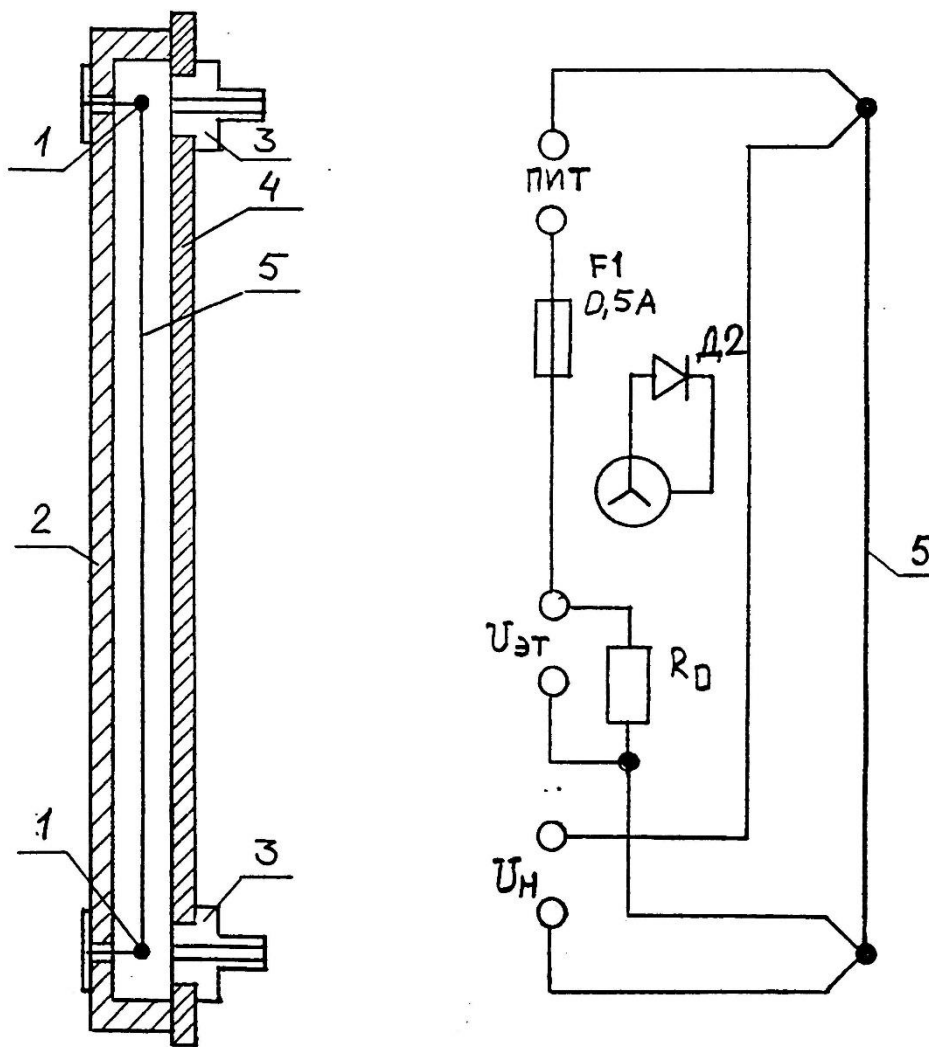


Рис.2

Исходное состояние органов управления системы:

- клемма заземления соединена с заземляющей шиной рабочего помещения или с заземляющей клеммой сетевой вилки;
- рукоятки «ТЕМПЕРАТУРА» и «НАГРЕВ» в крайнем левом положении;
- тумблеры «ВКЛ. И «СЕТЬ» выключены (в нижнем положении).

2.2. Порядок выполнения работы

2.2.1. Подготовьте таблицу для записи экспериментальных данных.

2.2.2. Соберите схему электропитания и измерений, для чего соедините модуль теплопроводности с системой ИСТ-2М следующим образом:

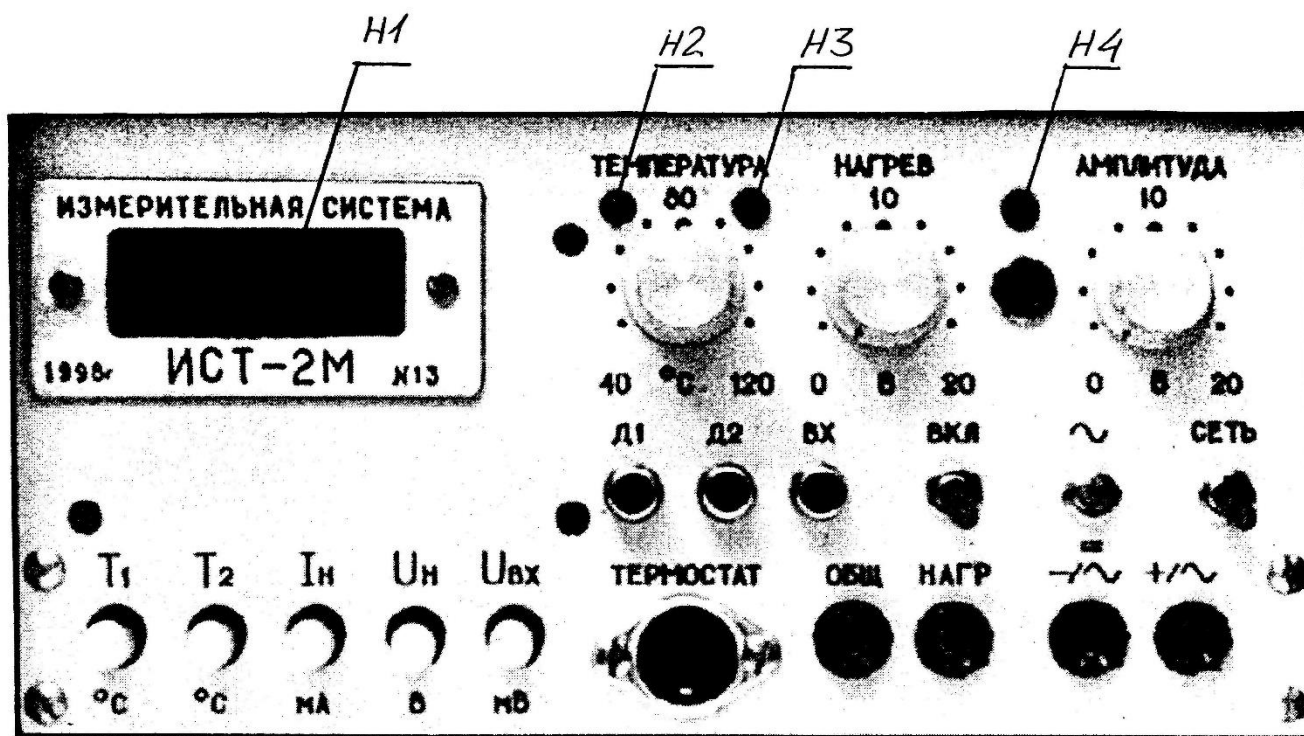


Рис.3

Таблица

$U_{эТ}, В$	$U_H, В$	$I_H, А$	$R_H, Ом$	$W_H, Вт$	$t_H, ^\circ C$	$t_{тр}, ^\circ C$	$\lambda_{в, Вт \cdot м^{-1} \cdot К^{-1}}$
			$R_1 =$			$t_1 =$	

- гнездо «Д2» системы соедините с гнездом «ДАТ» модуля кабелем типа «Тюльпан»;
- гнезда «ОБЩ» и «НАГР» системы соедините с гнездами «ПИТ» модуля проводами типа «Ш4-Ш4»;
- гнезда « $U_{эТ}$ » и « U_H » модуля соедините с мультиметрами проводами типа «Ш4-Ш4» в соответствии с маркировкой на корпусах мультиметров (мультиметры находятся в верхнем отсеке сейфа).

Для начала работы мультиметр « $U_{эТ}$ » включите в режим измерения сопротивления «200» ($Ом$), а мультиметр « U_H » - в режим измерения напряжения «200» ($мВ$).

2.2.3. Измерьте мультиметром « $U_{эТ}$ » сопротивление R_0 эталонного резистора модуля – ориентировочное значения 10 Ом. Запишите полученное значение в протокол вне таблицы.

2.2.4. Переключите мультиметр « $U_{эТ}$ » в режим измерения напряжения «2000» (мВ).

2.2.5. Проверьте исходное состояние органов управления системы, включите сетевой кабель в розетку ~ 220 В.

2.2.6. Включите тумблеры «СЕТЬ» и «НАГР» (вверх) – на шкале индикатора засветятся нули, засветится индикатор «Н2».

