

Министерство образования и науки Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
Саратовский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского

## **Термодинамика**

Учебно-методическое пособие к лабораторным работам  
в интегрированном учебно-научном практикуме  
"Методика, технология и информационное обеспечение  
физического эксперимента"

## **ПРАКТИКУМ ПО МОЛЕКУЛЯРНОЙ ФИЗИКЕ И ТЕРМОДИНАМИКЕ**

Для студентов 1-го курса факультета нелинейных процессов

**Саратов 2012 г.**

Авторы-составители:

*Александр Александрович Князев*

Настоящее пособие предназначено для студентов, выполняющих работы по практикуму Молекулярная физика и термодинамика, выполняемого во втором семестре. Содержит характеристики лабораторных работ, порядок выполнения каждой работы и необходимые теоретические сведения. В конце каждой работы приводится список необходимой литературы. Пособие рассчитано на распространение электронным способом и поэтому скомпоновано таким образом, чтобы студенту при необходимости можно было распечатать весь материал, относящийся к каждой работе, просто выделив данную группу страниц.

Рекомендует к опубликовыванию в электронной библиотеке д.ф.-м.н, профессор Ю. П. Шараевский

Работа представлена в авторской редакции

**(Комплекс ЛКТ-9)**  
**Упражнение 5.**  
**Определение удельной теплоты парообразования воды.**

**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.

## Выполнение упражнения 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.

**Рис.1. Общий вид части комплекса, используемой в работах, описанных в данном методическом пособии.**

## **ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС ЛКТ-2**

### **Описание комплекса**



Работы физического практикума по темам курса "Молекулярная физика и термодинамика", описанные в данном методическом пособии, объединены темой изучения тепловых свойств жидкостей и твердых тел, включая изучение фазовых переходов первого рода. Все они выполняются на части (см. рис.1) лабораторного комплекса ЛКТ-2 в целом предназначенного для выполнения на нем около 20-ти различных упражнений.

Одна часть этого комплекса (каркас с электропитанием и ящиками, датчики температуры, соединительные кабели или провода, измерительная система и др.) является общей для всего комплекса и используется во всех работах.

Другая часть (баллоны с различными штуцерами, печь-термостат, резонатор, реометр, калориметр, принадлежности и проч.) – используется в других упражнениях.

**ПРИ ПОДГОТОВКЕ К ОТЧЕТУ ПЕРЕД ВЫПОЛНЕНИЕМ РАБОТ ПО КОНКРЕТНОЙ ТЕМЕ, ВАМ НЕОБХОДИМО:**

- 1) ИЗУЧИТЬ ТЕОРЕТИЧЕСКУЮ ЧАСТЬ ДАННОГО УПРАЖНЕНИЯ (описание явления, метод конкретного измерения, рабочая формула, представления о методике обработки результатов эксперимента);
- 2) ПОЗНАКОМИТЬСЯ С ИНСТРУКЦИЕЙ К ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЕ КОМПЛЕКСА;
- 3) ДЕТАЛЬНО (ПО ПУНКТАМ) ОСВОИТЬ РАБОТУ НА ТОЙ ЧАСТИ КОМПЛЕКСА, С СООТВЕТСТВУЮЩИМИ ПРИНАДЛЕЖНОСТЯМИ, КОТОРАЯ НЕОБХОДИМА ВАМ ДЛЯ ВЫПОЛНЕНИЯ **ДАННОГО УПРАЖНЕНИЯ** И КОТОРУЮ ВАМ ПРЕДСТОИТ ИСПОЛЬЗОВАТЬ.

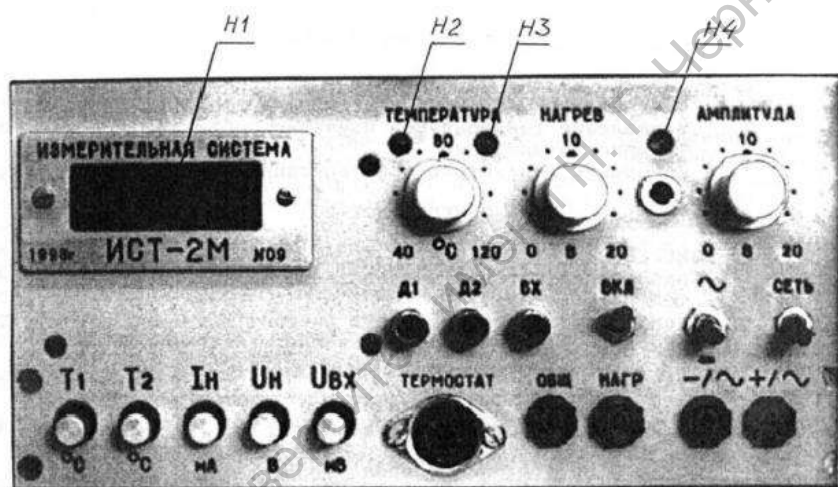
**Состояние остальной части комплекса изменять не следует.  
При возникновении неясностей в обращении с установкой  
приглашайте инженера лаборатории.**

## ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА

( центральная часть комплекса )

Рис.2. Передняя панель блока Измерительной системы ИСТ-2М.

Занимает одну секцию в нижнем этаже каркаса, над приборной секцией: с калькулятором и мультиметром. С помощью этого блока (см. рис 1 и.2) в данном комплексе осуществляются регулировки тепловых режимов нагревателей, включая термостатирование, а также индикация температуры при выполнении практически всех упражнений. Пользователю важно ориентироваться в назначении органов управления и элементов схемы, выведенных на переднюю панель измерительной системы. Ниже приводится описание работы измерительной системы в соответствии с осуществляемыми функциями.



### 1. Включение питания, считывание показаний при измерениях

"СЕТЬ" – тумблер включения напряжения сети.

**Н1**- Четырехразрядный цифровой индикатор. Он начинает светиться при включении сетевого питания (одновременно загорается одна из зеленых лампочек на панели). По умолчанию на индикаторе высвечивается "-001". В дальнейшем показания индикатора могут быть различными, в зависимости от нажатия **ОДНОЙ ИЗ ПЯТИ КНОПОК НИЖНЕГО РЯДА**:

**Т1** и **Т2** – при нажатии этих кнопок происходит измерение (в градусах Цельсия) температуры одного из диодных датчиков<sup>1</sup>, которые используются в различных упражнениях (см. описания к упражнениям).

<sup>1</sup> Устройство датчика основано на том, что сопротивление полупроводникового диода (используются диоды типа КД552) существенно зависит от температуры. В данной измерительной системе через диод, вмонтированный в необходимом месте (например, вблизи нагревателя), пропускается постоянный ток ( $1,00 \pm 0,01 \text{ mA}$ ), задаваемый блоком электроники (расположен внутри измерительной системы). Во время нажатия кнопки происходит измерение падения напряжения на диоде (около  $500 \div 700 \text{ mV}$ ), пропорциональное сопротивлению, которое пересчитывается процессором измерительной системы в значение температуры, оцифровывается и подается на индикатор (разрешение измерителя  $0,1^\circ\text{C}$ )

$I_n$  и  $U_n$  – при нажатии этих кнопок измеряется ток и напряжение питания встроенного нагревателя (мА, В). Такие измерения необходимы для определения мощности нагревателя. Независимое измерение можно провести, воспользовавшись гнездами "НАГР" и "ОБЩ" (отводы, параллельные отводам на разъем "ТЕРМОСТАТ").

$U_{вх}$  – при нажатии этой кнопки измеряется напряжение, поданное на разъем "ВХ" от, встроенного в корпус измерительной системы, изолированного источника напряжения (см. дальше) или любого другого внешнего источника. (измерительная система выполняет при этом функцию милливольтметра, измеряя постоянное напряжение или действующее значение переменного напряжения с разрешением 1мВ и пределом измерения 2В)

## 2. Работа нагревателей

"ВКЛ" – тумблер включения регулируемого встроенного блока питания нагревателей. Светится индикатор Н2 (зеленый). Чтобы подвести напряжение к какому-либо из нагревателей, необходимо воспользоваться 7-ми штырьковыми (магнитофонными) разъемами, соединив их соответствующим кабелем из набора. Один из разъемов – от встроенного блока питания - находится на лицевой панели измерительной системы и помечен словом "ТЕРМОСТАТ". Другой разъем расположен на соответствующем блоке комплекса, который необходим для выполнения упражнения с нагревателем. Одновременно с напряжением от нагревателя по этому же кабелю подается напряжение для питания вентилятора. Для охлаждения печи после выполнения измерений можно включить вентилятор тумблером "ВЕНТИЛЯТОР" на соответствующем блоке.

"НАГРЕВ" – регулятор напряжения ( $0 \div 20В$ ) встроенного блока питания нагревателей. Нанесенные риски можно использовать только для ориентировки. Точное значение напряжения проверяйте по индикатору, нажав кнопку  $U_n$ . Контроль температуры каждого нагревателя осуществляется датчиком Т1 или Т2. Каждый из них подключается к измерительной системе посредством одного из семи проводов в кабеле с магнитофонными разъемами (см. выше).

В тех упражнениях, где необходимо автоматически поддерживать постоянную температуру объекта используется датчик Т1. Термостатируемое значение ориентировочно устанавливается регулятором "ТЕМПЕРАТУРА" (+40...80...120 °С), а затем проверяется по индикатору (после нажатия кнопки Т1). Если температура превысит значение, установленное, то в дополнение к индикатору Н2 (зеленый) загорается индикатор Н3 (красный) и система переходит в РЕЖИМ ТЕРМОСТАТИРОВАНИЯ – при этом горят оба индикатора – зеленый и красный, а температура поддерживается на установленном уровне. При неисправности в системе термостатирования нагревание продолжается до срабатывания РЕЖИМА ЗАЩИТЫ (см. далее).

В других упражнениях используется датчик Т2 (он не подключен к системе термостатирования) и в этом случае нагревание продолжается до достижения температуры 130°С - до срабатывания РЕЖИМА ЗАЩИТЫ (см. далее).

## 3. Режим защиты

При достижении любым из подключенных к системе датчиков температуры 125÷130°С, или при коротком замыкании в цепи датчика, питание нагревателя автоматически выключается, загорается индикатор Н4(красный) и раздается ПРЕРЫВИСТЫЙ звуковой сигнал.

При перегрузке этого блока (т.е. при увеличении выходного тока выше номинального, например, при коротком замыкании в цепи нагревательного элемента) выходной ток блока автоматически сбрасывается до значения  $0,3A$ , загорается индикатор *H4(красный)* и раздается НЕПРЕРЫВНЫЙ звуковой сигнал.

Для отключения режима защиты нужно воспользоваться одним из следующих вариантов:

- отключить и вновь подключить (после устранения причины перегрузки) нагреватель тумблером "ВКЛ";
- снизить до нуля и вновь восстановить (после устранения причины перегрузки) напряжение питания регулятором "НАГРЕВ";
- выключить и вновь включить (после устранения причины перегрузки) сетевое питание.

### 3. Дополнительный (изолированный) источник напряжения

"-/~" и "+/~" – выходы источника. Для подачи напряжения на клеммы модуля 06 используйте соответствующий кабель со штекерами

**"ВХ"** – Через это гнездо дополнительный (изолированный) блок питания можно подключить к измерительной системе для измерения напряжения можно измерять измерительной системой после нажатия кнопки  $U_{ВХ}$ . В наборе принадлежностей имеется специальный разъем с центральным стержнем.

"+/~" – тумблер переключения вида выходного напряжения: постоянное (не более  $2В$ ) или переменное с частотой около  $1 кГц$ . В среднем положении тумблера источник выключен

"АМПЛИТУДА" – регулятор входного напряжения источника (измеряется при нажатой кнопке  $U_{ВХ}$ ).

### Термопара

В некоторых работах практикума для дополнительного измерения локальной температуры используется *термопара*, приводимая в непосредственный контакт с данной, конкретной точкой исследуемого тела. Действие термопары основано на термоэлектрическом эффекте<sup>2</sup>: известно, что в области контакта двух разнородных проводников возникает электрическое поле, уравнивающее диффузионные потоки электронов из металлов с различными коэффициентами диффузии. Работа этих электрических полей описывается величиной т.наз. контактной э.д.с. Нетрудно подсчитать, что если цепь замкнута и находится при одной температуре, то сумма контактных э.д.с. всех спаев оказывается равной нулю. Если же различные спаи металлов оказываются при разных температурах, то полной компенсации не возникает, поскольку коэффициенты диффузии для одного и того же металла зависят от температуры. Таким образом, в спае двух разнородных проводников возникает *контактная термоэлектродвижущая сила* (ТЭДС), примерно пропорциональная температуре спаея. Чаще всего приходится использовать не менее трех материалов: два — для электродов термопары и хотя бы один — для соединительных проводов и обмотки измерительного прибора. Обычно используют схему, показанную на рис.3. Так называемый "горячий" спай  $T$  приводят в контакт с испытуемым телом. Оба "холодных" спаея находятся при одинаковой и известной температуре  $T_0$ . Как показывает опыт, для изображенной схемы ТЭДС, в первом приближении, пропорциональна разности температур  $T$  и  $T_0$ :  $V=k(T - T_0)$ .

