

Саратовский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского
Кафедра нелинейной физики

ПРАКТИКУМ
ПО МОЛЕКУЛЯРНОЙ ФИЗИКЕ
И ТЕРМОДИНАМИКЕ

Комплекс ЛКТ-9

Учебно-методическое пособие к лабораторной работе
в интегрированном учебно-научном практикуме
«Методика, технология и информационное обеспечение
физического эксперимента»

2012 г.

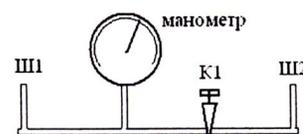
Технические характеристики установки

Напряжение питания 220В, 50Гц

Потребляемая мощность водонагревателя (электрочайник) 2кВт

Состав установки

1. Вольтметр стрелочный на приборной панели для измерения напряжения сети (0 – 250В)
2. Пневмосистема (кран-зажим и два штуцера, установленные внутри приборной панели). Нормальное положение крана – открытое, предохраняет пережимаемый силиконовый шланг от слипания.
3. Манометр на избыточное давление до 40 кПа (300мм.рт.ст.), установлен на приборной панели и входит в состав пневмосистемы. Исходное показание нулевое.
4. Секундомер. Управление секундомером осуществляется тремя кнопками. Кнопка "MODE" – выбор режима работы. В режиме секундомера кнопка ADVANCE поочередно запускает и останавливает отсчет времени. Если не сбрасывать отсчеты, то происходит суммирование измеряемых интервалов времени. Кнопка "SET", нажатая в процессе отсчета времени вместо кнопки "MODE", фиксирует показания дисплея, но не останавливает отсчета времени. При повторном нажатии этой кнопки показания дисплея будут соответствовать продолжающемуся отсчету времени. Кнопка "SET", нажатая при остановленном отсчете времени, сбрасывает (обнуляет) отсчет и показания дисплея.
5. Мультиметр с питанием от источника внутри приборной панели.
6. Калькулятор с питанием от собственной батареи.
7. Электроводонагреватель (чайник), используемый в качестве водяной бани и калориметра. Установлен на поддоне.
8. Баллон стеклянный объемом 1л, помещаемый в водонагреватель, с плотной крышкой с клапаном и штуцером для шлангов.
9. Баллон пластмассовый объемом 1л, на крышке которого смонтированы два штуцера для шлангов.
10. Шланги силиконовые длиной 600, 600 и 320мм.
11. Груша-помпа с винтовым зажимом и штуцером для шланга.
12. Дроссель-капилляр. Диаметр капилляра 0,26мм, длина 22мм.
13. Провода к мультиметру.
14. Термопара к мультиметру.
15. Мензурки на 1л и на 0,25л.
16. Флакон объемом 50мл со штуцером для шлангов на крышке.



Перед началом практического этапа работы:

1. Включить установку в сеть 220В для питания мультиметра. При этом вольтметр должен показать напряжение сети (коэффициент шкалы вольтметра 5В/дел).
2. Подключить термопару к мультиметру (черная – СОМ, красная – VΩmA). При этом в состоянии измерения температуры мультиметр должен показывать значение комнатной температуры.

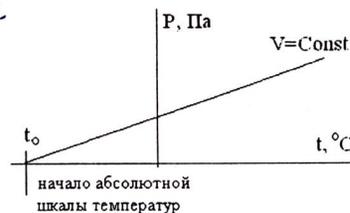
Упражнение 1.

Определение температурного коэффициента давления. Вычисление положения нуля абсолютной шкалы температур.

Закон изохорного нагревания $\frac{P}{T} = Const$, можно записать в

виде $P = P_0 \frac{T}{T_0}$, где P_0 и T_0 давление и температура при 0°C .

Полученный экспериментальным путем при использовании температурной шкалы Цельсия, он имел вид $P = P_0(1 + \alpha \cdot t)$, линейной зависимости для всех газов, независимо от их природы (См. рис.). Это послужило размышлениям о существовании так называемой "абсолютной температуры". (Хорак Бенедикт де Соссюр, Жак Александр Сезар Шарль – 1787, Уильям Томсон (лорд Кельвин с 1892) – 1848).



В ходе эксперимента определите температурный коэффициент давления α и положение нуля абсолютной шкалы температур.

1. Вставьте стеклянный баллон в водонагреватель (чайник) и залейте в чайник холодную воду до уровня крышки баллона. Выдержать не менее двух минут.

Баллон внутри должен быть абсолютно сухой!