2.2.7. Утопите кнопку «Т2», запишите со шкалы индикатора в таблицу значение начальной температуры $t_{тр}(t_1)$ стенки трубы модуля с точностью 0,1 градуса.

2.2.8. Утопите кнопку « I_H », затем рукояткой «НАГРЕВ» установите на шкале индикатора значение тока $I_H = (30-35)$ мА, конкретное значение запишите в таблицу.

2.2.9. Запишите в таблицу с мультиметров значения напряжений « $U_{эТ}$ » и « U_H » в вольтах.

2.2.10. Переключите мультиметр « U_H » на диапазон «2000» (мВ).

2.2.11. Установите значение тока $I_H = (150-155)$ мА, его конкретное значение, а также значения « $U_{эТ}$ » и « U_H » с мультиметров запишите в таблицу.

2.2.12. Переключите мультиметр « $U_{эТ}$ » на диапазон «20» (В).

2.2.13. Повышая ток I_H через 50 мА до 400 мА, запишите в таблицу значения токов и напряжений с мультиметров.

2.2.14. Приведите органы управления системы в исходное состояние, отключите систему от сети ~ 220 В, разберите схему электропитания и измерений, уберите на свои места хранения реквизит.

2.3. Порядок обработки данных

2.3.1. Рассчитайте значения параметров, необходимые для последующего расчёта значений теплопроводности воздуха:

- сопротивление нити по формуле: $R_n = \frac{R_0 U_n}{U_{эм}}$ (Ом), где R_0 – сопротивление эталонного резистора;

- мощность, потребляемую нитью, по формуле: $W_n = I_n^2 R_n$ (Вт);

- температуру нити по формуле: $t_n = t_1 + \frac{(R_n - R_1)(1 + \alpha t_1)}{R_1 \alpha}$ ($^{\circ}C$), где $\alpha = 5,6 \cdot 10^{-3}$ град⁻¹

(температурный коэффициент материала нити); R_1 – сопротивление нити (Ом) при токе $I_n = 30$ мА.

Полученные данные запишите в таблицу.

2.3.2. Рассчитайте значения теплопроводности воздуха по формуле:

$$\lambda = \frac{W_n \cdot \ln \frac{D_{mp}}{d_n}}{2\pi L_n (t_n - t_{mp})} \text{ (Вт}\cdot\text{м}^{-1}\cdot\text{К}^{-1}\text{)}, \text{ где } D_{tr} = 12 \text{ мм (внутренний диаметр трубы);}$$

$d_n = 0,1 \text{ мм}$ (диаметр нити); $L_n = 240 \text{ мм}$ (длина нити).

2.3.3. Рассчитайте среднее значение $\langle \lambda \rangle$ теплопроводности воздуха из всех полученных в п. 2.2.2 значений.

2.3.4. Рассчитайте относительную погрешность (%) полученного значения $\langle \lambda \rangle$ по сравнению с его табличным значением ($0,034 \text{ Вт}\cdot\text{м}^{-1}\cdot\text{К}^{-1}$).

3. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

3.1. Назовите три вида теплообмена или теплопередачи.

3.2. В чём суть явления теплопроводности? Какая величина переносится при теплопроводности?

3.3. Какая величина называется тепловым потоком? В каких единицах СИ она измеряется?

3.4. Напишите и поясните закон теплопроводности Фурье.

3.5. Напишите формулу для коэффициента теплопроводности идеального газа.

3.6. Объясните понятие градиента температуры.

3.7. Какие явления переноса вы знаете?

3.8. В чём заключается метод нагретой нити для определения коэффициента теплопроводности газов?

3.9. Объясните назначение эталонного резистора в схеме экспериментальной установки.

3.10. Как определяется разность температур нити и наружной трубки в данной работе?

3.11. Как оценить среднюю длину свободного пробега и эффективный диаметр молекулы газа, используя явление теплопроводности?

3.12. Выведите расчётную формулу для определения коэффициента теплопроводности методом нагретой нити.

3.13. На основе МКТ выведите уравнение Фурье.

4. РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

4.1. Трофимова Т. И. Курс физики. М.: Высш. школа, 2007, § 48, с. 94-96.

4.2. Детлаф А.А., Яворский Б.М. Курс физики. М.: Высш. школа, 2000, § 9.2, п. 3, с. 114; § 10.7-10.9, с. 137-143.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 309

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЛАЖНОСТИ ВОЗДУХА

Цель работы: Формирование умений и навыков по работе с психрометром и по определению влажности воздуха.

Задание: Определение абсолютной влажности воздуха по «методу психрометра». Определение относительной влажности воздуха.

Методические указания и справочные данные по лабораторной работе:

Оборудование:

1. Психрометр аспирационный.
2. Барометр-анероид.
3. Стекло увеличительное.
4. Баночка с кипячёной водой.
5. Пипетка медицинская.

1. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ВВЕДЕНИЕ

Водяной пар присутствует в воздухе как одна из его газообразных составляющих и подчиняется *закону* о парциальных давлениях, эмпирически установленному *Дальтоном*:

Давление смеси идеальных газов равно сумме парциальных давлений этих газов

$$P = P_1 + P_2 + \dots, \quad (1)$$

где P - давление смеси, P_1, P_2, \dots - парциальные давления газов, входящих в смесь.

Пусть смесь газов занимает некоторый объём при определённых условиях. Парциальное давление газа, входящего в эту смесь, равно давлению, которое данный газ имел бы, если бы он один занимал данный объём при тех же условиях.

Чем больше тепла сообщается водяным парам, находящимся в воздухе, тем выше их температура и больше развиваемое ими давление (упругость). Это давление возрастает также с увеличением количества (массы) водяного пара, находящегося в данном объёме. То есть давление тем больше, чем выше степень насыщения пространства парами.

Давление водяных паров, содержащихся в воздухе в максимально возможном количестве (в состоянии насыщения) P_n при атмосферном давлении 760 мм рт. ст., изменяется в следующей зависимости от температуры:

Таблица

Температура воздуха $t_c, ^\circ\text{C}$	P_H мм рт. ст.
10	9,21
11	9,84
12	10,52
13	11,23
14	11,99
15	12,78
16	13,63
17	14,53
18	15,48
19	16,48
20	17,53
21	18,65
22	19,83
23	21,07
24	22,38
25	23,76
30	31,80
40	55,40

Понятие "влажность воздуха" обозначает вообще присутствие в нём водяных паров.

Абсолютная влажность указывает, какова масса ("весовое" количество) водяных паров в граммах, содержащихся в 1 м^3 воздушно-паровой смеси. То есть, это ничто иное как концентрация, или плотность паров в $\frac{\text{г}}{\text{м}^3}$.

Величина абсолютной влажности l численно мало отличается от величины упругости водяного пара P_n , поэтому принято абсолютную влажность называть упругостью водяного пара и выражать её в мм рт. ст.

$$P_{см} = P_{с.в} + P_n, \quad (2)$$

где $P_{см}$ - давление смеси, $P_{с.в}$ - парциальное давление сухого воздуха в смеси, P_n - парциальное давление водяного пара в смеси.

При данной температуре парциальное давление водяного пара в смеси не может превысить определённого предела, известного под названием "давление насыщения" P_H (см. таблицу).

Парциальное давление присутствующих в воздухе паров всегда меньше или равно P_n , то есть:

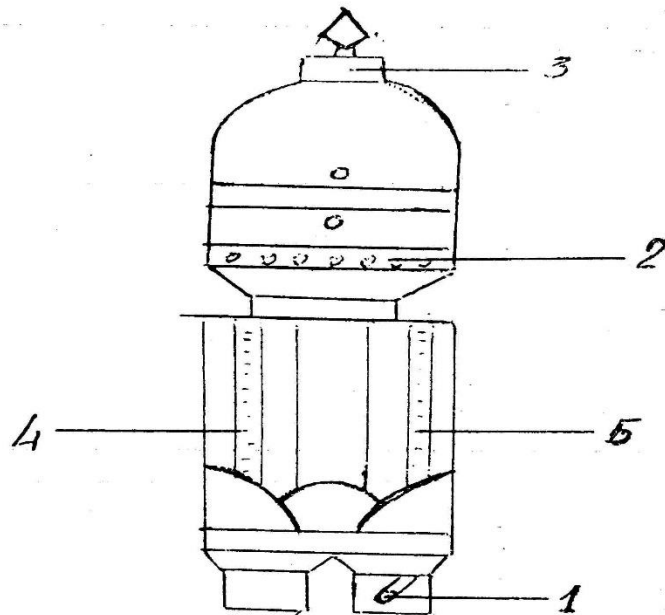
$$\begin{aligned} P_n / P_n &\leq 1, \\ r &= (P_n / P_n) \cdot 100\% \end{aligned} \quad (3)$$

Величина r (в процентах), выражающая отношение парциального давления паров, находящихся в паровоздушной смеси, к давлению их при состоянии насыщения для той же температуры, называется относительной влажностью воздуха.