<sup>2</sup> Обнаружен в 1821г Зеебеком (Томас Иоганн Зеебек, нем, 1770-1831), а через год переоткрыт и объяснен Эрстедом (Ганс Христиан Эрстед, нем, 1777-1851).



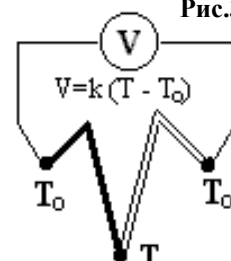


Рис.4. Печь-термостат

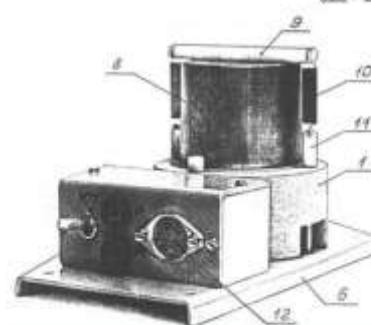
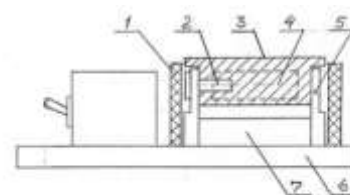
Обычно для каждой изготовленной термопары проводят самостоятельную градуировку и составляют график или таблицу. В некоторых случаях приводят готовое усредненное значение коэффициента  $k$  для рабочего интервала температур. Например, для широко используемой пары металлов "железо – константан"<sup>3</sup> величина ТЭДС. составляет около  $5\text{ мВ}$  на каждые  $100\text{ }^\circ\text{C}$  разности температур спаев. В данной работе роль холодных спаев выполняют контакты проводов термопары с клеммами измерительного прибора (или потенциометра), которые имеют комнатную температуру. Определение температуры сводится к непосредственному отсчету температуры - по соответствующей шкале многоцелевого прибора мультиметра - в комплекте установки. При отсутствии мультиметра измеряют ТЭДС по шкале милливольтметра и комнатную температуру  $T_0$  – обычным термометром. Далее, по измеренному значению ТЭДС и градуировочному графику определяют  $(T - T_0)$  и, прибавив  $T_0$ , находят искомую температуру  $T$ .

### Нагреватели

В нескольких работах данного лабораторного практикума для нагревания жидкостей или металла используется печь-термостат (см. рис.), в которой исследуемое вещество помещается в тигель (массивная алюминиевая емкость). В основание печи 3, защищенной теплоизолирующим кожухом 1, встроены электронагревательные элементы 4 и датчик температуры 2, работающий в системе термостатирования. На плиту плотно, на глицериновой смазке, устанавливается тигель, который закрывается кожухом 8. Планка 9 прижимает кожух пружинами 10. Под нагревательными элементами расположен электрический вентилятор 7.

Питание нагревателей печи, вентилятора, измерение тока и напряжения нагревателей, а также контроль температуры осуществляются посредством блока измерительной системы. Соединение блока измерительной системы с печью происходит через гнездо 12 посредством кабеля с магнитофонными разъемами (См. описание измерительной системы).

Любой нагреватель характеризуется потребляемой мощностью и мощностью собственных потерь при передаче тепла нагреваемому телу. Поскольку часто в эксперименте нагреватель и нагреваемое тело представляют единую систему, то для правильной записи уравнений термодинамики необходимо знание теплоемкости собственно нагревателя. Первые две работы представляемые в данном методическом пособии содержат инструкции по измерению характеристик нагревателя используемого в лабораторном комплексе.



<sup>3</sup> Сплав 60% Cu, 40%Ni – название подчеркивает слабую зависимость удельного электрического сопротивления материала от температуры

### Упражнение 1

#### Определение значения величины мощности, теплоемкости и КПД нагревателя печи-термостата

**Цель работы:** Определение значений величин мощности, теплоемкости и КПД нагревателя печи-термостата методом двукратного нагрева.

В нескольких работах данного лабораторного практикума для нагревания жидкостей или металла используется печь-термостат (см. рис.), в которой исследуемое вещество помещается в тигель (массивная алюминиевая емкость). В основание печи 3, защищенной теплоизолирующим кожухом 1, встроены электронагревательные элементы 4 и датчик температуры 2, работающий в системе термостатирования. На плиту плотно, на глицериновой смазке, устанавливается тигель, который закрывается кожухом 8. Планка 9 прижимает кожух пружинами 10. Под нагревательными элементами расположен электрический вентилятор 7.

Питание нагревателей печи, вентилятора, измерение тока и напряжения нагревателей, а также контроль температуры осуществляются посредством блока измерительной системы. Соединение блока измерительной системы с печью происходит через гнездо 12 посредством кабеля с магнитофонными разъемами (См. описание измерительной системы).

Любой нагреватель характеризуется потребляемой мощностью и мощностью собственных потерь при передаче тепла нагреваемому телу. Поскольку часто в эксперименте нагреватель и нагреваемое тело представляют единую систему, то для правильной записи уравнений термодинамики необходимо знание теплоемкости собственно нагревателя. Первые две работы представляемые в данном методическом пособии содержат инструкции по измерению характеристик нагревателя используемого в лабораторном комплексе.

#### Принадлежности и оборудование.

**Печь-термостат в составе Лабораторного комплекса с Измерительной системой. Тигель (пустой); теплоизолирующий кожух; прижимная планка с пружинами; перчатка х/б; глицерин; спичка (чистая палочка); салфетка; кабель с магнитофонными разъемами для соединения разъема "термостат" с нагревателем; секундомер.**

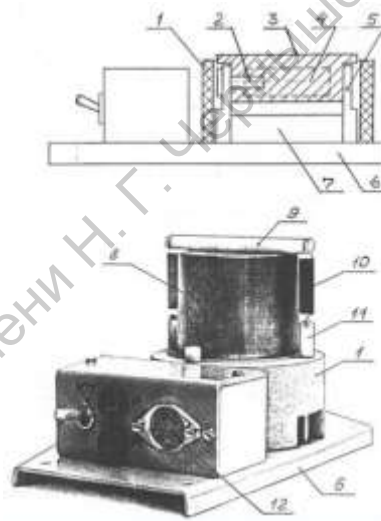
Метод измерения и суть эксперимента:

1. Определение мощности электрической печи-термостата.

Эта величина определяется по стандартной формуле:  $W = UI = U^2/R$

2. Определение теплоемкости нагревателя.

Используется метод двукратного нагрева, в котором измеряется зависимость температуры печи с пустым тиглем от времени с интервалом в 20 градусов при двух фиксированных мощностях нагрева. Полагая, что для одного и того же интервала температур



мощность потерь нагревателя с пустым тиглем  $W'$  одинакова в обеих процедурах, запишем соотношения баланса энергии:

$$W_1 - W' \Delta t_1 = c_0 \Delta T \quad \text{и} \quad W_2 - W' \Delta t_2 = c_0 \Delta T$$

где  $\Delta t_1$  и  $\Delta t_2$  – интервалы времени, за которые система проходит интервал температур  $\Delta T$  при первом и втором нагреве. Здесь  $c_0$  – теплоемкость нагревателя с пустым тиглем, значение которой определяется из записанных соотношений по формуле:

$$c_0 = \frac{W_2 - W_1}{\Delta T} \cdot \frac{\Delta t_1 \cdot \Delta t_2}{\Delta t_1 - \Delta t_2}$$

### 3. Определение КПД нагревателя.

В этом же эксперименте можно определить и значение мощности потерь нагревателя с пустым тиглем. Из тех же соотношений получаем:

$$W' = \frac{W_1 \cdot \Delta t_1 - W_2 \cdot \Delta t_2}{\Delta t_2 - \Delta t_1}$$

И тогда КПД нагревателя можно рассчитать как отношение величин мощности  $W''$ , затраченной на нагревание исследуемого вещества к мощности нагревателя  $W$ . В результате получаем формулу:

$$\eta = \frac{W''}{W} = \frac{W - W'}{W} = 1 - \frac{W'}{W}$$

Теперь, зная полученные значения характеристик нагревателя с пустым тиглем, их можно использовать в дальнейших экспериментах. Так, если в тигель поместить исследуемое вещество и провести цикл нагрева с мощностью  $W$ , то, нагреваясь на  $\Delta T$  за время  $\Delta t$ , содержимое тигля получит количество тепла:

$$Q = W - W' \Delta t - c_0 \Delta T$$

Иными словами, зная значение величины мощности и КПД нагревателя, можно определить мощность  $W''$ , затраченную на нагревание, пользуясь соотношением:

$$W'' = \eta \cdot W$$

**ВНИМАНИЕ!** Величина мощности потерь зависит от конфигурации установленных на плите объектов, поэтому полученные в этом эксперименте значения можно использовать только в опытах с данным тиглем (темы 03 и 04). Для определения значения величины мощности потерь при нагревании других тел, опыт следует повторить по той же методике.

**Подготовка к работе.** Примите меры по безопасности работы: проверьте начальное состояние установки, убедитесь в отсутствии оставшихся включений, температура печи должна быть комнатной. Соедините кабелем разъем "термостат" с разъемом нагревателя. Включите СЕТЬ (тумблер на измерительной панели - внизу справа).

**Особенности измерения.** Кнопки датчиков на измерительной панели, служат для измерения температуры, напряжения и тока в зависимости от нажатой клавиши внизу ( $T1$  – температура поверхности печи в градусах Цельсия,  $U_H$  – напряжение нагревателя в вольтах,  $I_H$  – ток в миллиамперах). В данной работе термостатическое равновесие устанавливать не нужно! Напротив, здесь требуется снимать значения параметров в процессе нагрева! Поэтому красная лампочка (см. описание Измерительной панели) не должна загораться!

**Порядок измерений.**

1. Определите начальную температуру системы. Для этого запишите показания датчика при нажатой клавише  $T1$ .
2. Подайте на нагреватель напряжение (регулятор "Нагрев") в пределах  $8...15В$ . Определите сопротивление печи  $R$ , используя формулу  $W = UI = U^2/R$ . Это необходимо, чтобы затем, используя то же соотношение, заранее задавать мощность нагрева, изменяя величину  $U$ .
3. Нанесите на плиту 2-3 капли глицерина для создания теплового контакта и установите на плиту пустой тигель. Наденьте на тигель теплоизолирующий кожух. Прижмите тигель к плите предназначенным для этого стержнем с пружинами. Регулятор "температура" установите на максимальное положение.
4. Установите напряжение системы (регулятор "Нагрев") на значении  $10...16В$ .
5. Приготовьтесь провести серию измерений: Для заданной мощности нагревателя, переключая указатели температуры  $T1$ , тока и напряжения, через каждые  $20$  градусов вам необходимо будет записывать значения времени, при которых система нагрелась до температур:  $20, 40, 60, 80$  и  $100$  градусов. Одновременно необходимо контролировать значения напряжения и тока в нагревателе, примерно в те же моменты времени. За ноль отсчета по временной шкале взять момент включения нагревателя.

**Внимание!** Процедура измерения параметров должна проводиться достаточно быстро!

1. Заготовьте таблицу по следующей форме:

*Упражнение 1. Определение значения величины мощности, теплоемкости и КПД нагревателя печи-термостата*

Измеренное сопротивление нагревателя в начале эксперимента  $R =$

Напряжение на нагревателе

$\Delta T$ , град	$\Delta t_1$ , с	$\Delta t_2$ , с	$U_1$ , В	$I_1$ , А	$W_1$ , Вт	$U_2$ , В	$I_2$ , мА	$W_2$ , Вт	$W'$ , Вт	$c_0 \dots$
20 → 40										
40 → 60										
60 → 80										
80 → 100										

1. Начинайте серию измерений.
2. Охладите систему, сняв тигель и используя вентилятор. Повторите измерения при другой выбранной мощности.
3. Постройте график зависимости мощности потерь и теплоемкости системы от температуры.