При попадании в баллон влаги давление в нем может возрасти до давления более 100кПа (значение давления насыщенных паров воды при температуре 100°C). Признаками попадания в баллон влаги являются повышение давления воздуха более, чем до 300мм.рт.ст. или срабатывание предохранительного клапана, настроенного на давление свыше 40...60кПа. При проявлении этих признаков, откройте кран К1 и прекратите опыт. Снимите крышку баллона, удалите малейшие следы влаги (просушите!), после чего установите крышку на место.

2. Измерьте температуру воды t_1 с помощью термопары и мультиметра
3. Определите по барометру в лаборатории атмосферное давление (или примите его равным $P_1 \approx 100\text{кПа}$). При этом барометр пневмосистемы должен показывать нулевое значение.
4. Подключить баллон к манометру через штуцер Ш1 и закрыть кран К1, перекрыв выход пневмосистемы.
5. Включить водонагреватель в сеть, нагреть воду до кипения, выдержать кипение в течение одной минуты и измерить температуру t_2 .
6. Измерить новое значение давления газа P_2 в стеклянном баллоне.
7. Определить температурный коэффициент по формуле $\alpha = \frac{P_2 - P_1}{P_1 \cdot t_2 - P_2 \cdot t_1}$, которую

необходимо вывести самостоятельно.

8. Так же, используя соображения, изложенные выше и построив график, определите температуру для значения абсолютного нуля t_0 по шкале Цельсия.
9. Повторить серию измерений не менее трех раз и произвести оценку относительной погрешности измерений.

Литература

1. Сивухин Д.В. Общий курс физики. Т.2. Термодинамика и молекулярная физика. М.: Наука. 1989. §§ 4...8, 97.
2. Матвеев А.Н. Молекулярная физика. М.: Высшая школа. 1981. §§ 50, 52.
3. Ландау Л.Д., Ахиезер А.И., Лифшиц Е.М. Курс общей физики. М.: Наука. 1969. §§ 109, 112, 113.

Упражнение 2.

Проверка закона Бойля-Мариотта.

1. Подключить пластиковый баллон, емкостью 1,0л с двумя штуцерами к манометру, через штуцер Ш1. Ко второму штуцеру этого баллона присоединить шланг от груши-помпы.

Баллон внутри должен быть абсолютно сухой!

При попадании в баллон влаги давление в нем может возрасти до давления более 100кПа (значение давления насыщенных паров воды при температуре 100 °С). Признаками попадания в баллон влаги являются повышение давления воздуха более, чем до 300мм.рт.ст. или срабатывание предохранительного клапана, настроенного на давление свыше 40...60кПа. При проявлении этих признаков, откройте кран К1 и прекратите опыт. Снимите крышку баллона, удалите малейшие следы влаги (просушите!), после чего установите крышку на место.

2. Перекрыть кран К1
3. Накачать в баллон воздух до давления $P_1 \approx 180-220$ мм.рт.ст.
4. Затянуть винтовой зажим груши-помпы и подождать 1...2 минуты до установления в баллон комнатной температуры t_1
5. Зарегистрировать давление P_1 .
6. Для проведения процесса расширения газа, подключить через штуцер Ш2 стеклянный баллон, объемом 1л, в котором находится воздух при комнатном давлении и температуре.
7. Открыть кран К1, подождать 1...2 минуты для полного выравнивания давлений и температур в объединенном объеме двух баллонов, после чего зарегистрировать давление P манометром.
8. Составьте формулу проведенного изотермического процесса расширения, и подставьте в нее полученные данные. Сравните значение измеренного давления P со значением, полученным путем вычислений. Постройте график в координатах $P-V$.
9. Измерения произвести не менее 3...5-ти раз и произвести оценку относительной погрешности измерений.

Литература

1. Сивухин Д.В. Общий курс физики. Т.2. Термодинамика и молекулярная физика. М.: Наука. 1989. §§ 4...8, 97.
2. Матвеев А.Н. Молекулярная физика. М.: Высшая школа. 1981. §§ 50, 52.
3. Ландау Л.Д., Ахиезер А.И., Лифшиц Е.М. Курс общей физики. М.: Наука. 1969. §§ 109, 112, 113.

Упражнение 3.

Проверка уравнения состояния идеального газа.

Данное задание представляет, по сути, демонстрацию сложного процесса объединения двух разных объемов газа, имеющих разные температуры, с последующим выравниванием температуры в общем объеме. Установившееся при объединении давление сначала непосредственно измеряется, а затем сравнивается со значением, вычисленным путем использования уравнений состояния идеального газа и закона Дальтона, также справедливого только для идеального газа. Тем самым справедливость установленных законов подтверждается как для элементарных процессов, так и при многоступенчатых действиях.