Температура, при которой водяной пар, имеющийся в воздухе, становится насыщенным, то есть начинает конденсироваться на охлаждённой поверхности, называется точкой росы.

Определение влажности воздуха проводится обычно с использованием табличных данных «методом росы» или «методом психрометра».

2. «МЕТОД ПСИХРОМЕТРА»



Аспирационный психрометр Ассмана.

Рис. I.

Аспирационный психрометр Ассмана (см. рис.1) состоит из двух одинаковых термометров (4 и 5), находящихся в одинаковых потоках воздуха, и вентилятора (2) с рукояткой завода пружины (3). До смачивания одного из термометров показания их одинаковы.

Если баллончик (1) одного термометра смочить, он будет показывать более низкую температуру, чем сухой. Чем меньше влажность окружающего воздуха, тем интенсивнее испарение, тем ниже показания мокрого термометра. Разность температур двух термометров и будет характеризовать влажность воздуха.

Разность сухого и смоченного термометров ($t_c - t_m$) называется психрометрической разностью. Она тем больше, чем суше воздух.

Абсолютная влажность по стандартному аспирационному психрометру определяется формулой:

$$l \approx P_i = P_H - A \cdot (t_n - t_i) \cdot H, \quad (4)$$

где p_n - упругость водяного пара, насыщающего пространство, численно приблизительно равна абсолютной влажности воздуха, P_H - упругость насыщенного водяного пара, определяется по таблице, H - барометрическое давление воздуха, определяется по барометру, $A = 0,0019 \text{град}^{-1}$ - постоянная прибора.

3. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

3.1. Открыв баночку с кипячёной водой, наберите два-три раза воду в пипетку и закапайте её в горловину правого термометра, перевернув психрометр вентилятором вниз. Воду заливайте как в центральное отверстие, так и в кольцевой зазор, надёжно смочив фитиль, намотанный на баллон термометра.

3.2. Заведите ключом механизм пружинного вентилятора до отказа, в конце завода больших усилий не прилагайте, чтобы не сорвать пружину. Зафиксируйте начальное время по часам или включите секундомер.

3.3. Через 5 минут работы повторите завод вентилятора и через 5 минут запишите показания обоих термометров – сухого t_c и мокрого t_m , а также величину атмосферного давления по показанию барометра. *Таким образом, общее время работы вентилятора должно быть не менее 10 минут.*

Для более надёжной фиксации уровней ртути в термометрах психрометра Ассмана пользуйтесь увеличительным стеклом.

3.4. Рассчитайте абсолютную влажность воздуха по формуле (4) и относительную – по формуле (3).

4. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ (ПРИМЕРНЫЕ):

- 4.1. Парциальное давление.
- 4.2. Закон Дальтона.
- 4.3. Относительная влажность.
- 4.4. Абсолютная влажность.
- 4.5. «Метод психрометра».

5. ЛИТЕРАТУРА

5.1. Ландсберг Г.С. Элементарный учебник физики, т.1, Москва, «Наука», 1975г., с.613.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 310

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОТНОШЕНИЯ ТЕПЛОЁМКОСТЕЙ ВОЗДУХА МЕТОДОМ АДИАБАТНОГО РАСШИРЕНИЯ

Цель работы: Формирование умений и навыков по определению коэффициента Пуассона.

Задание: Определить отношение теплоемкостей воздуха.

Методические указания и справочные данные по лабораторной работе:

Оборудование и принадлежности (см. рис.1):

1. Стеклянный баллон **Б** с краном **К**.
2. Водяной U-образный манометр – **М**.
3. Насос Шинца- **Ш**.
4. Шприц с присоединённой хлорвиниловой трубкой.

1. ВВЕДЕНИЕ. ТЕПЛОЁМКОСТЬ

При изучении тепловых свойств вещества большое значение имеет понятие теплоёмкости. Теплоёмкостью (истинной) C тела называется отношение элементарного количества тепла δQ , сообщённого телу в каком-либо процессе, к соответствующему изменению температуры тела:

$$C = \frac{\delta Q}{dT} \quad (1)$$

Примечание: Поскольку теплота является функцией процесса изменения состояния системы, то элементарное количество тепла δQ , сообщаемого ей в процессе малого изменения её состояния, не является полным дифференциалом, чем и вызвано применение такого обозначения в числителе формулы (1).

Различают удельную теплоёмкость c - теплоёмкость единицы массы однородного вещества:

$$c = C / m, \text{ где } m - \text{масса тела}$$

и молярную (мольную) теплоёмкость C_M - теплоёмкость одного моля вещества:

$$C_M = M \cdot c, \quad (2)$$

где M - молекулярный вес вещества.

Первое начало термодинамики можно записать так:

$$\begin{aligned} CdT &= dU + M \cdot PdV & - \text{для килограмм-моля,} \\ cdT &= dU + Pdv & - \text{для единицы массы} \end{aligned} \quad (3)$$

Теплоёмкость вещества зависит от характера термодинамического процесса. Она различна в разных процессах и поэтому её нельзя считать характеристикой самого вещества.

В зависимости от термодинамического процесса различают теплоёмкости при постоянном объёме и при постоянном давлении. Теплоёмкость одного килограмма-моля и удельная теплоёмкость газа при постоянном объёме выражается формулой:

$$C_v = \frac{i}{2} \cdot \frac{R}{M} \quad \text{и} \quad C_v = \frac{i}{2} \cdot R, \quad (4)$$

где i - число степеней свободы;

R - универсальная постоянная;

M - молекулярный вес газа.

Теплоёмкость одного килограмма-моля и удельная теплоёмкость газа при постоянном давлении выражаются формулами:

$$C_p = (i+2)R/2M \quad \text{и} \quad C_p = (i+2)R/2 \quad (5)$$

При адиабатическом процессе очень часто приходится определять отношение теплоёмкости при постоянном давлении (C_p) к теплоёмкости при постоянном объёме (C_v):

$$\gamma = \frac{C_p}{C_v} = (i+2)/2 \quad (6)$$

2. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕТОДА ОПРЕДЕЛЕНИЯ

ОТНОШЕНИЯ $\frac{C_p}{C_v}$

В открытом баллоне (рис. 1) воздух находится в состоянии 1, характеризуемом параметрами: P_1 - атмосферное давление, T_1 - температура окружающей среды, ρ_1 - плотность воздуха. Если закрыть кран K и накачать в баллон воздух так медленно, чтобы его температура оставалась практически

постоянной, то воздух перейдёт изотермически в новое состояние 2 (рис. 2) с параметрами P_2, T_1 и ρ_2 .

При этом масса и плотность воздуха увеличиваются, а объём остаётся неизменным. Если после этого открыть кран, то воздух быстро выйдет из баллона, и давление его в баллоне станет равным атмосферному, а плотность и температура понизятся.