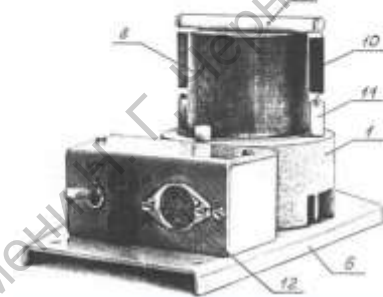
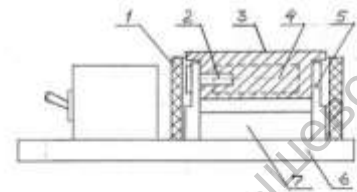
**Контрольные вопросы:**

1. Что называют мощностью электрического устройства и его КПД
2. В чем заключается метод двукратного нагревания?
3. Как работают датчики температуры в используемом вами устройстве?
4. Почему необходим контроль тока и напряжения в процессе нагревания? Укажите несколько причин.

## Упражнение 2

### Определение мощности потерь печи-термостата при стабилизированной температуре печи

**Нагреватели.** В нескольких работах данного лабораторного практикума для нагревания жидкостей или металла используется печь-термостат (см. рис.), в которой исследуемое вещество помещается в тигель (массивная алюминиевая емкость). В основание печи 3, защищенной теплоизолирующим кожухом 1, встроены электронагревательные элементы 4 и датчик температуры 2, работающий в системе термостатирования. На плиту плотно, на глицериновой смазке, устанавливается тигель, который закрывается кожухом 8. Планка 9 прижимает кожух пружинами 10. Под нагревательными элементами расположен электрический вентилятор 7.



Питание нагревателей печи, вентилятора, измерение тока и напряжения нагревателей, а также контроль температуры осуществляются посредством блока измерительной системы. Соединение блока измерительной системы с печью происходит через гнездо 12 посредством кабеля с магнитофонными разъемами (См. описание измерительной системы).

Любой нагреватель характеризуется потребляемой мощностью и мощностью собственных потерь при передаче тепла нагреваемому телу. Поскольку часто в эксперименте нагреватель и нагреваемое тело представляют единую систему, то для правильной записи уравнений термодинамики необходимо знание теплоемкости собственно нагревателя. Первые две работы представляемые в данном методическом пособии содержат инструкции по измерению характеристик нагревателя используемого в лабораторном комплексе.

**Цель работы:** определение мощности потерь нагревателя при стабилизированной температуре печи, с естественным и принудительным охлаждением

#### Принадлежности и оборудование.

*Печь-термостат в составе Лабораторного комплекса с Измерительной системой. Тигель (пустой); теплоизолирующий кожух; прижимная планка с пружинами; перчатка х/б; глицерин; спичка (чистая палочка); салфетка; кабель с магнитофонными разъемами для соединения разъема "термостат" с нагревателем; секундомер.*

Метод измерения и суть эксперимента:

**В рамках этой темы исследуется нагреватель печи-термостата. При этом измеряется зависимость установившейся мощности печи от температуры при естественном и принудительном охлаждении (последнее означает, что включен вентилятор). СТАБИЛИЗАЦИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ПЕЧИ ОЗНАЧАЕТ, ЧТО В ДАННОМ РЕЖИМЕ МОЩНОСТЬ НАГРЕВАТЕЛЯ РАВНА МОЩНОСТИ ПОТЕРЬ.**

**ВНИМАНИЕ!** Величина мощности потерь зависит от конфигурации установленных на плите объектов, поэтому полученные в этом эксперименте значения можно использовать только в опытах с данным тиглем (темы 01 и 02). Для определения

значения величины мощности потерь при нагревании других тел, опыт следует повторить по той же методике.

**Подготовка к работе.** Примите меры по безопасности работы: проверьте начальное состояние установки, убедитесь в отсутствии оставшихся включений, температура печи должна быть комнатной. Соедините кабелем разъем "термостат" с разъемом нагревателя. Включите СЕТЬ (тумблер на измерительной панели).

**Особенности измерения.** Датчик, расположенной на Измерительной панели, служит для измерения температуры, напряжения и тока в зависимости от нажатой клавиши внизу ( $T1$  – температура поверхности печи в градусах Цельсия,  $U_H$  - напряжение нагревателя в вольтах,  $I_H$  - ток в миллиамперах). Режиму термостатического равновесия отвечает одновременное свечение обеих лампочек (красной и зеленой), расположенных над регулятором "температура". При этом степень свечения лампочек в состоянии равновесия одинакова! Равновесие не наступает немедленно! Необходимо выждать около 2-3 минут для установления равномерного распределения температур!

**Порядок измерений.**

1. Определите начальную температуру системы. Для этого запишите показания датчика при нажатой клавише  $T1$ .
2. Подайте на нагреватель напряжение (регулятор "Нагрев") в пределах  $8...15В$ . Определите сопротивление печи  $R$ , используя формулу  $W = UI \equiv U^2 / R$ . Это необходимо, чтобы затем, используя то же соотношение, заранее задавать мощность нагрева, изменяя величину  $U$ .
3. Нанесите на плиту 2-3 капли глицерина для создания теплового контакта и установите на плиту пустой тигель. Наденьте на тигель теплоизолирующий кожух. Прижмите тигель к плите предназначенным для этого стержнем с пружинами. Регулятор "температура" установите на максимальное положение.
4. Приготовьтесь провести серию измерений: Для заданной мощности нагревателя, переключая указатели температуры  $T1$ , тока и напряжения, через каждые  $20$  градусов вам необходимо будет записывать значения времени, при которых система нагрелась до температур:  $20, 40, 60, 80$  и  $100$  градусов. Одновременно необходимо контролировать значения напряжения и тока в нагревателе, примерно в те же моменты времени. За ноль отсчета по временной шкале взять момент включения нагревателя.

**Внимание!** Процедура измерения параметров должна проводиться достаточно быстро!

5. Заготовьте таблицу по следующей форме:

*Упражнение 2. Определение мощности потерь печи-термостата при стабилизированной температуре печи (естественное и принудительное охлаждение)*

Напряжение нагрева				Начальная температура			
$T_1$	$U_1$	$I_1$	$W_1$	$T'$	$U'$	$I'$	$W'$
Без вентилятора				С вентилятором			

6. Установите напряжение системы (регулятор "Нагрев") на значении, соответствующем мощности в 20 Вт.

7. Регулятор "температура" установить на выбранное значение (с шагом примерно 20°C от начального до максимального).

**8. Дождитесь установления термодинамического равновесия. Затем подождите еще 2-3 минуты для установления распределения температур в теплоизоляторе.**

9. Измерить напряжение  $U_1$  и ток  $I_1$ , которые система термостатирования установила для поддержания заданной температуры. Найти мощность потерь  $W_1$ .

10. Включить вентилятор (рычажок "вент" на передней панели нагревателя).

11. Дождитесь установления новой температуры  $T'$ . Она будет ниже на 0,5-3 градуса. Снова определите мощность нагревателя  $W'$ , равную мощности потерь при принудительном охлаждении печи вентилятором.

12. Выключайте вентилятор. Переходите к следующему значению температуры (т.е. вернуться к пункту 7). Количество необходимых измерений – не менее четырех. Данные занесите в таблицу и постройте график зависимости мощности потерь системы от температуры.

### **Контрольные вопросы:**

1. Как определяется мощность электрического нагревателя и его КПД?
2. Как учитываются потери количества теплоты в данном эксперименте?
3. Как осуществляется термостатирование в печи-термостате?

## (Комплекс ЛКТ-2)

### Упражнение 3

#### Определение теплоемкости металлов

(перед выполнением этой работы

рекомендуется выполнить упражнения 1и 2 этого комплекса)

### ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ. ПАРАМЕТРЫ СОСТОЯНИЯ.

Термодинамика возникла как раздел физического учения о превращении теплоты в механическую работу, который исходит из небольшого числа общих законов, полученных экспериментально, и не базируется на определенной модели вещества. В зависимости от задач исследования термодинамику делят на физическую, химическую и техническую. Общие закономерности, которые имеют место при установлении теплового равновесия в системах взаимодействующих тел, составляют предмет изучения современной термодинамики. При этом системы тел обменивающихся при взаимодействиях количеством теплоты, между собой или с внешней средой, вне зависимости от конкретного устройства и содержания, получили название **термодинамических систем**. Всякое изменение, происходящее в термодинамической системе, называется **термодинамическим процессом**.

Говоря о **состоянии** термодинамической системы применительно к решению задачи, как правило, имеют в виду набор значений независимых переменных, которые определяют совокупность ее свойств. Термодинамическими **переменными** называются физические величины, изменяющиеся в термодинамическом процессе и количественно выражающие термодинамические свойства системы в каждом из состояний (температура, объем напряженность электрического поля и т.п.). В общем случае величина  $f_i$ , характеризующая данное термодинамическое свойство, зависит от пространственной координаты и времени  $f_i(r, t)$ . Если свойство постоянно в каждой точке системы (математически это означает равенство нулю частной производной по координате), но может изменяться во времени, то такое состояние называют **однородным**. В случае, когда термодинамическое свойство изменяется по координате, но не зависит от времени, состояние называется **стационарным**. И, наконец, если свойство не зависит ни от координаты, ни от времени, то такое состояние называется **равновесным**. Здесь везде речь, в основном, будет идти только о таких процессах, состояния которых можно считать равновесными. Система, которая не обменивается теплотой и работой с внешними телами всегда самопроизвольно приходит в состояние термодинамического равновесия.

Переменные, которые определяют термодинамические функции состояния, но значения которых фиксированы при рассмотрении конкретной задачи, называются **термодинамическими параметрами**. В работах данного цикла речь пойдет, в основном о параметрах, характеризующих **функции состояния** термодинамических процессов в твердых и жидких системах (внутренняя энергия, энтропия). Такими параметрами состояния могут быть в процессах нагревания - теплоемкости, в процессах фазовых переходов - температуры плавления, кипения, теплоты плавления (отвердевания), парообразования (конденсации).

#### Количество теплоты. Теплоемкости

Такие понятия как количество теплоты (или просто - теплоты), температура, внутренняя энергия и работа, относятся в термодинамике к первичным. Исследования<sup>4</sup> показав-

<sup>4</sup> Джеймс Прескотт Джоуль (1818 – 1889, англ.) - ок. 1843г под влиянием учителя Дж. Дальтона. Опыты были проведены как для электрических, так и для механических явлений.



ли, что теплота и работа могут измеряться одинаковыми единицами. В международной системе единиц (СИ) количество теплоты измеряется *Джоулями*<sup>5</sup> (Дж). В молекулярно-кинетической теории понятию количества теплоты соответствует работа, совершаемая на микроскопическом уровне силами взаимодействия атомов и молекул вещества. Если изолированному телу (системе), имеющему температуру  $T$ , сообщить количество теплоты  $\delta Q$ , то через некоторое время, необходимое для установления термодинамического равновесия, в системе может установиться новое значение температуры  $T+dT$ . В случаях, когда температура тела повышается (понижается), говорят о нагревании (охлаждении) тела<sup>6</sup>.

Величина отношения  $\delta Q/dT$  получила название теплоемкости<sup>7</sup> системы:  $c = \frac{dQ}{dT}$ . Численное значение теплоемкости соответствует количеству теплоты, необходимому для повышения температуры в данной системе на один градус.

В соответствии с записью первого начала термодинамики

$$\delta Q = dU + \Delta A,$$

теплоемкость определяется как элементарным изменением внутренней энергии системы  $dU$ , так и элементарной работой расширения  $\Delta A$  (например, изменением объема)

$C = \frac{dU + \Delta A}{dT}$ . Часто величину теплоемкости  $C$  рассчитывают на единицу массы тела или на число молей вещества. В этих случаях говорят об **УДЕЛЬНОЙ** ( $c_{уд}$ ) или о **МОЛЯРНОЙ** ( $C_{мол}$ ) теплоемкостях<sup>8</sup>. Между последними величинами имеется очевидная связь:

$$\tilde{n}_{\text{мол}} = \frac{\tilde{N}_{\text{мол}}}{M}, \text{ здесь } M - \text{ молярная масса вещества}$$

В единицах СИ удельная и молярная теплоемкости измеряются в *Дж/кг·К* и *Дж/моль·К*, соответственно.