Подготовим первый объем:

1. Подключить пластиковый баллон, емкостью $V_1=1,0$ л с двумя штуцерами посредством шлангов к манометру (через штуцер Ш1) и к груше-помпе.

Баллон внутри должен быть абсолютно сухой!

При попадании в баллон влаги давление в нем может возрасти до давления более 100кПа (значение давления насыщенных паров воды при температуре 100 °С). Признаками попадания в баллон влаги являются повышение давления воздуха более, чем до 300мм.рт.ст. или срабатывание предохранительного клапана, настроенного на давление свыше 40...60кПа. При проявлении этих признаков, откройте кран К1 и прекратите опыт. Снимите крышку баллона, удалите малейшие следы влаги (просушите!), после чего установите крышку на место.

2. Установить на шланге груши-помпы винтовой зажим в открытом состоянии.
2. Перекрыть кран К1
3. Накачать в баллон воздух до давления $P_1 \approx 180-220$ мм.рт.ст.
4. Затянуть винтовой зажим груши-помпы и подождать 1...2 минуты до установления в баллоне комнатной температуры t_1
5. Зарегистрировать давление P_1 .

Подготовим второй объем:

6. При закрытом кране К1 подключить к штуцеру Ш2 стеклянный баллон емкостью $V_2=1$ л, в котором находится воздух при комнатном давлении P_2 .
7. Поместить стеклянный баллон в чайник с водой
8. Включить нагреватель и довести воду до температуры кипения t_2

Объединим оба объема:

9. Открыть кран К1, подождать 1...2 минуты для полного выравнивания давлений и температур в объединенном объеме двух баллонов, после чего зарегистрировать давление P манометром.
10. Сравнить измеренное значение давления с теоретическим значением, полученным для этого опыта с применением законов состояния идеального газа:

$$P = \frac{P_1 \cdot V_1 + P_2 \cdot V_2}{V_1 + V_2} \cdot \frac{T_2}{T_1} \approx \frac{P_1 + P_2}{2} \cdot \frac{T_2}{T_1} \text{ (получите эту формулу самостоятельно),}$$

во втором выражении учтено, что в нашем эксперименте объемы V_1 и V_2 примерно равны.

11. Измерения произвести не менее 3...5-ти раз и произвести оценку относительной погрешности измерений.

Литература

1. Сивухин Д.В. Общий курс физики. Т.2. Термодинамика и молекулярная физика. М.: Наука. 1989. §§ 4...8, 97.
2. Матвеев А.Н. Молекулярная физика. М.: Высшая школа. 1981. §§ 50, 52.
3. Ландау Л.Д., Ахиезер А.И., Лифшиц Е.М. Курс общей физики. М.: Наука. 1969. §§ 109, 112, 113.

Упражнение 4.

Определение мощности, к.п.д. и теплоемкости электронагревателя.

Определение мощности.

1. Измерьте мультиметром сопротивление нагревателя электроводонагревателя (чайника).
2. Налейте в чайник 1л воды.
3. Включите чайник в сеть.
4. По данным напряжения электроводонагревателя при включенном чайнике и по измеренному значению внутреннего сопротивления, вычислите мощность чайника.
5. По паспортному значению мощности чайника рассчитайте его внутреннее сопротивление и сравните с измеренным значением.
6. Объясните возможные причины расхождения.

Определение к.п.д.

Будем считать, что средняя мощность потерь нагревателя $\langle W' \rangle$ равна половине мощности потерь W' при остывании чайника, нагретого до температуры кипения воды: $\langle W' \rangle = \frac{W'}{2}$.

Количество тепла, затраченное на нагревание от температуры T_1 до температуры кипения T_2 за время t_1 , будет равно: $(W_0 - \langle W' \rangle) \cdot t_1 = (C_w + C) \cdot (T_2 - T_1)$ (1)

Здесь W_0 – мощность нагревателя, измеренная в п1, в C_w – теплоемкость воды, C – теплоемкость чайника.

При остывании чайника до температуры T за время t будет выделено количество теплоты

$$W' \cdot t = (C_w + C) \cdot (T_2 - T) \quad (2)$$

Сопоставляя (1) и (2) получим выражение для мощности потерь: $W' = \frac{W_0}{0,5 + \frac{t_2 \cdot (T_2 - T_1)}{t_1 \cdot (T_2 - T)}}$

1. Залить в чайник 1л холодной воды и через 1...2 минуты измерить ее температуру T_1
2. Включить чайник и довести воду до кипения T_2 за время t_1
3. Выключить нагреватель и через время $t = 3$ мин измерить температуру воды T
4. Рассчитать мощность потерь по полученной формуле и определить по полученным данным к.п.д. чайника.