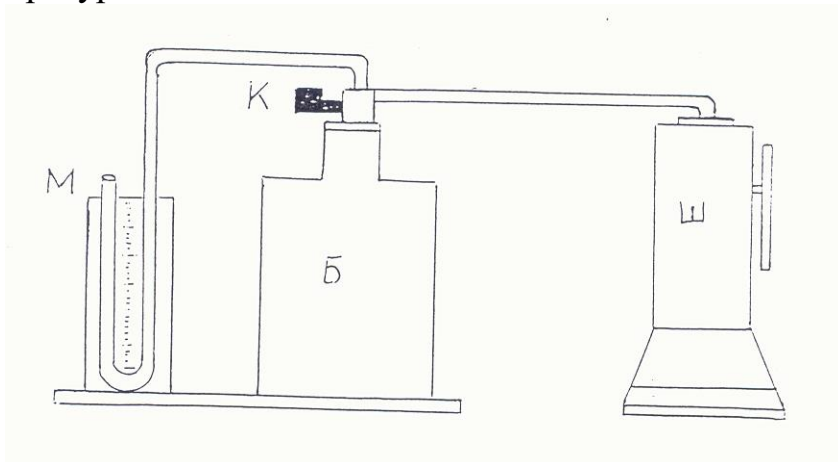


Схема установки

Рис.1

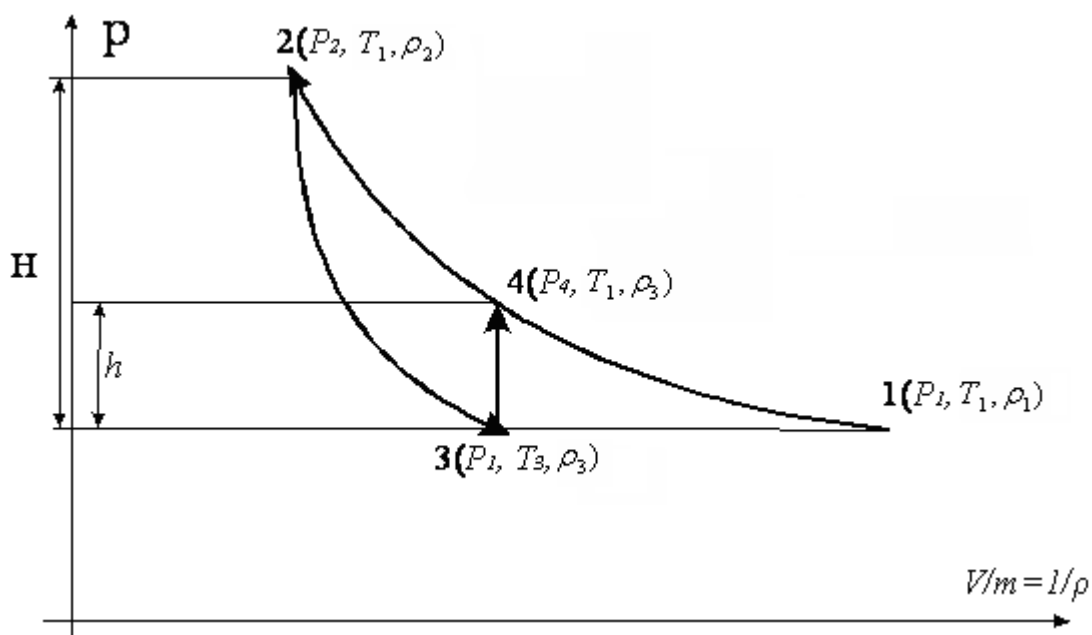


Диаграмма цикла.

Рис. 2.

Этот процесс практически осуществим без теплообмена с окружающей средой и его можно считать адиабатным. Воздух переходит в состояние 3 с параметрами $P_3=P_1, T_3, \rho_3$. Если точно в этот момент времени закрыть кран, то

воздух начнёт изохорно нагреваться до тех пор, пока его температура не станет равной температуре окружающей среды. При этом плотность не меняется, т.к. масса и объём газа постоянны. Воздух переходит в состояние 4 с параметрами P_4 , $T_4=T_1$, $\rho_4 = \rho_3$. Диаграмма цикла приведена на рис. 2. Здесь плотность состояния взята в координатах $P, I/\rho$, что равноценно координатам $P, V/m$ при постоянной массе газа, поскольку $I/\rho=V/m$.

Для адиабатного и изотермического процесса при постоянном объёме газа, но переменной его массе соответственно уравнения Пуассона и Бойля-Мариотта принимают вид:

$$\frac{P}{\rho^\gamma} = const, \quad (7)$$

$$\frac{P}{\rho} = const. \quad (8)$$

где $\gamma = \frac{C_p}{C_v}$ - коэффициент Пуассона.

Соотношения между параметрами состояния 2 и 3 определяются из уравнения адиабатного процесса (7), или

$$\frac{P_2}{\rho_2^\gamma} = \frac{P_3}{\rho_3^\gamma}; \quad \frac{P_2}{P_3} = \left(\frac{\rho_2}{\rho_3} \right)^\gamma, \quad (9)$$

а между параметрами состояния 2 и 4 - из уравнения изотермического процесса

$$\frac{P_2}{\rho_2} = \frac{P_4}{\rho_4}; \quad \frac{P_2}{P_4} = \frac{\rho_2}{\rho_3}; \quad (\rho_4 = \rho_3) \quad (10)$$

Из равенств (9) и (10) вытекает рабочая формула для определения коэффициента Пуассона:

$$\ln \frac{P_2}{P_1} = \gamma \cdot \ln \frac{P_2}{P_4} \quad (P_1 = P_3) \quad (11)$$

В процессе эксперимента манометром измеряются избыточные давления воздуха в баллоне в состояниях 2 и 4 относительно первоначального давления

$$H = P_2 - P_1, \quad (12)$$

$$h = P_4 - P_1. \quad (13)$$

Подставляя значения P_2 из формулы (12) в левую часть равенства (11), получаем:

$$\ln \frac{P_2}{P_1} = \ln \frac{H + P_1}{P_1} = \ln \left(1 + \frac{H}{P_1} \right) \quad (14)$$

При подстановке значений P_4 и P_2 из формул (12) и (13) в правую часть равенства (11) оно преобразуется к виду:

$$\gamma \cdot \ln \frac{P_2}{P_4} = \gamma \cdot \ln \frac{H + P_1}{P_1 + h} = \gamma \cdot \ln \left(\frac{H + P_1}{P_1} \cdot \frac{P_1}{h + P_1} \right) = \gamma \cdot \left[\ln \left(1 + \frac{H}{P_1} \right) - \ln \left(1 + \frac{h}{P_1} \right) \right] \quad (15)$$

Раскладывая в степенной ряд логарифмические функции (14), (15) и ограничиваясь третьим членом разложения (пренебрегая величинами второго порядка малости), равенство (11) приводим к виду:

$$\frac{H}{P_1} - \frac{1}{2} \left(\frac{H}{P_1} \right)^2 = \gamma \left[\frac{H}{P_1} - \frac{1}{2} \left(\frac{H}{P_1} \right)^2 - \frac{h}{P_1} + \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{h}{P_1} \right)^2 \right], \quad (16)$$

из которого выражается коэффициент Пуассона с точностью величины первого порядка малости:

$$\gamma = \frac{H}{H - h} \cdot \left(1 + \frac{1}{2} \cdot \frac{h}{P_1} \right) \quad (17)$$

Так как в экспериментах величина h не превышает 20 см водного столба, а $P_1 = 10^4$ мм вод. столба, то с погрешностью, не превышающей 1%, отношение теплоёмкостей определяется по формуле:

$$\frac{C_p}{C_v} = \gamma; \quad \gamma = \frac{H}{H - h} \quad (18)$$

3. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ ИЗМЕРЕНИЙ И ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТА

3.1. Проверить уровень жидкости в манометре при открытом кране бака, кран должен быть в вертикальном положении, уровни жидкости должны быть одинаковы (около 55 см шкалы).

3.2. Закрыть кран бака (повернуть в горизонтальное положение направо или налево).

3.3. Накачать насосом в бак воздух, чтобы уровень жидкости в правом колене поднялся примерно до 81 см.

ВНИМАНИЕ: накачку вести осторожно, чтобы жидкость не выплеснулась из манометра!!!

3.4. Наблюдать опускание уровня в правом колене. В момент, когда показание будет равно $H_1=80$ см, записать показание H_2 в левом колене манометра (см. рис. 1) и одновременно перевести рукоятку крана бака в противоположное горизонтальное (закрытое) положение. *Данную работу удобнее проводить вдвоём.*

ВНИМАНИЕ: перевод рукоятки из одного закрытого положения в другое необходимо осуществлять равномерно *в течение примерно 1 секунды.*

Пояснение: при повороте крана баллон на некоторое время соединяется с атмосферой, и давление в нём падает до атмосферного, но затем – после переброски крана в новое горизонтальное положение - в баке вновь возрастает давление (из-за роста температуры, см. теорию процесса).

3.5. После переброски крана и успокоения колебаний измерить уровни жидкости (показания) h_1 - в правом колене манометра, h_2 - в левом колене манометра.

3.6. По полученным данным рассчитать величину γ по формуле (18), результат сравнить со справочным значением для воздуха (1, 40).

3.7. При совпадении значений с точностью $\pm 0,05$ измерения повторить ещё 9 раз, начиная от одного и того же уровня жидкости $H_1=80$ см в правом колене манометра. В случае более значительного отклонения необходимо в очередном замере изменить скорость переброски рукоятки крана – при отклонении в большую сторону скорость уменьшить и наоборот.

Стабильность результатов обеспечивается при соблюдении во всех замерах правильно подобранной скорости переброса рукоятки.

Все данные внести в таблицу прямых измерений:

Таблица

Кол. изм. п	H_1 , см	H_2 , см	h_1 , см	h_2 , см
1				
2				
...				
10				

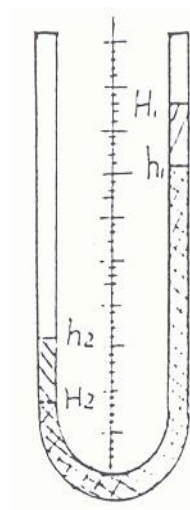


Рис. 3.
Схема показаний манометра.