Например, удельная теплоемкость льда составляет  $c=2100$  Дж/кг·К,

а молярная ( $M=0,018$  кг/моль)  $C = M \cdot c \approx 38$  Дж/моль·К. Тогда как теплоемкость куска льда массой 2 кг (около 111 моль) примерно равна 4200 Дж/К

Основой оценок численного значения теплоемкости в классической теории, вполне справедливой при умеренных температурах, служит гипотеза Больцмана о равномерном распределении внутренней энергии молекулы по степеням свободы, согласно с которой энергия, приходящаяся на одну степень свободы любого из независимых движений равна  $kT/2$ . Тогда полная внутренняя энергия системы молекул определится как:

$$U = i kT/2,$$

<sup>5</sup> Полезно помнить, что  $4,19$  Дж = 1 кал. Калория – внесистемная единица измерения, которая использовалась ранее для количества теплоты. Существуют Малая калория (калория) и Большая калория (килокалория). Иногда, в рекламных целях, приставки опускаются и тогда, например, применительно к калорийности продуктов, возникают разночтения в русской, европейской и американской рекламных кампаниях. Так, например, калорийность таблетки известного препарата "Тик-так" в действительности измеряется большими калориями.

<sup>6</sup> Сообщение телу (системе тел) некоторого количества теплоты вовсе необязательно ведет к его нагреванию (например, см. далее о фазовых переходах). И наоборот, нагреть тело можно, не сообщая ему количества теплоты (например, сжимая газ, ударяя по гвоздю, при трении одного тела о другое).

<sup>7</sup> Термин "теплоемкость", как, впрочем, большинство терминов термодинамики, происходит от распространенного в XVII - XVIII веках представления о тепловых (и электрических) явлениях как о перетекании из одного тела в другое специальных жидкостей – тепловой и электрической. Подобные взгляды более соответствуют бытовому (интуитивным) представлениям, чем научным, развивающимся и требующим большей степени строгости и абстрагирования. Мы до сих пор порой говорим о том, как *тепло разливается по телу*.

<sup>8</sup> Обозначения для каждой из трех теплоемкостей строго не установлены, поэтому при решении конкретных задач следует руководствоваться текстом.

где  $i$  – для жестких молекул есть сумма числа поступательных ( $z_{\text{пост}}$ ), вращательных ( $z_{\text{вращ}}$ ) и удвоенного числа колебательных ( $z_{\text{кол}}$ ) степеней свободы

$$i = z_{\text{пост}} + z_{\text{вращ}} + 2 z_{\text{кол}},$$

а значение  $z_{\text{кол}}$ , в свою очередь, определяется числом атомов в молекуле и ее конфигурацией (например, для линейной молекулы, вытянутой в цепочку  $z_{\text{кол}} = 3N - 5$ , а для объемной  $z_{\text{кол}} = 3N - 6$ ).

Видно, что знание теплоемкости вещества важно не только для термодинамических расчетов необходимого количества теплоты в процессе, но и для оценок молекулярного строения данного вещества и даже его агрегатного состояния.

Так, в газах процессы могут проходить как с изменением объема и давления, так и при фиксированных значениях того или иного параметра. В связи с этим каждому процессу соответствует свое значение теплоемкости. Среди прочих стандартно говорят об изохорной  $C_V$  или об изобарной  $C_P$  теплоемкостях. Например, молярная теплоемкость любого идеального одноатомного газа в изохорном процессе равна  $3R/2$ , это составляет около  $12,5$  Дж/моль·град. В изобарном процессе та же молярная теплоемкость равна уже  $3R/2 + R \approx 21$  Дж/моль·град. Для процессов, близких к изотермическому, теплоемкость достигает очень больших значений, теоретически устремляясь к бесконечности ( $\Delta T \rightarrow 0$ ). Добавим, что такой параметр состояния, как теплоемкость для многих процессов сам может изменяться с изменением переменных. Процессы, в течение которых теплоемкость остается постоянной, называют политропическими. Изохорный, изотермический, изобарный, адиабатический процессы – политропические.

Говоря о теплоемкости твердых тел и жидкостей зависимостью теплоемкости от изменения объема, как правило, пренебрегают и учитывают только изохорную теплоемкость  $C_V$ . Действительно, у твердых тел и жидкостей изменение объема при нагревании (охлаждении) относительно невелико и составляет величины от  $0,001$  до  $1$  %/град. Даже при плавлении относительное изменение объема  $\Delta V/V$  для большинства веществ не превышает  $\pm 10\%$ .

Известен эмпирически установленный в 1819г закон Дюлонга и Пти<sup>9</sup>, согласно которому

**МОЛЯРНЫЕ ТЕПЛОЕМКОСТИ ПРАКТИЧЕСКИ ОДИНАКОВЫ ДЛЯ ВСЕХ ЧИСТЫХ МЕТАЛЛОВ**, слабо зависят от температуры и приближенно равны  $26,8$  Дж/моль·К, что составляет около  $3R$ .

Это вдвое больше молярной изохорной теплоемкости идеального одноатомного газа. Достаточно, значит, перевести вещество из газообразного состояния в твердое, чтобы его молярная теплоемкость удвоилась. Из сказанного выше ясно, что удвоение теплоемкости происходит потому, что при нагревании твердого тела подводимая теплота расходуется на увеличение не только кинетической, но и потенциальной энергии частиц.

#### Теоретические основания для закона Дюлонга-Пти

В классической молекулярно-кинетической теории этот закон нашел определенное подтверждение. Твердое тело в ней рассматривается как совокупность частиц-осцилляторов, колеблющихся в узлах кристаллической решетки. При подводе тепла к телу оно расходуется на увеличение энергии колебаний осцил-

<sup>9</sup> Дюлонг Пьер Луи (1785 - 1838) – французский физик и химик – Парижский университет, Парижская политехническая школа. Пти Алексис Терез (1791 - 1820) - Парижская политехническая школа.

ляторов, которая складывается из кинетической и потенциальной энергии. Если колебания гармонические, обе эти части полной энергии равны друг другу.

Далее, каждое колебание можно разложить на три составляющие по осям координат, и энергия каждой составляющей также выражается суммой равных друг другу потенциальной и кинетической энергии. Учитывая гипотезу о равномерном распределении, получаем, что полная энергия, приходящаяся на одну степень свободы осциллятора, равна  $2 \times kT/2 = kT$ .

Так как каждый атом (осциллятор) обладает тремя степенями свободы, и если принять, как это мы делали в теории идеальных газов, что на каждую степень свободы приходится одна и та же кинетическая энергия  $kT/2$ , то полная энергия одного атома твердого тела равна

$$3 \times 2 \times kT/2 = 3 kT$$

Если твердое тело содержит  $N$  атомов, то его внутренняя энергия равна  $3 \times NkT$ . Тогда внутренняя энергия одного моля может быть рассчитана как:

$$U = 3N_0kT = 3 RT,$$

где  $N_0$  — число Авогадро.

При подводе тепла в условиях постоянного объема все тепло уходит на увеличение внутренней энергии. Поэтому атомная теплоемкость при постоянном объеме определяется равенством  $C_v = \left( \frac{dU}{dT} \right)_v = 3R$

К сплавам, жидкостям и аморфным веществам закон Дюлонга-Пти неприменим: например, для воды молярная теплоемкость равна примерно  $74 \text{ Дж/моль} \cdot \text{К}$ . Во-первых, это больше, чем  $3R$ , во вторых теплоемкость жидкостей немонотонно зависит от температуры и от давления, чем это проявляется у твердых тел.

Зависимости удельных теплоемкостей от температуры для некоторых веществ<sup>10</sup>

Вещество	-200 °C	-100 °C	0 °C	40 °C	100 °C	200 °C	300 °C
Воздух при атм. давлении	-	999	1006	1010	1015	1023	1080
Медь	170	340	380	-	390	410	450
Серебро	160	220	230	-	250	-	260
Стекло кварцевое	180	490	700	-	830	-	1020
Вода при атм. давлении	-	-	4214	4173	4223	-	-
Спирт этиловый при 10 атм.	-	1500	2200	2800	3280	-	-
Спирт этиловый при 60 атм.	-	1500	2170	2700	3210	4570	-

Квантовая теория, пришедшая на смену классической физике в начале XX-го века, подтвердила, что закон Дюлонга-Пти действительно может выполняться в достаточно широком диапазоне температур.

<sup>10</sup> Значения теплоемкостей приведены в единицах СИ, то есть в единицах Дж/кг·град

Однако, начиная с определенного, индивидуального для каждого вещества, значения – так называемой температуры Дебая

$$\theta = h \nu_m / k$$

( $h$  – универсальная постоянная Планка, равная  $6,67 \cdot 10^{-34}$  Дж•сек.) теплоемкость твердых тел уменьшается пропорционально кубу температуры и стремится к нулю при абсолютном нуле.

Так, для алмаза температура Дебая равна  $2000^\circ\text{C}$ , для серебра  $\sim 210^\circ\text{C}$ , для алюминия  $\sim 400^\circ\text{C}$ , а для свинца отклонения от закона Дюлонга и Пти начинаются уже с  $90^\circ\text{C}$ .

Для практического определения удельной теплоемкости тела в любом агрегатном состоянии вполне пригодно соотношение:  $\delta Q = cm(T_2 - T_1)$ .

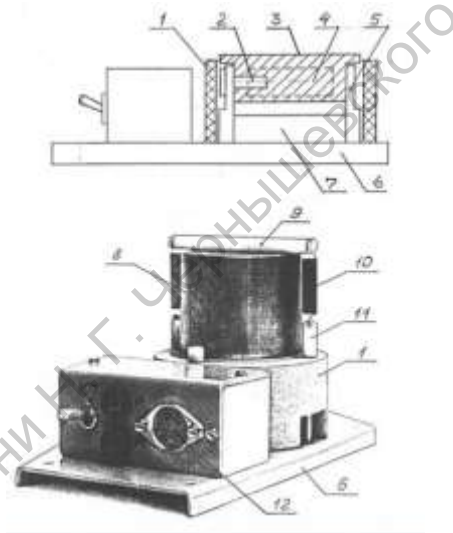
Здесь  $m$  – масса нагреваемого вещества,  $c$  – его удельная теплоемкость. Это соотношение является основным в экспериментах данного практикума.

Цель работы: **используя печь-термостат, определить удельную теплоемкость металлов (алюминий, сталь, латунь).**

Принадлежности и оборудование.

*Печь-термостат в составе Лабораторного комплекса ЛКТ-2 с Измерительной системой. Образцы металлов (цилиндры); теплоизолирующий кожух; прижимная планка с пружинами; перчатка х/б; глицерин; спичка (чистая палочка); салфетка; кабель с магнитофонными разъемами для соединения разъема "термостат" с нагревателем; секундомер.*

**Печь-термостат (нагреватель).** В данной работе для нагревания используется печь-термостат (см. рис.), в которой исследуемое вещество помещается в тигель (массивная алюминиевая емкость). В основание печи 3, защищенной теплоизолирующим кожухом 1, встроены электронагревательные элементы 4 и датчик температуры 2, работающий в системе термостатирования. На плиту плотно, на глицериновой смазке, устанавливается образец, который закрывается кожухом 8. Планка 9 прижимает кожух пружинами 10. Под нагревательными элементами расположен электрический вентилятор 7.



Питание нагревателей печи, вентилятора, измерение тока и напряжения нагревателей, а также контроль температуры осуществляются посредством блока измерительной системы. Соединение блока измерительной системы с печью происходит через гнездо 12 посредством кабеля с магнитофонными разъемами (См. описание измерительной системы).

**Выполнение работы**

В рамках этой работы определяется теплоемкость металлов, образцы которых цилиндрической формы имеются в лабораторном наборе.

Вначале определяется теплоемкость  $c$  печи вместе с образцом

$$C = (U_i I_i - W') \frac{\Delta t}{\Delta T}$$

где  $U_H$  - напряжение нагревателя,  $I_H$  - ток нагревателя;

$\Delta t$  и  $\Delta T$  - время нагрева и интервал температур образца на этом промежутке времени;

$W'$  - мощность потерь печи. Это значение берется по данным работы "упр. 2". Рекомендуется использовать построенные графики зависимости мощности потерь от температуры и определять  $W'$  в середине рассматриваемого диапазона температур  $\Delta T$ .

Далее определяется теплоемкость образца

$$c_1 = c - c_0.$$

Здесь  $c_0$  – величина теплоемкости нагревателя с пустым тиглем, значение которой определяется предварительно в работе "ЛКТ-2 упр.1"

После определения теплоемкости нагреваемого образца удельная теплоемкость вещества образца определяется как

$$C = c/m,$$

где  $m$  - масса образца (указана в таблице ниже).

**Особенности измерения.** Датчик, расположенной внизу панели, служит для измерения температуры, напряжения и тока в зависимости от нажатой клавиши внизу (Т1 – температура поверхности печи в градусах Цельсия,  $U_H$  - напряжение нагревателя в вольтах,  $I_H$  - ток в миллиамперах).