Определение теплоемкости чайника.

1. Измерить температуру T_1 горячей воды в чайнике (можно использовать воду предыдущего опыта или вскипятить новую и немного охладить ее)
2. Залить холодную воду в мерный стакан до объема 1л и измерить ее температуру T_2 .
3. Вылить горячую воду из чайника и сразу же залить холодную из мерного стакана.
4. Подождать 2...3 минуты и измерить температуру воды в чайнике T_3 .
5. Рассчитать теплоемкость чайника по формуле $C = C_w \cdot \frac{(T_3 - T_2)}{(T_1 - T_3)}$ (получить самостоятельно).

Примечание: Все манипуляции с горячей и холодной водой необходимо произвести предельно быстро, чтобы измеренные значения температур горячего чайника T_1 , температура холодной воды T_2 и чайника после нагревания залитой холодной воды T_3 , не успели существенно измениться

6. Произвести не менее трех серий измерения теплоемкости, каждый раз начиная с других значений начальной температуры горячего чайника.

Литература

1. Сивухин Д.В. Общий курс физики. Т.2. Термодинамика и молекулярная физика. М.: Наука. 1989. §§ 4...8, 97.
2. Матвеев А.Н. Молекулярная физика. М.: Высшая школа. 1981. §§ 50, 52.

Упражнение 5.

Определение удельной теплоты парообразования воды.

Количество теплоты, необходимое для превращения массы воды M в пар при температуре кипения за время t рассчитывается по формуле: $(W_0 - W') \cdot t = r \cdot M$, где r – удельная теплота парообразования воды. Масса выкипевшей воды M определяется по измерениям объемов воды в чайнике до и после ее частичного выкипания:

$$M = \rho \cdot (V_0 - V_1),$$

где объем оставшейся воды V_1 определяется с учетом объемного расширения:

$$V_1 \approx V_{хол} [1 + \beta \cdot (T - T_{хол})] \quad (\text{получите эту формулу самостоятельно}),$$

где $\beta = 0,208 \cdot 10^{-3} \text{ C}^{-1}$ (при комнатной температуре) – коэффициент объемного расширения.

1. Налить в чайник V_0 воды с помощью мерного стакана, измерить ее температуру $T_{хол}$, и довести ее до кипения.
2. Кипятить воду в чайнике в течение времени $t = 4 \text{ мин}$, обеспечив ее частичное выкипание.
3. Выключить чайник и тщательно слить оставшуюся воду в мерный стакан.
4. Дать этой воде остыть до температуры T , после чего измерить ее объем V_1 .
5. По представленным формулам вычислить значение удельной теплоты парообразования воды r . Для сравнения: табличное значение $r = 2,26 \cdot 10^5 \text{ Дж/кг}$
6. Оцените относительную погрешность полученных результатов, учитывая не только точности проводимых измерений, но и точность метода, например, при выводе формулы для объема V_1 .

Литература

1. Сивухин Д.В. Общий курс физики. Т.2. Термодинамика и молекулярная физика. М.: Наука. 1989. §§ 4...8, 97.
2. Матвеев А.Н. Молекулярная физика. М.: Высшая школа. 1981. §§ 50, 52.
3. Ландау Л.Д., Ахиезер А.И., Лифшиц Е.М. Курс общей физики. М.: Наука. 1969. §§ 109, 112, 113.

Упражнение 6.

Определение вязкости воздуха по истечению из капилляра.

Для измерения вязкости η часто используют формулу Пуазейля, которая определяет расход жидкости (объем в единицу времени) при ламинарном истечении через трубу диаметром d и длиной L при постоянной разности давлений $(P - P_0)$ на концах трубы:

$$q = \frac{\pi \cdot (P - P_0)}{128L \cdot \eta} \cdot d^4 \quad (1)$$

Вывод этой формулы общеизвестен (например, [1]). Применим формулу к прохождению воздуха из баллона с емкостью V_0 через капилляр. Тогда P – текущее давление в баллоне, P_0 – атмосферное давление. Главное препятствие непосредственного применения формулы состоит в том, что в результате вытекания газа давление в баллоне постоянно падает. Однако при изотермическом (медленном) расширении газа в результате истечения из баллона величину $\frac{dV}{dt} = q$ можно связать со скоростью изменения давления по