3.8. Вычислить средние значения $\langle H_1 \rangle, \langle H_2 \rangle, \langle h_1 \rangle, \langle h_2 \rangle$,

затем $\langle H \rangle = \langle H_1 \rangle - \langle H_2 \rangle$ и рассчитать $\langle \gamma \rangle = \langle H \rangle / (\langle H \rangle - \langle h \rangle)$.
 $\langle h \rangle = \langle h_1 \rangle - \langle h_2 \rangle$

3.9. Найти погрешность прямых измерений $\Delta H_1, \Delta H_2, \Delta h_1, \Delta h_2$.

Принять $\Delta_{np} = \Delta_{окр} \approx 0,4 \text{ см}$, случайную статистическую ошибку определить по формуле:

$$\Delta_{сл} = t_{p,n} \cdot S_x, \text{ где } S_x - \text{среднеквадратичная ошибка серии измерений.}$$

Примечание: для H_1, H_2 считаем, что $\Delta_{сл} = 0$, то есть учитываем только Δ_{np} и $\Delta_{окр}$.
 Величину доверительной вероятности принять равной $p = 0,95$.

3.10. Найти погрешность H и h , учитывая, что H и h - результаты косвенных измерений.

3.11. Найти погрешность $\Delta \gamma$, считая, что γ - результат косвенного измерения, и записать результат: $\gamma = \langle \gamma \rangle \pm \Delta \gamma$. При расчёте погрешностей руководствоваться методическими указаниями №100.

4. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ (ПРИМЕРНЫЕ)

4.1. Понятие теплоёмкости, молярной теплоёмкости, удельной теплоёмкости, единицы их измерения.

4.2. Почему $C_p > C_v$? Дать объяснение, исходя из 1-го начала термодинамики.

4.3. Какой смысл вкладывается в понятие «внутренняя энергия»?

4.4. Какой процесс называется квазистатическим, какой обратимым, какой необратимым. Записать первое начало термодинамики для процессов: а) изохорного; б) изобарного; в) изотермического; г) адиабатического. Ответ пояснить соответствующими диаграммами.

4.5. Второе начало термодинамики. Термодинамический и статистический смысл энтропии.

5. ЛИТЕРАТУРА

5.1. Савельев И.В. Курс общей физики, т.1, М., «Наука», 1977г., с.277.

5.2. Трофимова Т.И. Курс физики, Москва, «Высшая школа», 2003г., с.103.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 313

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ВНУТРЕННЕГО ТРЕНИЯ ЖИДКОСТИ ПО «МЕТОДУ СТОКСА»

Цель работы: формирование умений и навыков по определению коэффициента внутреннего трения.

Задание: исследование внутреннего трения жидкости по «методу Стокса».

Методические указания и справочные данные по лабораторной работе:

Принадлежности: набор свинцовых шариков, метрическая линейка 20 см, штангенциркуль, ручной секундомер, пенал.

1. ВВЕДЕНИЕ

Если имеется поток жидкости или газа, скорость течения в котором различна в разных местах, то благодаря тепловому движению молекул происходит передача импульса от более быстрых участков потока к менее быстрым, подобно тому, как при теплопроводности возникает поток тепла из более нагретых в менее нагретые участки среды. Этот процесс называется *внутренним трением или вязкостью*.

С другой стороны, изменение импульса тела в единицу времени есть сила, действующая на тело. Поэтому импульс, переносимый в единицу времени через единицу поверхности и передаваемый, в конце концов, от жидкости к стенке, представляет собой силу трения, действующую на единицу поверхности.

2. МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА ВНУТРЕННЕГО ТРЕНИЯ ПО «МЕТОДУ СТОКСА»

При достаточно малых скоростях движения тела в жидкости или в газе сила сопротивления, испытываемая этим телом, оказывается пропорциональна скорости его движения в этой жидкости. Для движения шара эта сила имеет вид:

$$F = 6\pi\eta r v, \quad (1)$$

где η - коэффициент динамической вязкости, r - радиус шара, v - скорость движения шара относительно жидкости.

Эта формула называется *формулой Стокса*.

Условие "достаточной малости" скорости имеет относительный характер и определяется малостью безразмерного числа - *числа Рейнольдса*

$$\text{Re} = \frac{\rho v d}{\eta} \ll 1, \quad (2)$$

где ρ - плотность жидкости.

Физическая величина допустимых скоростей зависит от размеров движущегося тела, от вязкости жидкости и от её плотности. При очень малых размерах (например, для взвешенных частиц, совершающих броуновское движение) формула Стокса применима и для скоростей, которые уже нельзя назвать малыми.

На шар, движущийся в вязкой жидкости, действуют следующие силы (см. рис.1): сила тяжести \vec{P} , выталкивающая сила (*архимедова сила*) \vec{Q} , сила сопротивления \vec{F} . Вначале шар будет двигаться ускоренно, но по мере возрастания скорости будет возрастать и сила сопротивления. При некоторой скорости будет выполнено условие равновесия сил, действующих на шар (см. рис.2):

$$\vec{F} + \vec{Q} + \vec{P} = 0 \quad \text{или} \quad F + Q = P \quad (3)$$

Обозначим через ρ плотность шара, а через ρ_1 плотность жидкости, тогда

$$\begin{aligned} P &= mg = \rho Vg \\ Q &= \frac{4}{3}\pi r^3 \rho_1 g, \quad \text{где } V - \text{объём шара.} \end{aligned} \quad (4)$$

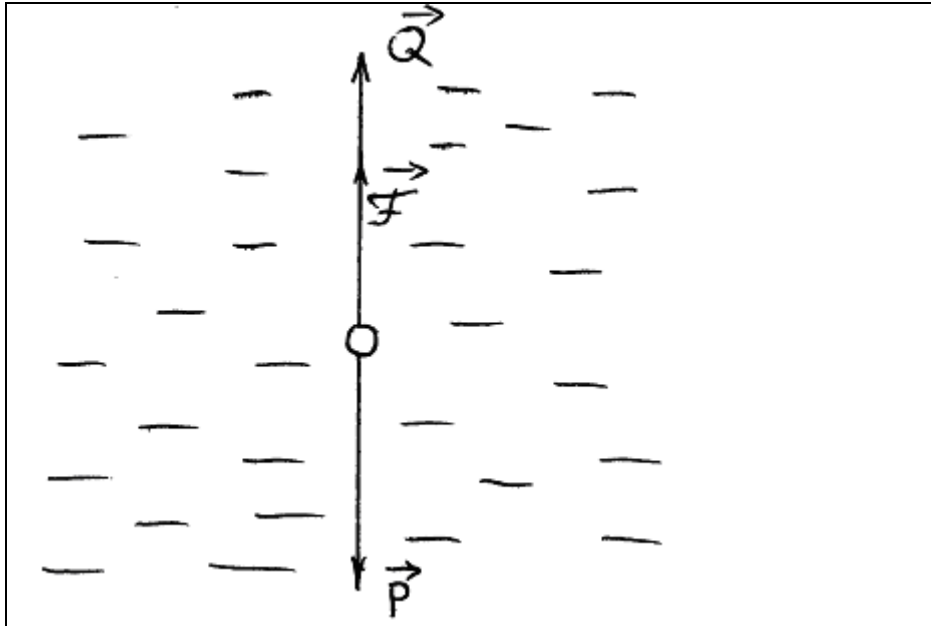


Рис. 1.

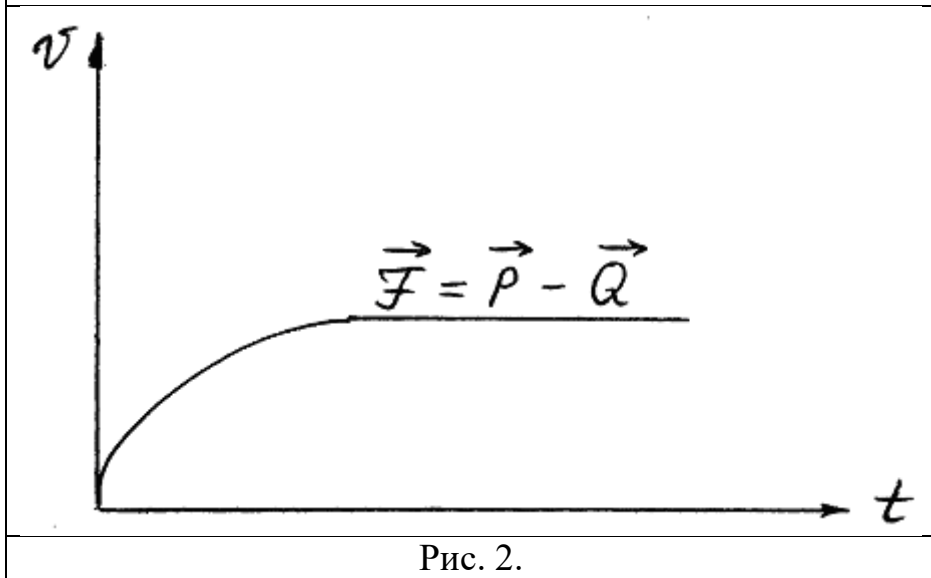


Рис. 2.