**Внимание!** В данной работе термостатическое равновесие не нужно! Напротив, здесь требуется снимать значения параметров в процессе нагрева! Поэтому красная лампочка не должна загораться!

### Порядок измерений.

1. Определите начальную температуру системы. Это – комнатная температура. Для этого снимите показания датчика при нажатой клавише Т1.
2. Нанесите на плиту 2-3 капли глицерина для теплового контакта. Установите на плиту образец (цилиндр). Наденьте на него теплоизолирующий кожух. Прижмите систему к плите стержнем с пружинами.
3. Установите напряжение нагревателя в пределах *14-18 В*
4. Регулятор "ТЕМПЕРАТУРА" установите на максимальное значение.
5. Выставьте секундомер на нулевое значение;
6. Заготовьте лист протокола измерений

*Упражнение 3. Определение удельной теплоемкости металлов*

*Начальное напряжение:                      Начальный ток:                      Мощность*

*Полное время измерений: Час- мин- сек*

<i>Температура</i>	<i>Мин. –сек.</i>	<i>U, В</i>	<i>I, mA</i>	<i>c</i>	
<i>Нач.</i>					
<i>20</i>	<i>10-20</i>				
<i>30</i>	<i>10-45</i>				
<i>40</i>	<i>...</i>	<i>18.5</i>	<i>1980</i>		
<i>...</i>					

*(цифры в графах таблицы – для примера!)*

1. Включите нагреватель. Через каждые 20 градусов записывайте соответствующие значения времени (при котором система нагрелась до указанной температуры – рекомендуется заранее разметить в таблице записей круглые значения: 20, 40, 60, 80 и 100 градусов). Напряжение и ток в нагревателе измеряйте в тот же момент времени. За ноль отсчета времени возьмите момент включения нагревателя.

**Процедура измерения параметров должна проводиться достаточно быстро!**

1. Определите удельную теплоемкость, сравните с табличными данными.
2. Выключите печь, аккуратно снимите образец с нагревателя.

**Внимание!** Образец в кожухе горячий! Чтобы снять его с печи, вначале сдвиньте образец, и только после отделите от поверхности нагревателя.

9. Охладите печь. Для ускорения этой процедуры поставьте на печь тигель с холодной водой и включите вентилятор. Воду смените несколько раз. Печь должна быть охлаждена до комнатной температуры.

10. Эксперимент проведите для трех различных металлов: алюминия, стали и латуни. Для этого повторите пункты 2-9.

Таблица масс образцов и табличных значений

удельной теплоемкости используемых материалов

Металл	Масса	Удельная теплоемкость (табличн.)
<i>Алюминий</i>	<i>194г</i>	<i>0.88 Дж/г·К</i>
<i>Латунь</i>	<i>566г</i>	<i>0.38 Дж/г·К</i>
<i>Сталь</i>	<i>546г</i>	<i>0.46 ± 0.50 Дж/г·К</i>

**Контрольные вопросы:**

1. Что такое теплоемкость тела? В каких единицах она измеряется?
2. Как определяются мощность потерь и собственная теплоемкость печи в эксперименте, необходимом для выполнения этой работы?
3. Как работает датчик температуры в используемом вами устройстве?

**Литература**

1. А.Н. Матвеев Молекулярная физика. М.: Высшая школа, 1981г. § 23,31,35.
1. И. Е. Иродов. Физика макросистем. Основные законы. – 2-е изд., дополн. - М. Лаборатория Базовых Знаний, 2001. Гл.1.
2. Д.В. Сивухин. Термодинамика и молекулярная физика. М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит. (Общий курс физики. т.П.) – любой год издания. Гл. X.
3. Л.Р. Стоцкий. Физические величины и их единицы: Справ. кн. для учителя. – М.: Просвещение, 1984. Гл.1.

**(Комплекс ЛКТ-2)**  
**Упражнение 4**  
**Определение теплоемкости**  
**и теплоты парообразования жидкости**  
(перед выполнением этой работы рекомендуется  
выполнить упражнения 1 и 2 этого комплекса)

**ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ. ПАРАМЕТРЫ СОСТОЯНИЯ.**

Термодинамика возникла как раздел физического учения о превращении теплоты в механическую работу, который исходит из небольшого числа общих законов, полученных экспериментально, и не базируется на определенной модели вещества. В зависимости от задач исследования термодинамику делят на физическую, химическую и техническую. Общие закономерности, которые имеют место при установлении теплового равновесия в системах взаимодействующих тел, составляют предмет изучения современной термодинамики. При этом системы тел обменивающихся при взаимодействии количеством теплоты, между собой или с внешней средой, вне зависимости от конкретного устройства и содержания, получили название **термодинамических систем**. Всякое изменение, происходящее в термодинамической системе, называется **термодинамическим процессом**.

Говоря о **состоянии** термодинамической системы применительно к решению задачи, как правило, имеют в виду набор значений независимых переменных, которые определяют совокупность ее свойств. Термодинамическими **переменными** называются физические величины, изменяющиеся в термодинамическом процессе и количественно выражающие термодинамические свойства системы в каждом из состояний (температура, объем напряженность электрического поля и т.п.). В общем случае величина  $f_i$ , характеризующая данное термодинамическое свойство, зависит от пространственной координаты и времени  $f_i(r, t)$ . Если свойство постоянно в каждой точке системы (математически это означает равенство нулю частной производной по координате), но может изменяться во времени, то такое состояние называют **однородным**. В случае, когда термодинамическое свойство изменяется по координате, но не зависит от времени, состояние называется **стационарным**. И, наконец, если свойство не зависит ни от координаты, ни от времени, то такое состояние называется **равновесным**. Здесь везде речь, в основном, будет идти только о таких процессах, состояния которых можно считать равновесными. Система, которая не обменивается теплотой и работой с внешними телами всегда самопроизвольно приходит в состояние термодинамического равновесия.

Переменные, которые определяют термодинамические функции состояния, но значения которых фиксированы при рассмотрении конкретной задачи, называются **термодинамическими параметрами**. В работах данного цикла речь пойдет, в основном о параметрах, характеризующих **функции состояния** термодинамических процессов в твердых и жидких системах (внутренняя энергия, энтропия). Такими параметрами состояния могут быть в процессах нагревания - теплоемкости, в процессах фазовых переходов - температуры плавления, кипения, теплоты плавления (отвердевания), парообразования (конденсации).

**Количество теплоты. Теплоемкости**

Такие понятия как количество теплоты (или просто - теплоты), температура, внутренняя энергия и работа, относятся в термодинамике к первичным. Исследования<sup>11</sup> показали, что теплота и работа могут измеряться одинаковыми единицами. В международной

---

<sup>11</sup> Джеймс Прескотт Джоуль (1818 – 1889, англ.) - ок. 1843г под влиянием учителя Дж. Дальтона. Опыты были проведены как для электрических, так и для механических явлений.



системе единиц (СИ) количество теплоты измеряется *Джоулями*<sup>12</sup> (*Дж*). В молекулярно-кинетической теории понятию количества теплоты соответствует работа, совершаемая на микроскопическом уровне силами взаимодействия атомов и молекул вещества. Если изолированному телу (системе), имеющему температуру  $T$ , сообщить количество теплоты  $\delta Q$ , то через некоторое время, необходимое для установления термодинамического равновесия, в системе может установиться новое значение температуры  $T+dT$ . В случаях, когда температура тела повышается (понижается), говорят о нагревании (охлаждении) тела<sup>13</sup>.

Величина отношения  $\delta Q/dT$  получила название теплоемкости<sup>14</sup> системы:  $c = \frac{dQ}{dT}$ . Численное значение теплоемкости соответствует количеству теплоты, необходимому для повышения температуры в данной системе на один градус.

В соответствии с записью первого начала термодинамики

$$\delta Q = dU + \Delta A,$$

теплоемкость определяется как элементарным изменением внутренней энергии системы  $dU$ , так и элементарной работой расширения  $\delta A$  (например, изменением объема)

$C = \frac{dU + \Delta A}{dT}$ . Часто величину теплоемкости  $C$  рассчитывают на единицу массы тела или на число молей вещества. В этих случаях говорят об **УДЕЛЬНОЙ** ( $c_{уд}$ ) или о **МОЛЯРНОЙ** ( $C_{мол}$ ) теплоемкостях<sup>15</sup>. Между последними величинами имеется очевидная связь:

$$\tilde{n}_{\text{моль}} = \frac{\tilde{N}_{\text{моль}}}{M}, \text{ здесь } M - \text{ молярная масса вещества}$$

В единицах СИ удельная и молярная теплоемкости измеряются в *Дж/кг·К* и *Дж/моль·К*, соответственно.

Например, удельная теплоемкость льда составляет  $c=2100$  *Дж/кг·К*,

а молярная ( $M=0,018$  *кг/моль*)  $C \approx M \cdot c \approx 38$  *Дж/моль·К*. Тогда как теплоемкость куска льда массой 2 *кг* (около 111 *моль*) примерно равна 4200 *Дж/К*

Видно, что знание теплоемкости вещества важно не только для термодинамических расчетов необходимого количества теплоты в процессе, но и для оценок молекулярного строения данного вещества и даже его агрегатного состояния.

Так, в газах процессы могут проходить как с изменением объема и давления, так и при фиксированных значениях того или иного параметра. В связи с этим каждому процессу соответствует свое значение теплоемкости. Среди прочих стандартно говорят об изохорной  $C_V$  или об изобарной  $C_P$  теплоемкостях. Например, молярная теплоемкость любого идеального одноатомного газа в изохорном процессе равна  $3R/2$ , это составляет около 12,5

<sup>12</sup> Полезно помнить, что  $4,19$  *Дж* =  $1$  *кал*. Калория – внесистемная единица измерения, которая использовалась ранее для количества теплоты. Существуют Малая калория (калория) и Большая калория (килокалория). Иногда, в рекламных целях, приставки опускаются и тогда, например, применительно к калорийности продуктов, возникают разночтения в русской, европейской и американской рекламных кампаниях. Так, например, калорийность таблетки известного препарата "Тик-так" в действительности измеряется большими калориями.

<sup>13</sup> Сообщение телу (системе тел) некоторого количества теплоты вовсе необязательно ведет к его нагреванию (например, см. далее о фазовых переходах). И наоборот, нагреть тело можно, не сообщая ему количества теплоты (например, быстро сжав газ насосом).

<sup>14</sup> Термин "теплоемкость", как, впрочем, большинство терминов термодинамики, происходит от распространенного в XVII - XVIII веках представления о тепловых (и электрических) явлениях как о перетекании из одного тела в другое специальных жидкостей – тепловой и электрической. Подобные взгляды более соответствуют бытовым (интуитивным) представлениям, чем научные, развивающиеся и требующие большей степени строгости и абстрагирования. Мы до сих пор порой говорим о том, как *тепло разливается по телу*.

<sup>15</sup> Обозначения для каждой из трех теплоемкостей строго не установлены, поэтому при решении конкретных задач следует руководствоваться текстом.

Дж/моль·град. В изобарном процессе та же молярная теплоемкость равна уже  $3R/2 + R \approx 21$  Дж/моль·град. Для процессов, близких к изотермическому, теплоемкость достигает очень больших значений, теоретически устремляясь к бесконечности ( $\Delta T \rightarrow 0$ ). Добавим, что такой параметр состояния, как теплоемкость для многих процессов сам может изменяться с изменением переменных. Процессы, в течение которых теплоемкость остается постоянной, называют политропическими. Изохорный, изотермический, изобарный, адиабатический процессы – политропические.

Говоря о теплоемкости твердых тел и жидкостей зависимостью теплоемкости от изменения объема, как правило, пренебрегают и учитывают только изохорную теплоемкость  $C_V$ . Действительно, у твердых тел и жидкостей изменение объема при нагревании (охлаждении) относительно невелико и составляет величины от 0,001 до 1 %/град. Даже при плавлении относительное изменение объема  $\Delta V/V$  для большинства веществ не превышает  $\pm 10\%$ .