средством формулы $\frac{dP}{dt} = -\frac{P}{V} \cdot \frac{dV}{dt}$, полученной путем дифференцирования формулы газового состояния. Далее, учитывая, что измерение давления удобнее в будущем эксперименте, чем измерение объема, перепишем формулу Пуазейля

$$\frac{dP}{dt} = -\frac{\pi \cdot (P - P_0) \cdot d^4}{128L \cdot \eta} \cdot \frac{P}{V}$$

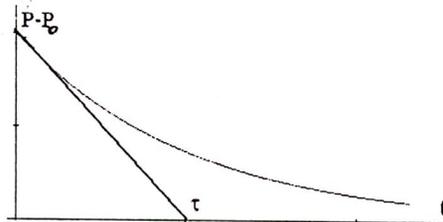
Ламинарное истечение газа из объема возможно лишь при небольших перепадах давления $(P - P_0)$ и достаточно большом значении начального объема V_0 , по сравнению с объемом, вытекающим за время наблюдения. Значит, в правой части полученного уравнения можно считать $V \approx V_0$ и $P = \langle P \rangle$ – давление, среднее за время измерения. Тогда получаем уравнение, удобное для экспериментального использования:

$$\frac{dP}{dt} = -\frac{(P - P_0)}{\tau}, \text{ где введено обозначение:}$$

$$\tau = \frac{128L \cdot \eta \cdot V_0}{\pi \cdot \langle P \rangle \cdot d^4}$$

Интегрирование дает экспоненциальную зависимость избыточного давления $(P - P_0)$ от времени истечения газа:

$$(P - P_0) = (P - P_0)_{нач} \cdot \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right)$$



Измеряя данную зависимость в эксперименте, можно определить значение постоянной времени τ , проводя подкастательную к графику (см. рис.), и уже по ней определить коэффициент вязкости.

1. С помощью шлангов подключить баллон с двумя штуцерами одним штуцером к груше-помпе, другим – к штуцеру Ш1 пневмосистемы.
2. К выходному концу пневмосистемы, через штуцер Ш2 подключить дополнительный шланг (длинный!) с дросселем на конце. Дроссель аккуратно (капилляр!) вставляется в конец шланга на 10–15 мм капилляром внутрь шланга.
3. Перекрыть кран К1.
4. Грушей накачать в баллон воздух до избыточного давления не превышающего 250 мм.рт.ст, после чего перекрыть шланг со стороны груши зажимом.
5. через 1...2 мин измерить установившееся в объеме "баллон-пневмосистема" начальное избыточное давление.

5. Приготовиться к записи значений избыточного давления по манометру от текущего времени, измеряемого секундомером. Особенно точными должны быть измерения в самом начале кривой (см. рис)!

ΔP , мм.рт.ст.	ΔP , Па.	$\ln \Delta P$	t, мин, с	t, с
Серия при комнатной температуре				
...				
Значение τ			Значение η	
Серия при температуре воздуха 70°C				
...				

6. Открыть кран К1 и начать измерения при комнатной температуре, заканчивая при значении избыточного давления примерно вдвое меньшем начального..

7. Провести серии измерений не менее трех раз.

8. Провести далее аналогичные серии измерений, опустив шланг с дросселем в емкость с горячей водой (чайник) при трех фиксированных температурах, измеряемых с помощью термометра. При необходимости воду аккуратно подогревать. Следить за тем, чтобы газ из баллона выходил не в воду, а в воздух. Вместе с тем дроссель не должен остывать.

9. Нанести данные одной из серий эксперимента на график, аналогичный изображенному на рисунке.

10. Произвести измерения вязкости по построению подкасательной.

11. Перестроить измеренные данные в полулогарифмическом масштабе $\ln(P - P_0)$.

12. Построить все данные в новом масштабе и определить значения τ для каждой серии как коэффициенты наклона прямых, усредненных по каждой серии.

13. Сравнить результаты определения коэффициента вязкости двумя способами.

14. Получить таблицу значений коэффициента вязкости газа для различных температур.

Литература

1. Сивухин Д.В. Общий курс физики. Т.2. Термодинамика и молекулярная физика. М.: Наука. 1989. §§ 4...8, 97.
2. Матвеев А.Н. Молекулярная физика. М.: Высшая школа. 1981. §§ 50, 52.
3. Ландау Л.Д., Ахиезер А.И., Лифшиц Е.М. Курс общей физики. М.: Наука. 1969. §§ 109, 112, 113.