Подставив выражения (1) и оба (4) в (3), получим

$$\frac{4}{3} \pi r^3 g (\rho - \rho_1) - 6\pi \eta r v = 0,$$

откуда:

$$\eta = \frac{2r^2(\rho - \rho_1)g}{9v}, \quad (5)$$

или

$$\eta = \frac{(\rho - \rho_1)gd^2t}{18l}, \quad (6)$$

где d - диаметр шара;

t - время прохождения шаром расстояния l ;

$$g = 9,81 \text{ м/с}^2.$$

Таким образом, зная скорость движения шара в жидкости, можно определить коэффициент её вязкости.

3. ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ СХЕМА

Установка состоит из мензурки, заполненной вязкой жидкостью. На цилиндре имеются две метки, которые устанавливаются на некотором расстоянии друг от друга, измеряемом с помощью линейки. Для измерения диаметра шарика применяется штангенциркуль с ценой деления нониуса 0,02 мм или микрометр, время движения шарика между метками измеряется секундомером.

При отборе шариков старайтесь «на глаз» подобрать их одного диаметра и без дефектов, желательный диаметр – не более 1 мм.

Плотность шарика $\rho = 11,3 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ (свинец), плотность жидкости $\rho_1 = 1,26 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ (глицерин).

4. ПРОВЕДЕНИЕ ИЗМЕРЕНИЙ И ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ

4.1. Отобрав несколько шариков произвольного диаметра, без замера их диаметров и времени падения в глицерине, потренируйтесь в использовании секундомера для проверки вашей реакции при фиксации центра шарика в момент пересечения им делений на мензурке (пуск на делении 900 или 500, стоп на делении 200 или 100 в зависимости от типа мензурки).

Таблица

Номер замера	d , мм	l , мм	t , с	η , кг/м·с
1				
2				
3				
4				
5				

4.2. Измерьте линейкой по образующей мензурки расстояние l между делением «900» и делением «200» (или 500 и 100), запишите полученное значение в таблицу.

4.3. Отберите 5 зачётных шариков на глаз одного диаметра, поместите их в дозатор.

4.4. Измерьте однократно диаметры отобранных шариков и верните их в дозатор на свои места.

4.5. Приготовьте обнулённый секундомер и опустите первый шарик в отверстие пробки мензурки, держа палец на кнопке «Пуск» секундомера.

4.5. В момент пересечения центром шарика верхнего деления нажмите кнопку «Пуск», а в момент пересечения нижнего нажмите кнопку «Стоп». Значение времени запишите в таблицу.

4.6. Обнулите секундомер, повторите операции по п.п. 4.4, 4.5 для остальных шариков.

4.7. Рассчитайте средние значения диаметров шариков и времени их падения. По формуле (6) вычислите среднее значение коэффициента вязкости глицерина.

4.8. Без замера диаметра шарика измерьте время его падения в пробирке с водой, при этом включайте секундомер в момент отпускания шарика, а выключайте в момент касания им дна. Запишите измеренное значение в протокол.

4.9. При расчёте погрешностей прямых измерений учтите погрешности округления и приборную для определения длины (высоты) падения. Погрешность измерения времени примите равной примерной удвоенной величине времени реакции человека при пуске и остановке секундомера (0,4 с). *Случайная погрешность в данном эксперименте отсутствует.*

4.10. Рассчитайте косвенную погрешность средней величины вязкости. При расчёте погрешностей руководствуйтесь методическими указаниями № 100.

5. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ (ПРИМЕРНЫЕ):

5.1. В чём состоит явление вязкости, каким законом оно описывается?

5.2. Какие силы действуют на шарик, падающий в жидкость?

5.3. Почему, начиная с некоторого момента времени, шарик движется равномерно?

5.4. Как изменяется скорость движения шарика с увеличением его диаметра?

5.5. Сделать вывод расчётной формулы для определения коэффициента вязкости жидкости по «методу Стокса».

5.6. Какие явления переноса существуют и каким законам они подчиняются?

5.7. Как зависит коэффициент вязкости жидкости от времени релаксации и от плотности жидкости?

6. ЛИТЕРАТУРА

6.1. Трофимова Т.И. Курс физики, Москва, «Высшая школа», 2003г.

6.2. Савельев И.В. Курс общей физики, т.1, Москва, «Наука», 1988г.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 314

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ВНУТРЕННЕГО ТРЕНИЯ, ДЛИНЫ СВОБОДНОГО ПРОБЕГА И ЭФФЕКТИВНОГО ДИАМЕТРА МОЛЕКУЛ ВОЗДУХА

Цель работы: формирование умений и навыков по определению коэффициента внутреннего трения, длины свободного пробега и эффективного диаметра молекул воздуха

Задание: определить коэффициент трения воздуха, рассчитать длину свободного пробега и эффективный диаметр молекул воздуха.

Методические указания и справочные данные по лабораторной работе:

Принадлежности: ручной секундомер, барометр, термометр комнатный, шприц с присоединённой хлорвиниловой трубкой.

1. ВВЕДЕНИЕ

Рассмотрим течение газа или жидкости по цилиндрической трубе радиуса R и длиной l . Давления $P1$ и $P2$, поддерживаемые на концах трубы, различны; газ течёт по трубе под влиянием перепада давлений $\Delta P = (P2 - P1)$. Скорость U течения газа направлена везде вдоль оси трубы, а по величине меняется в перпендикулярном к оси направлении в зависимости от одной координаты - расстояния r от оси. Мы можем поэтому написать для потока импульса, переносимого в радиальном направлении:

$$\Gamma = -\eta \frac{dU}{dr} \quad (1)$$

Рассмотрим объём жидкости, ограниченный проведённой внутри трубки и коаксиальной с ней цилиндрической поверхностью некоторого радиуса r (рис.1). Для определения силы трения, действующей на рассматриваемый объём газа со стороны остального газа, необходимо поток импульса через поверхность трубки умножить на площадь этой поверхности, равную $2\pi rl$:

$$F = 2\pi rl\tau = -2rl \frac{dU}{dr} \eta \quad (2)$$

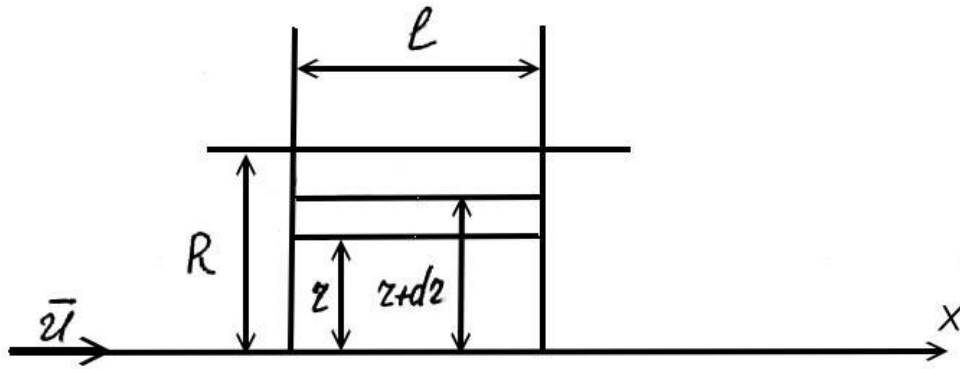


Рис.1.