### ФАЗОВЫЕ ПЕРЕХОДЫ ПЕРВОГО РОДА

Процесс плавления и обратный ему – кристаллизация, процесс парообразования и обратный ему – конденсация, относятся к категории процессов, которые называются фазовыми переходами. Характерной особенностью таких процессов является скачкообразность превращения одного состояния вещества в другое<sup>16</sup>. Каждое из состояний называется **фазой**. В этом смысле различными фазами являются агрегатные состояния вещества: твердое, жидкое и газообразное. Понятие фаз, однако, является более широким, чем понятие **агрегатного состояния**: в пределах одного и того же агрегатного состояния могут существовать различные фазы. Например, мы говорим о существовании твердого, жидкого и газообразного агрегатного состояния воды, но, по крайней мере, о четырех фазах добавляя к ним паровую фазу<sup>17</sup>. Можно говорить о различных фазах твердой стали: аустенит, мартенсит, магнитная и немагнитная фазы. При этом необходимо подчеркнуть, что, говоря о твердом состоянии как об особой фазе вещества, мы имеем в виду не просто твердое, а именно кристаллическое состояние. Аморфное твердое тело превращается при нагревании в жидкость без всякого скачка - путем постепенного размягчения, то есть без фазового перехода, и поэтому аморфное состояние не представляет собой фазы вещества. Так, не являются различными фазами твердое и жидкое стекло или твердый и расплавленный асфальт.

Переход вещества из одной фазы в другую происходит (при заданном давлении) всегда при строго определенной температуре. Например, лед при атмосферном давлении начинает плавиться при 0 °С и при дальнейшем сообщении количества теплоты не происходит нагревания ни льда, ни образующейся воды - температура остается неизменной вплоть до момента, когда весь лед (в окрестности наблюдаемого объема) превратится в воду (речь, безусловно, идет о квазистатических процессах, к которым только и применимы представления равновесной термодинамики). В течение всего процесса фазового перехода обе фазы существуют при данной температуре одновременно, соприкасаясь друг с другом.

Фазовые превращения, сопровождающиеся поглощением или выделением количества теплоты и изменением объема данной массы вещества, называются фазовыми переходами первого рода. В течение процесса перехода говорить о теплоемкости, как правило, не имеет смысла – если приняты меры для исключения влияния процессов конвекции и теплопроводности (нагреваемая смесь перемешивается и т.п.), то температура не изменяется. Для оценки количества теплоты, расходуемого в процессе фазового перехода, ис-

<sup>16</sup> Особенность перехода из жидкого в твердое состояние будет отмечена в части " испарение и кипение ".

<sup>17</sup> Не считая нескольких фазовых состояний льда.

пользуют иную физическую величину. Обычно фазовые переходы совершаются при постоянном давлении, поэтому количество теплоты, сопровождающее протекание элементарного фазового перехода, можно вычислить как  $dQ = dU + p dV = d(U + pV) = dW$ , а на конечном участке как разность двух функций состояния  $W_2 = U_2 + pV_2$  и  $W_1 = U_1 + pV_1$ , каждая из которых называется тепловой функцией или **энтальпией**. Теплота, затраченная (или выделенная) при фазовом переходе называется **теплотой перехода** (устар. "скрытая теплота", "изотермическая теплота"). Обычно количество подведенной теплоты пропорционально количеству уже перешедшего в другую фазу вещества, поэтому, отнесенную к единице этой массы теплоту называют **удельной теплотой перехода**.

Так, говорят об удельных теплотах плавления  $\lambda = \frac{\delta Q}{dm}$  или парообразования  $r = \frac{\delta Q}{dm}$ , которые по порядку величины составляют  $10^5 \dots 10^6$  Дж/кг. Например, для воды удельная теплота плавления составляет  $0,33$  МДж/кг. Это означает, в частности, что при образовании  $1$  кг льда в окружающее пространство выделяется столько же тепла, сколько при сгорании примерно  $100$ г пороха или тротилла. Столько же поглощается при плавлении, например, из окружающего весеннего воздуха.

Приведенные здесь формулы можно использовать для непосредственного определения соответствующих параметров перехода. Кроме того, выявить факт состоявшегося фазового перехода первого рода можно, в числе прочих методов, по скачкообразному изменению теплоемкости вещества - за счет "включения" или, наоборот, "замораживания" отдельных степеней свободы молекул вещества.

Если при переходе теплота не выделяется или не поглощается, то фазовый переход относится ко второму роду. Примерами подобных переходов могут служить превращение парамагнетика в ферромагнетик при температуре точки Кюри или переход проводника в сверхпроводящее состояние.

### Испарение и кипение

Интересной особенностью процесса перехода вещества из жидкого в газообразное состояние – парообразования - является возможность протекания его двумя путями: не только скачкообразно, но и при любой температуре. Далее отметим особенности каждого из путей.

1. Процесс спокойного парообразования носит название испарения. Образующаяся фаза – пар. Здесь увеличение энергии вылетающих из жидкости молекул происходит за счет убыли энергии оставшихся частиц остающейся жидкости. Кроме того, необходимое количество энергии  $\delta Q = r \cdot dm$  поступает извне, в процессе теплообмена. При дальнейшем нагреве до так называемой критической температуры (для воды  $374,15^\circ\text{C}$ ) происходит следующий фазовый, теперь уже скачкообразный, переход в новое агрегатное состояние – газ.

2. Более интенсивный процесс парообразования, протекающий скачком, возникает при строго определенной температуре жидкости, которая определяется как веществом жидкости, так и давлением атмосферы другого газа над ее поверхностью. Этот процесс называется кипением (а температура – температурой кипения). В процессе кипения переход в паровую фазу происходит не только с поверхности, но во всем объеме нагретой жидкости. Необходимым условием для начала кипения является наличие во всем объеме жидкости пузырьков растворенного в ней газа атмосферы, образующихся при нагревании из-за падения растворимости газа в жидкости (процесс коалесценции). Таким образом, кипение жидкостей можно представить как процесс их испарения в объем пузырьков газа и выбро-

са этих пузырьков наружу, через свободную поверхность жидкости в условиях действия внешнего силового поля (например, гравитации).

Условие выхода пузырька радиусом  $R$  на поверхность жидкости в атмосферу с давлением  $p_0$  с глубины  $H$  можно записать как

$$p > p_0 + \rho g H + \frac{2\sigma}{R},$$

где  $\sigma$  - коэффициент поверхностного натяжения (для горячей воды около  $55 \text{ мН/м}$ ). Это условие означает, что температура начала кипения, строго говоря, различна на различных глубинах и говоря о температуре кипения, обычно имеют в виду температуру насыщенного пара над поверхностью кипящей жидкости.

#### Выполнение упражнения 4

##### Определение теплоемкости и теплоты парообразования жидкости

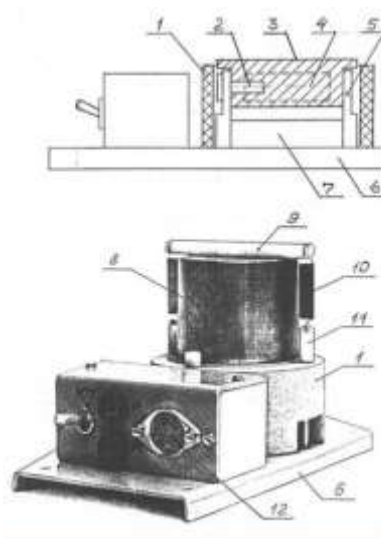
Принадлежности и оборудование.

*Печь-термостат в составе Лабораторного комплекса с Измерительной системой.*

*Тигель (пустой); теплоизолирующий кожух; прижимная планка с пружинами; мензурка; перчатка х/б; глицерин; спичка (чистая палочка); салфетка; кабель с магнитофонными разъемами для соединения разъема "термостат" с нагревателем; секундомер..*

**Нагреватели.** В нескольких работах данного лабораторного практикума для нагревания жидкостей или металла используется печь-термостат (см. рис.), в которой исследуемое вещество помещается в тигель (массивная алюминиевая емкость). В основание печи 3, защищенной теплоизолирующим кожухом 1, встроены электронагревательные элементы 4 и датчик температуры 2, работающий в системе термостатирования. На плиту плотно, на глицериновой смазке, устанавливается тигель, который закрывается кожухом 8. Планка 9 прижимает кожух пружинами 10. Под нагревательными элементами расположен электрический вентилятор 7.

Питание нагревателей печи, вентилятора, измерение тока и напряжения нагревателей, а также контроль температуры осуществляются посредством блока измерительной системы. Соединение блока измерительной системы с печью происходит через гнездо 12 посредством кабеля с магнитофонными разъемами (См. описание измерительной системы).



**Цель эксперимента:** прямое измерение двух параметров равновесной термодинамики: удельной теплоемкости и удельной теплоты парообразования жидкости (воды), нагреваемой в печи-термостате.

**Метод измерения и суть эксперимента:**

**Теплоемкость.** Для практического определения удельной теплоемкости системы в любом агрегатном состоянии вполне пригодно соотношение

$$\delta Q = cm(T_2 - T_1),$$

являющееся, по сути, определением этой величины. Здесь  $m$  – масса нагреваемого вещества. Оно служит основой опыта в данном упражнении.

Нальем в тигель  $m=30-40$  мл воды. Установим тигель на плите печи, установим постоянную мощность нагревателя и измерим зависимость температуры от времени, нагревая воду от комнатной температуры до температуры кипения. Для каждого участка полученной зависимости справедливо соотношение:

$$\Delta Q = (U_H I_H - W') \cdot \Delta t = C_0 \Delta T + c_s m \cdot \Delta T. \quad (1)$$

Здесь:  $(U_H I_H - W')$  – мощность нагревателя. Она равна разности между мощностью источника электроэнергии  $U_H I_H$  и мощностью  $W'$  – тепловых потерь печи в пространство. Измеряя напряжение  $U_H$  и ток  $I_H$  нагревателя, определим мощность источника в процессе проведения эксперимента. Мощность потерь определим по данным графика (см.) – он построен по результатам отдельного эксперимента. Однако, лучше воспользоваться графиком ваших измерений при выполнении упражнения (ЛКТ-2 упр1).

$C_0$  и  $c_s$  – теплоемкость печи с тиглем (по данным уже упомянутого эксперимента она равна  $130 \pm 20$  Дж/К) и искомая удельная теплоемкость воды

Когда зависимость температуры нагреваемой воды получена, то, как видно из формулы (1), теплоемкость воды  $c_s$  при заданной температуре можно определить по наклону кривой на соответствующем участке кривой.

**Удельная теплота парообразования.** В процессе парообразования (кипения) говорить о теплоемкости не имеет смысла – температура не изменяется. Для оценки количества теплоты, расходуемого в процессе кипения, используют величину  $r = \frac{\delta Q}{\Delta m}$ , которая называется

удельной теплотой парообразования (устаревшее название – скрытая теплота парообразования). Данное соотношение будет использовано в этой работе.

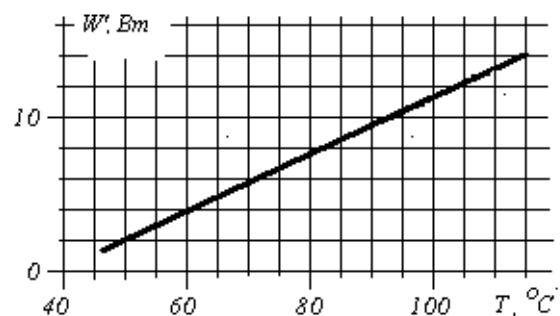
Для определения удельной теплоты парообразования продолжим нагревание постоянной мощностью. После достижения температуры кипения за время  $\Delta t$  выкипит часть воды массой  $\Delta m$ . Тогда удельная теплота парообразования определится из соотношения:

$$(UI - W') \cdot \Delta t = r \Delta m \quad (2)$$

**ДЛЯ УСПЕШНОГО ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА НЕ ПРОЯВЛЯЙТЕ ОПЕРЕЖАЮЩИХ ДЕЙСТВИЙ, ДЕЙСТВУЙТЕ СТРОГО ПО ПРИВОДИМОЙ НИЖЕ ИНСТРУКЦИИ, НЕ ПРОПУСКАЯ ПУНКТОВ!**

### Действия при проведении измерений

1. Прочтите описание измерительной системы и ознакомьтесь с краткими сведениями по изучаемому явлению. Если вы уже сделали это, переходите к пункту 2.



Мощность потерь печи в зависимости от температуры, встроенного датчика T1 вблизи нагревателя (график построен по результатам выполнения ЛКТ-2 упр 1")

Минимальное время проведения одной серии измерений – около 50-ти минут. Для проведения простейшей статистической обработки необходимы результаты не менее трех серий! Прежде, чем приступить к проведению очередной серии измерений убедитесь, что Вы располагаете необходимым временем!

2. Разметьте лист протокола измерений примерно так (около 25-ти строк):

Упражнение 4. Прямое измерение удельной теплоемкости и удельной теплоты парообразования жидкости (воды).