Сила трения компенсируется силой перепада давлений, приложенных к основаниям цилиндра, которая равна $\pi r^2 \Delta P$. Приравнивая эти силы, получим уравнение:

$$U = -\frac{r^2}{2l\eta} \Delta P, \quad (3)$$

откуда после интегрирования получаем:

$$U = -\frac{r^2}{4l\eta} \Delta P + const \quad (4)$$

Произвольная постоянная определяется из условия равенства нулю скорости на самой поверхности трубы, то есть при $r = R$. Окончательно получаем:

$$U = \frac{\Delta P}{4l\eta} (R_1^2 - r^2) \quad (5)$$

Таким образом, текущий в трубе газ имеет параболический профиль скоростей (рис.2): скорость меняется по квадратичному закону от нуля на стенке до

максимального значения $U_{\max} = \frac{R_1^2 \Delta P}{4l\eta}$ на оси трубки. Определим $dV(r)$ объём

газа, вытекающего в единицу времени через цилиндр радиуса r . Очевидно, что дифференциал этой функции

$$dV(r) = U(r) dS, \quad (6)$$

где $U(r)$ - скорость газа на расстоянии r от оси, а dS - площадь кольца радиуса r и ширины dr . Поскольку $dS = 2\pi r dr$, то

$$dV = 2\pi r U dr = \frac{\pi \Delta P}{2l\eta} (R_1^2 - r^2) r dr = \frac{\pi \Delta P}{4l\eta} (R_1^2 - r^2) d(r^2) \quad (7)$$

Отсюда

$$V(r) = \frac{\pi \Delta P}{4l\eta} \left(R_1^2 r^2 - \frac{r^4}{2} \right) \quad (8)$$

Полный объём газа V , протекающий за время Δt , определяется формулой Пуазейля:

$$V = \frac{\pi R_1^4 \Delta P \Delta t}{8\eta l} \quad (9)$$

Из уравнения (9) следует, что

$$\eta = \frac{\pi R_1^4 \Delta P \Delta t}{8Vl} \quad (10)$$

Величины правой части (10) доступны измерению, поэтому этим уравнением можно воспользоваться для экспериментального определения коэффициента вязкости газа.

Кинетическая теория газов устанавливает связь между коэффициентом внутреннего трения идеального газа η , средней длиной свободного пробега молекул газа $\bar{\lambda}$ и средней арифметической скоростью \bar{U} их движения в виде:

$$\eta = \frac{1}{3} \rho \bar{\lambda} \bar{U} \quad , \quad (11)$$

где ρ - плотность газа. Более точный вывод соотношения (11), учитывающий распределение скоростей молекул по закону Максвелла, даёт другое выражение коэффициента внутреннего трения. Так, для воздуха

$$\eta = 0.5 \rho \bar{\lambda} \bar{U} \quad . \quad (12)$$

Заменим в этом уравнении \bar{U} и ρ с помощью известных из кинетической теории газов соотношений и, проведя элементарные преобразования, получим:

$$\bar{\lambda} = \frac{\eta}{P} \sqrt{\frac{\pi R T}{2\mu}} \quad , \quad (13)$$

где T - абсолютная температура, R - универсальная газовая постоянная,

μ - молекулярная масса газа.

Справочные данные:

$$R = 8,31 \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}}, \quad \mu = 29 \cdot 10^{-3} \frac{\text{кг}}{\text{моль}}, \quad P - \text{атмосферное давление, } \frac{\text{Н}}{\text{м}^2}.$$

Из соотношения:

$$\bar{\lambda} = \frac{1}{\sqrt{2\pi n d^2}} \quad (14)$$

можно рассчитать эффективный диаметр молекул воздуха. Здесь n - число молекул в единице объёма (концентрация), d - их эффективный диаметр. Концентрация n определяется из формулы:

$$P = nkT, \quad (15)$$

где P – давление воздуха, равное атмосферному, k – постоянная Больцмана, равная $1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К.

2. МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЯ

Для эксперимента используется установка, изображённая на рис.4. Расход газа через капилляр (5) равен расходу жидкости из сосуда (1). При истечении жидкости из сосуда давление в нём установится меньше атмосферного, за счёт этой разности давлений воздух снаружи протекает через капилляр в сосуд. Разность давлений - атмосферного P и давления в сосуде P_0 - регистрируется с помощью гидроманометра (3). В виду того, что в процессе эксперимента скорость истечения жидкости при понижении её уровня уменьшается, необходимо учесть изменение перепада давлений в процессе эксперимента. Для этого рассчитываем средний перепад давлений, который определяется как полусумма перепадов давлений в начале и в конце эксперимента.

$$\Delta P = P - P_0, \quad (16)$$

$$\Delta P = \rho g h,$$

где ρ - плотность воды, h – расстояние между уровнями жидкости гидроманометра (см. рис.3).

$$\Delta P_{cp} = \frac{\Delta P_1 + \Delta P_2}{2} = \rho g \frac{h_1 + h_2}{2} \quad (17)$$

Тогда рабочая формула примет вид:

$$\eta = \frac{\pi R_1^4 \rho g \Delta t (h_1 + h_2)}{16Vl} \quad (18)$$

В начале эксперимента: $h_1 = n_1 + n_2$

(19)

В конце эксперимента: $h_2 = n_3 + n_4$

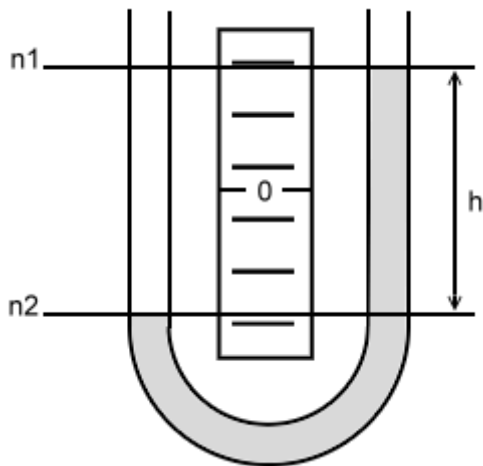


Рис. 3.

Схема гидроманометра.

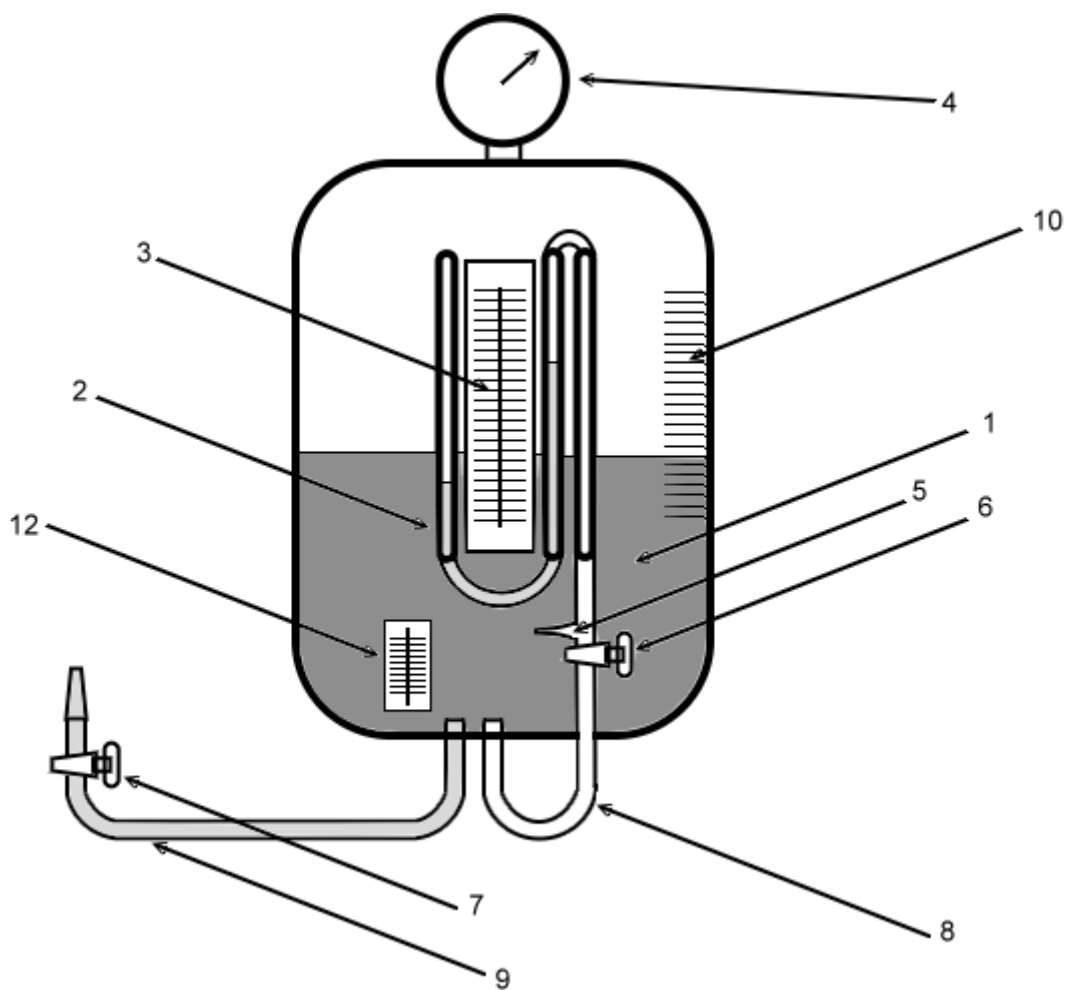


Рис.4.
Принципиальная схема установки.