Начальная масса воды в тигле:

Начальное напряжение:                      Начальный ток:                      Мощность

Полное время измерений: Час- мин- сек

Температура	Мин. –сек.	U, В	I, mA	c	
Нач.					
20	10-20				
30	10-45				
40	...	18.5	1980		
...					
Начало кип.					
...					
Оконч. кип.					

(цифры в графах таблицы – для примера!)

3. Возьмите тигель из набора принадлежностей и, с помощью мензурки аккуратно налейте в него 30...40 г воды из емкости на окне лаборатории. Холодную воду из крана брать не следует – процесс выхода растворенного в воде газа (коалесценция) может повлиять на значение величины теплоемкости воды в первые минуты нагревания. Запишите в протокол измерений значение уровня по шкале мензурки и вычислите массу воды, считая плотность воды равной  $1\text{ г/см}^3$ .

4. Возьмите пузырек с глицерином, обмакните в него кончик спички. Нанесите две – три капли глицерина на поверхность плиты для теплового контакта.

5. Вденьте кончики пружин прижимной планки в отверстия стоек по бокам от плиты, плотно поставьте на плиту тигель с водой. Закройте тигель теплоизолирующим кожухом и прижмите кожух прижимной планкой.

6. Регулятор "ТЕМПЕРАТУРА" установите на значение, близкое к максимальному (чтобы избежать срабатывания системы стабилизации температуры), а регулятор "НАГРЕВ" - на значение около 20 В. В дальнейшем установленные значения будут уточнены измерением и занесены в протокол измерений.

7. Убедитесь что тумблеры "СЕТЬ" и "ВКЛ" на лицевой панели измерительной системы находятся в положении – вниз. Возьмите кабель с магнитофонными разъемами и соедините посредством него измерительную систему и печь-термостат. Убедитесь, что провод на задней стенке лабораторного комплекса ЛКТ-2 включен в сеть. Включите установку тумблером "Сеть" на передней панели измерительной системы. На наличие напряжения в сети укажут зеленая лампочка регулятора "ТЕМПЕРАТУРА" и четырехразрядный индикатор. Если все кнопки нижнего ряда отжаты, то показания индикатора будут "-001".

9. Нажмите кнопку T1 – считайте с индикатора и занесите в протокол значение начальной температуры системы. Оставьте кнопку зафиксированной в нажатом положении..

*Вам предстоит записать серию парных измерений "Температура - время". Значение температуры – на индикаторе, значения времени – на часах, установленных на одной из панелей комплекса. Учтите, что вначале изменения температуры будут происходить*

достаточно быстро – не отвлекайтесь при считывании показаний приборов и занесении данных в заготовленную таблицу протокола измерений.

10. Включите тумблер нагревателей печи "ВКЛ" и начинайте отсчеты. Пронаблюдайте процесс закипания через отверстие в кожухе. Воспользуйтесь зеркальцем и лампой (они есть у лаборанта).

11. После закипания кипятите воду 20 минут.

12. Как только процесс изменения температуры замедлится, нажмите кнопку  $U_H$  и занесите в протокол значение напряжения питания. Также считайте значение тока  $I_H$ . Затем в процессе нагревания проверяйте несколько раз эти значения по мере прогревания печи.

13. Выключите нагреватель. Включите вентилятор.

14. Рукой в перчатке (х/б) осторожно снимите и отведите в сторону от себя прижимную планку с пружинами, аккуратно, плавно сдвиньте тигель с места, нарушив плотный жидкостный глицериновый контакт. После этого отделите тигель от плиты и поставьте остывать на металлическую подставку рядом с установкой, сняв с тигля кожух.

**БУДЬТЕ ОСТОРОЖНЫ! ПОМНИТЕ,  
ЧТО В ТИГЛЕ - КИПЯТОК!**

15. Пока вода остывает, постройте график зависимости температуры от времени и продумайте ваши действия при вычислениях по рабочим формулам:

$$C = \frac{(U_h I_h - W') \cdot (\Delta t / \Delta T) - C_o}{m} \quad \text{и} \quad r = \frac{(U_h I_h - W') \cdot \Delta t}{\Delta m}$$

16. Слейте воду из тигля в протертую досуха мензурку и считайте по шкале новый уровень воды. Вычислите массу выкипевшей воды  $\Delta m$ , необходимую для второй формулы.

17. Вычислите хотя бы по одному значению теплоемкости и удельной теплоты парообразования, чтобы проверить правильность записей в ходе эксперимента.

18. Приготовьтесь к проведению новой серии измерений с новой порцией воды (не доливайте тигель – добавление воды, содержащей растворенный газ к уже кипяченой воде может изменить результаты)

19. По окончании работ, охладите печку, протрите ее и пустой тигель салфеткой. Восстановите порядок на рабочем месте.

19. Сделайте обработку результатов измерений. Вычислите средние значения, оцените погрешности. Сравните результаты с табличными значениями

#### **Контрольные вопросы:**

1. Численные значения каких физических величин Вы будете определять в предстоящем эксперименте? Каков смысл этих величин, и какие характерные значения они имеют?
2. Изменяется ли теплоемкость воды с температурой? Как это проверить в Вашем эксперименте?
3. В нашем лексиконе имеются термины: испарение, парообразование, кипение - в чем состоит их различие?
4. Часто утверждается, что температура жидкости не изменяется в процессе кипения. Почему? Ожидаете ли Вы наблюдать это в эксперименте?
5. Как учитываются потери энергии в данной методике измерений?

#### **Литература**

1. А.Н. Матвеев Молекулярная физика. М.: Высшая школа, 1981г. § 31,35,47.
2. И.Е. Иродов. Физика макросистем. Основные законы. – 2-е изд., дополн. - М. Лаборатория Базовых Знаний, 2001. Гл.5
3. Р.В. Телеснин. Молекулярная физика. Изд.2-е, дополненное. М. Высшая школа, 1973. Гл.12.
4. Д.В. Сивухин. Термодинамика и молекулярная физика. М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит. (Общий курс физики. т.П.) – любой год издания. Гл. X.
5. Л.Д. Ландау, А.И. Ахиезер, Е.М. Лифшиц. Курс общей физики. М.: Наука. Гл.ред.физ.-мат.лит. 1969. §§ 64-69

(Комплекс ЛКТ-2)

Упражнение 5

Кривая фазового равновесия воды.

**ФАЗОВЫЕ ПЕРЕХОДЫ ПЕРВОГО РОДА**

Процесс плавления и обратный ему – кристаллизация, процесс парообразования и обратный ему – конденсация, относятся к категории процессов, которые называются **фазовыми переходами**. Характерной особенностью таких процессов является скачкообразность превращения одного состояния вещества в другое<sup>18</sup>. Каждое из состояний называется **фазой**. В этом смысле различными фазами являются агрегатные состояния вещества: твердое, жидкое и газообразное. Понятие фаз, однако, является более широким, чем понятие **агрегатного состояния**: в пределах одного и того же агрегатного состояния могут существовать различные фазы. Например, мы говорим о существовании твердого, жидкого и газообразного агрегатного состояния воды, но, по крайней мере, о четырех фазах добавляя к ним паровую фазу<sup>19</sup>. Можно говорить о различных фазах твердой стали: аустенит, мартенсит, магнитная и немагнитная фазы. При этом необходимо подчеркнуть, что, говоря о твердом состоянии как об особой фазе вещества, мы имеем в виду не просто твердое, а именно кристаллическое состояние. Аморфное твердое тело превращается при нагревании в жидкость без всякого скачка - путем постепенного размягчения, то есть без фазового перехода, и поэтому аморфное состояние не представляет собой фазы вещества. Так, не являются различными фазами твердое и жидкое стекло или твердый и расплавленный асфальт.

Переход вещества из одной фазы в другую происходит (при заданном давлении) всегда при строго определенной температуре. Например, лед при атмосферном давлении начинает плавиться при  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  и при дальнейшем сообщении количества теплоты не происходит нагревания ни льда, ни образующейся воды - температура остается неизменной вплоть до момента, когда весь лед (в окрестности наблюдаемого объема) превратится в воду (речь, безусловно, идет о квазистатических процессах, к которым только и применимы представления равновесной термодинамики). В течение всего процесса фазового перехода обе фазы существуют при данной температуре одновременно, соприкасаясь друг с другом.

Фазовые превращения, сопровождающиеся поглощением или выделением количества теплоты и изменением объема данной массы вещества, называются фазовыми переходами первого рода. В течение процесса перехода говорить о теплоемкости, как правило, не имеет смысла – если приняты меры для исключения влияния процессов конвекции и теплопроводности (нагреваемая смесь перемешивается и т.п.), то температура не изменяется. Для оценки количества теплоты, расходуемого в процессе фазового перехода, используют иную физическую величину. Обычно фазовые переходы совершаются при постоянном давлении, поэтому количество теплоты, сопровождающее протекание элементарного фазового перехода, можно вычислить как  $dQ = dU + p dV = d(U + pV) = dW$ , а на конечном участке как разность двух функций состояния  $W_2 = U_2 + pV_2$  и  $W_1 = U_1 + pV_1$ . Каждая из них называется тепловой функцией или **энтальпией**. Теплота, затраченная (или выделенная) при фазовом переходе называется **теплотой перехода** (устар. "скрытая теплота", "изотермическая теплота"). Обычно количество подведенной теплоты пропорционально количеству уже перешедшего в другую фазу вещества, поэтому, отнесенную к единице этой массы теплоту называют **удельной теплотой перехода**.

<sup>18</sup> Особенность перехода из жидкого в твердое состояние будет отмечена в части "испарение и кипение".

<sup>19</sup> Не считая нескольких фазовых состояний льда.



Так, говорят об удельных теплота плавления  $\lambda = \frac{\delta Q}{dm}$  или парообразования  $r = \frac{\delta Q}{dm}$ , которые по порядку величины составляют  $10^5 \dots 10^6 \text{ Дж/кг}$ . Например, для воды удельная теплота плавления составляет  $0,33 \text{ МДж/кг}$ . Это означает, в частности, что при образовании  $1 \text{ кг}$  льда в окружающее пространство выделяется столько же тепла, сколько при сгорании примерно  $100 \text{ г}$  пороха или тротилла. Столько же поглощается при плавлении, например, из окружающего весеннего воздуха.

Приведенные здесь формулы можно использовать для непосредственного определения соответствующих параметров перехода. Кроме того, выявить факт состоявшегося фазового перехода первого рода можно, в числе прочих методов, по скачкообразному изменению теплоемкости вещества - за счет "включения" или, наоборот, "замораживания" отдельных степеней свободы молекул вещества.

Если при переходе теплота не выделяется или не поглощается, то **фазовый переход относится ко второму роду** (превращение парамагнетика в ферромагнетик при температуре точки Кюри или переход проводника в сверхпроводящее состояние).

### Испарение и кипение

Интересной особенностью процесса перехода вещества из жидкого в газообразное состояние – парообразования - является возможность протекания его двумя путями: не только скачкообразно, но и при любой температуре. Далее отметим особенности каждого из путей.

1. Процесс спокойного парообразования носит название **испарения**. Образующаяся фаза – пар. Здесь увеличение энергии вылетающих из жидкости молекул происходит за счет убыли энергии оставшихся частиц остающейся жидкости. Кроме того, необходимое количество энергии  $\delta Q = r \cdot dm$  поступает извне, в процессе теплообмена. При дальнейшем нагреве до так называемой критической температуры (для воды  $374,15^\circ\text{C}$ ) происходит следующий фазовый, теперь уже скачкообразный, переход в новое агрегатное состояние – газ.

2. Более **интенсивный процесс парообразования, протекающий скачком**, возникает при строго определенной температуре жидкости, которая определяется как веществом жидкости, так и давлением атмосферы другого газа над ее поверхностью. Этот процесс называется **кипением** (а температура – температурой кипения). В процессе кипения переход в паровую фазу происходит не только с поверхности, но во всем объеме нагретой жидкости. Необходимым условием для начала кипения является наличие во всем объеме жидкости пузырьков растворенного в ней газа атмосферы, образующихся при нагревании из-за падения растворимости газа в жидкости (процесс **коалесценции**). Таким образом, кипение жидкостей можно представить как процесс их испарения в объем пузырьков газа и далее выброса этих пузырьков наружу. Условие выхода пузырька радиусом  $R$  на поверхность жидкости в атмосферу с давлением  $p_0$  с глубины  $H$  можно записать как

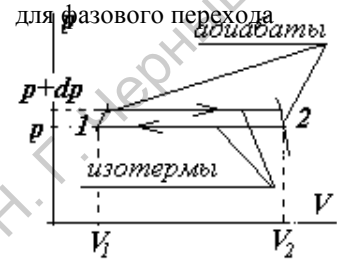
$p > p_0 + \rho g H + \frac{2\sigma}{R}$ , где  $\sigma$  - коэффициент поверхностного натяжения (для горячей воды около  $55 \text{ мН/м}$ ). Это условие означает, что температура начала кипения, строго говоря, различна на различных глубинах и говоря о температуре кипения, обычно имеют в виду температуру насыщенного пара над поверхностью кипящей жидкости.