3. ПРОВЕДЕНИЕ ИЗМЕРЕНИЙ И ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТА

3.1. Откройте кран 6 на трубке 8 для соединения сосуда с атмосферой при заполнении сосуда водой.

3.2. Убедитесь, что начальный уровень воды в трубках гидроманометра 3 находится на делении «0» (или долейте воду через левую трубку, соединённую с атмосферой).

3.3. Для заполнения сосуда водой откройте кран 7 на трубке 9 и присоедините его к водопроводному крану. Осторожно откройте водопроводный кран.

3.4. Заполните сосуд 1 до деления "0" шкалы 10, закройте краны – водопроводный, 7 и 6, отсоедините шланг от водопроводного крана.

3.5. Поместите шланг с краном 7 в водопроводную раковину и откройте этот кран. Приготовьте секундомер и следите за понижением уровня воды в сосуде по шкале 10.

3.6. В момент прохождения уровня воды через деление 2 запустите секундомер, одновременно записав показания n_1 и n_2 со шкалы гидроманометра.

3.7. Выждите, когда вытечет 10 литров воды, на делении 12 шкалы остановите секундомер, одновременно записав показания n_3 и n_4 со шкалы гидроманометра.

3.8. Занесите все полученные данные в таблицу.

Таблица

P	t	Δt	h_1	h_2	V	n_1, n_2	n_3, n_4	η
H/m^2	$^{\circ}C$	c	m	m	$л$	$мм$	$мм$	$мПа \cdot c$

Здесь: P - атмосферное давление по барометру 4; t - температура окружающего воздуха по термометру 11; Δt - время истечения жидкости; h_1, h_2 - расстояния между уровнями жидкости гидроманометра в начале и в конце эксперимента, рассчитанные по формулам (19); V – объём жидкости, вытекшей из сосуда за время Δt ; n_1, n_2 - показания гидроманометра в начале и n_3, n_4 - в конце эксперимента; η - коэффициент внутреннего трения воздуха.

3.9. По результатам эксперимента рассчитайте значение коэффициента внутреннего трения (вязкости) воздуха по формуле (18), табличное значение 0,0182 мПа·с.

3.10. Определите среднюю длину свободного пробега молекул воздуха по формуле (13), табличное значение 10^{-7} м.

3.11. Рассчитайте эффективный диаметр молекул воздуха по формулам (14) и (15), табличное значение $3 \cdot 10^{-10}$ м.

3.12. Определите погрешность измерения коэффициента вязкости как ошибку косвенного измерения, учитывая только ошибки округления, ошибкой измерения времени пренебрегите. Интервалами округления считать: для V - 0,25 литра, для n – 2 мм. При расчёте погрешностей руководствуйтесь методическими указаниями №100.

Справочные данные:

$\rho = 10^3 \text{ кг} / \text{м}^3$ - плотность воды; $l = (10 \pm 0.1) \cdot 10^{-2} \text{ м}$ - длина капилляра; $R_1 = (0,508 \pm 0.003) \cdot 10^{-3} \text{ м}$ - радиус капилляра.

4. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ (ПРИМЕРНЫЕ)

4.1. Сущность явления внутреннего трения в газах и в жидкостях.

4.2. Напишите формулу Пуазейля и объясните, при каких условиях она справедлива.

4.3. Что такое длина свободного пробега молекул газа? Как её рассчитать, используя данные эксперимента?

4.4. Что такое эффективный диаметр молекул?

4.5. В чём сущность метода измерения коэффициента внутреннего трения газа в данной работе?

4.6. В каких единицах измеряется коэффициент внутреннего трения газа?

4.7. Какие явления переноса существуют и каким законам подчиняются?

5. ЛИТЕРАТУРА

5.1. И.В. Савельев, Курс общей физики, т.1, Москва, «Наука», 1977 г., с.395.

5.2. А. А. Детлаф, Б.М. Яворский, Я.Б. Милковская, Курс физики, т.1.

5.3. Физический практикум под редакцией В. И. Ивероновой.

5.4. Приложение к данной работе.

5.5. Терентьев А.Д., Введение в физику: Основы физических измерений, Методическое пособие № 100, КГТУ, 2006 г.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение 1 (к ЛРН № 100)

Таблица 1

Коэффициенты Стьюдента

n \ p	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	0.95	0.98	0.99	0.999
2	1,0	1,38	2,0	3,1	6,3	12,7	31,8	63,7	636,6
3	0,82	1,06	1,3	1,9	2,9	4,3	7,0	9,9	31,6
4	0,77	0,98	1,3	1,6	2,4	3,2	4,5	5,8	12,9
5	0,74	0,94	1,2	1,5	2,1	2,8	3,7	4,6	8,6
6	0,73	0,92	1,2	1,5	2,0	2,6	3,4	4,0	6,9
7	0,72	0,90	1,1	1,4	1,9	2,4	3,1	3,7	6,0
8	0,71	0,90	1,1	1,4	1,9	2,4	3,0	3,5	5,4
9	0,71	0,90	1,1	1,4	1,8	2,3	2,9	3,4	5,0
10	0,70	0,88	1,1	1,4	1,8	2,3	2,8	3,3	4,8
11	0,70	0,88	1,1	1,4	1,8	2,2	2,8	3,2	4,6
12	0,70	0,87	1,1	1,4	1,8	2,2	2,7	3,1	4,5
13	0,70	0,87	1,1	1,4	1,8	2,2	2,7	3,1	4,3
14	0,69	0,87	1,1	1,4	1,8	2,2	2,7	3,0	4,2
15	0,69	0,87	1,1	1,3	1,8	2,1	2,6	3,0	4,1
20	0,69	0,87	1,1	1,3	1,7	2,1	2,5	2,9	3,9
30	0,68	0,85	1,1	1,3	1,7	2,0	2,5	2,8	3,7
40	0,68	0,85	1,1	1,3	1,7	2,0	2,4	2,7	3,6
60	0,68	0,85	1,0	1,3	1,7	2,0	2,4	2,7	3,5
120	0,68	0,85	1,0	1,3	1,7	2,0	2,4	2,6	3,4
∞	0,67	0,84	1,0	1,3	1,6	2,0	2,3	2,6	3,3

Таблица 2

Значения коэффициента λ_p

P	0.5	0.7	0.75	0.80	0.90	0.95	0.99	0.997
λ_p	0.67	1.0	1.15	1.3	1.6	2.0	2.6	3.0

Приложение 2

Периодическая система химических элементов Д.И.Менделеева

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1	1	2																
	H	He																
	1,008	4,0026																
2	3	4																
	Li	Be																
	6,941	9,0122																
3	11	12																
	Na	Mg																
	22,9897	24,3050																
4	19	20	21															
	K	Ca	Sc															
	39,0983	40,078	44,9559															
5	37	38	39															
	Rb	Sr	Y															
	85,4678	87,62	88,9059															
6	55	56	57	*														
	Cs	Ba	La															
	132,9054	137,327	138,9055															
7	87	88	89	**														
	Fr	Ra	Ac															
	[223]	[226]	[227]															

5	6	7	8	9	10
B	C	N	O	F	Ne
10,811	12,011	14,007	15,999	18,998	20,180
13	14	15	16	17	18
Al	Si	P	S	Cl	Ar
26,982	28,086	30,974	32,066	35,453	39,948
31	32	33	34	35	36
Ga	Ge	As	Se	Br	Kr
69,723	72,61	74,922	78,96	79,904	83,80
49	50	51	52	53	54
In	Sn	Sb	Te	I	Xe
114,82	118,71	121,75	127,60	126,905	131,29
81	82	83	84	85	86
Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn
204,383	207,2	208,980	[209]	[210]	[222]

*	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71
	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
	140,116	140,90765	144,24	[145]	150,36	151,964	157,25	158,92534	162,50	164,93032	167,26	168,93421	173,04	174,967
**	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103
	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr
	232,0381	231,03588	238,0289	[237]	[242]	[243]	[247]	[247]	[251]	[252]	[257]	[258]	[259]	[262]

Учебно-методическое пособие

Халяпин Вячеслав Анатольевич

ФИЗИКА.
МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА И ТЕРМОДИНАМИКА.

Редактор Г.Е. Смирнова
Компьютерная верстка Е.В. Мироновой

Издательство федерального государственного бюджетного
образовательного учреждения высшего образования
«КАЛИНИНГРАДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ»
236022. Калининград, Советский проспект, 1