### Уравнение Клапейрона-Клаузиуса

При парообразовании нагревание сопровождается увеличением количества образовавшегося пара, то есть увеличение давления (упругости) пара воды. Иными словами, увеличение температуры стимулирует процессы, сопровождающие по-Цикл Карно глосение тепла. Общий принцип, отражающий порождение любым процессом процессов-антагонистов, называется принципом Ле Шателье – Брауна<sup>20</sup>. Качественные соображения находят свое количественное выражение в уравнении Клапейрона – Клаузиуса<sup>21</sup>.

Вывод этого уравнения можно провести двумя путями – в соответствии с двумя основными методами термодинамики: методом круговых процессов (циклов) и методом термодинамических функций. Здесь будет использован первый метод.

Представим, что с некоторым количеством вещества массой  $m$ , взятом при температуре  $T$  и давлении  $p$  - близких к состоянию фазового перехода, проводится очень "узкий" цикл Карно. Изотермическими процессами являются переход вещества из фазы 2 в фазу 1 при некотором постоянном давлении  $p$  и обратный переход из фазы 1 в фазу 2 при давлении  $p+dp$ , также постоянном (см. рис.). Что касается "боковых" линий цикла, то строго говоря, они должны быть отрезками адиабат. Однако в пределе "бесконечно" узкого цикла форма этих линий не скажется на площади цикла, то есть на произведенной в цикле работе, которая, очевидно, будет равна  $dA = (V_2 - V_1) \cdot dp$ .



С другой стороны та же работа должна быть равна произведению затраченного на "верхней" изотерме цикла количества тепла  $Q_{12}$  на КПД цикла Карно:  $dA = \eta_{car} \cdot Q_{12}$

Применительно к нашему процессу, величина  $Q_{12}$  – не что иное, как теплота перехода из фазы 1 в фазу 2, которую для фазового перехода можно выразить через удельную теплоту  $Q_{12} = q_{12} \cdot m$ . Значение КПД цикла можно представить как отношение  $\frac{dT}{T}$ , где  $dT$  – разность температур на обеих изотермах.

Сравнивая выражения для элементарной работы, получаем  $(V_2 - V_1) \cdot dp = q_{12} \cdot m \cdot \frac{dT}{T}$ ,

откуда получается искомое дифференциальное уравнение:  $\frac{dp}{dT} = \frac{q_{12} \cdot m}{T \cdot (V_2 - V_1)}$  (\*).

Уравнение Клапейрона-Клаузиуса по смыслу вывода применимо как к процессу кипения жидкости, так и к плавлению, растворению и даже к изотермической химической реакции. Уже общий вид уравнения позволяет сделать некоторые выводы относительно поведения функции  $p(T)$ , которую называют фазовой диаграммой. Поскольку величина  $q_{12}$  существенно положительна, и в большинстве случаев  $V_2 > V_1$ , то фазовая диаграмма представляется, как правило, монотонно возрастающей функцией ( $\frac{dp}{dT} > 0$ , см.



рис.). Например, увеличение давления приводит к повышению температуры плавления или кипения. Однако, возможен и другой тип поведения. Например, процесс плавления у некоторых веществ сопровождается уменьшением объема (лед, чугун). В этих случаях точка плавления понижается при увеличении давления<sup>22</sup>.

<sup>20</sup> Анри Луи Ле Шателье, 1850-1936, термодинамическое обоснование – К. Браун, 1887

<sup>21</sup> 1834 – Бенуа Поль Эмиль Клапейрон, франц., Петербург, 1851- Рудольф Юри Эммануил Клаузиус, нем., Берлин

Иногда уравнение можно существенно упростить. Например, для процесса парообразования воды уравнение приобретает вид:  $\frac{dp}{dT} = \frac{m\lambda}{pV}$ , где  $V$  - объем, занимаемый паром, тогда как объемом первоначальной жидкости считается пренебрежимо малым. Уравнение позволяет, например, вычислить изменение температуры фазового перехода  $dT$  при изменении давления или - по экспериментальному графику давления от температуры определить удельную теплоту парообразования как функцию температуры. Именно это будет проделано в данной работе.

### Выполнение упражнения 5 Кривая фазового равновесия воды.

**Цель работы:** определение зависимости давления насыщенного пара жидкости (воды) от температуры с использованием печи-термостата.

Принадлежности и оборудование.

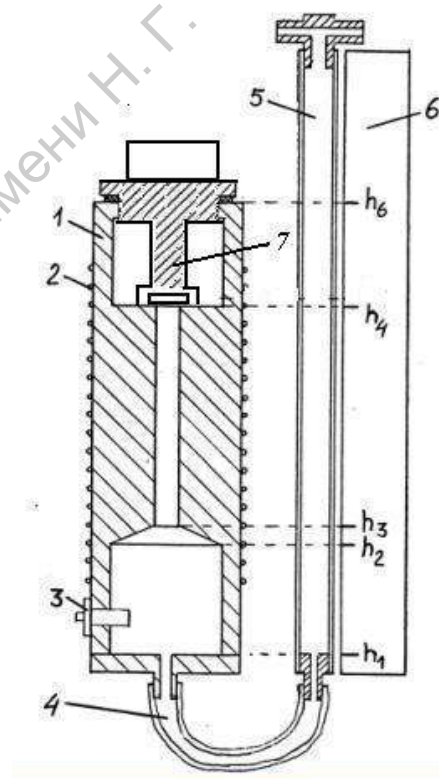
*Модуль М05 "Автоклав – манометр; перчатка х/б; салфетка; секундомер; мензурка, воронка, гибкий шланг, заглушка, резиновая груша со шлангом, кабель с магнитофонными разъемами для соединения термостата с нагревателем автоклава, микрокалькулятор.*

**Метод косвенного измерения давления насыщенных паров.** В данной работе используется модуль "Автоклав – манометр", имеющий многоцелевое назначение в Лабораторном комплексе ЛКТ-2. На рисунке указаны составные части автоклава – манометра, используемые для нагревания воды, пара и измерений давления:

- труба 1 с верхней и нижней полостями, которые соединены круглым каналом диаметром 6,0 мм;
- на трубе имеется нагревательная обмотка 2;
- в трубу ввернут датчик температуры 3.

В рабочем состоянии обмотка и датчик закрыты коробчатым кожухом. Сверху труба закрывается заглушкой 7. При выполнении других работ заглушка заменяется дросселями, фланцами и т.п.

Полость автоклава соединена шлангом 4 со стеклянной мерной трубкой 5, расположенной вдоль линейки 6, для отсчета координат характерных точек прибора и уровня жидкости.



*Координаты характерных уровней автоклава по шкале линейки:*

Нижний край трубы	$h_1$	-13мм
Верхний край нижней полости	$h_2$	22мм
Нижний край канала	$h_3$	27мм
Верхний край канала	$h_4$	93мм
Верхний край трубы	$h_6$	125мм
Площадь сечения мерной трубки	$S$	75.4 мм <sup>2</sup>

<sup>22</sup> Так, для воды разность удельных объемов ( $v_2 - v_1$ ) воды и льда при  $0^\circ\text{C}$  равна приблизительно  $9 \cdot 10^{-2} \text{ см}^3/\text{г}$ . Это ведет к понижению точки плавления льда на  $0,0075 \text{ град/атм}$ .

В полость автоклава через верхнее отверстие, при снятой заглушке, наливают дистиллированную или кипяченую воду до уровня  $h_0$  на 3-5 мм выше уровня  $h_3$  нижнего торца канала (определяется по шкале мерной трубки после закручивания пробки). Вода заполняет нижнюю полость и входит в нижнюю часть канала. При закрывании канала заглушкой в нем образуется заполненная воздухом закрытая полость, начальный объем  $V_0$  которой определяется площадью  $S_0$  сечения канала, начальным уровнем жидкости  $h_0$  и уровнем верхнего торца канала. При этом:  $h_4=93$  мм,  $V_0=S_0 \cdot (h - h_0)$ ,  $S_0=28,3$  мм<sup>2</sup>

При нагревании корпуса (а вместе с ним и его содержимого) до новой температуры, воздух в канале расширяется, и к нему добавляются пары воды. В результате вода из полости вытесняется в мерную трубку, где поднимается до нового уровня  $h$ . Объем дополнительно вытесненной жидкости можно определить как

$$V = S (h - h_0), \text{ где } S = 75,4 \text{ мм}^2 - \text{площадь сечения канала трубки.}$$

Суммарное давление воздуха  $P_B$  и паров  $P_{II}$  в полости практически равно атмосферному давлению  $P_0 = 100$  кПа. Давление столба жидкости в мерной трубке (около 100 Па) нужно учитывать лишь при прецизионных измерениях. Таким образом, в эксперименте можно измерить величину  $P_B = P_0 - P_{II}$

Дополнив это соотношение уравнением газового состояния для воздуха

$$\frac{P_0 V_0}{T_0} = \frac{P_0 (V + V_0)}{T},$$

можно получить рабочую формулу для косвенного определения давления насыщенного пара по измеренным значениям температур и объемов:

$$P_{II} = P_0 \left( 1 - \frac{T \cdot V_0}{T_0 \cdot (V + V_0)} \right)$$

Теперь, проводя серию измерений при нарастающей температуре автоклава, можно получить искомую зависимость и поэтому полученную формулу можно считать рабочей в данном эксперименте.

Используя данные эксперимента и уравнение Клапейрона-Клаузиуса в форме полученного ранее уравнения (\*), можно определить такую важную величину как удельная теплота испарения. Для этого необходимо преобразовать уравнение (\*) считая, что объем насыщенного пара определяется газовым уравнением Клапейрона-Менделеева, и представить данные в зависимости  $\ln P_{II}$  от  $1/T$ . Тогда получим

$$r = - \frac{R}{M} \cdot \frac{d(\ln P)}{d(1/T)}$$

где  $R = 8,31$  Дж/(моль·К),  $M = 18$  г/моль - молярная масса воды. В тех же координатах необходимо представить и экспериментальные данные, после чего удельная теплота парообразования определится по наклону получившейся прямой экспериментальных данных.

**ДЛЯ УСПЕШНОГО ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА НЕ ПРОЯВЛЯЙТЕ ОПЕРЕЖАЮЩИХ ДЕЙСТВИЙ, ДЕЙСТВУЙТЕ СТРОГО ПО ПРИВОДИМОЙ НИЖЕ ИНСТРУКЦИИ, НЕ ПРОПУСКАЯ ПУНКТОВ!**

#### Подготовка установки к работе.

1. Убедитесь, что верхняя часть автоклава закрыта заглушкой, и выверните ее.

Если вместо заглушки ввернут другой элемент (оставшийся от выполнения предыдущих работ), обязательно обратитесь к лаборанту.

Для создания замкнутого объема в канале необходима именно заглушка!

2. Вставьте в верхнюю часть автоклава стеклянную воронку и налейте в полость автоклава воды на 3 – 5 мм выше уровня  $h_2$  (по показаниям мерной трубки). При комнатной температуре это количество воды будет определять отметку  $h_0$  (см. вывод рабочей формулы).

Для опыта используйте отстоявшуюся или кипяченую воду из бутылки у лаборанта. При заливании в систему сырой воды результаты (особенно зимой) будут искажены явлением выхода при нагревании растворенного в воде воздуха (явление коалесценции).

3. Дайте залитой воде стечь со стенок и просушите стенки канала автоклава сухим воздухом. Для этого соедините один конец гибкого шланга с выходом компрессора. Затем включить компрессор (тумблер включения компрессора расположен на правой боковой стороне комплекса ЛКТ-2) и свободным концом, из которого струёй вытекает воздух, аккуратно просушить верхний канал автоклава, после чего плотно закрыть его заглушкой.

Примечание: рядом с тумблером включения компрессора расположен регулятор его мощности, при помощи которого можно увеличивать или уменьшать поток воздуха.

4. Плотно закройте заглушку автоклава.

5. Для подведения напряжения к нагревателю автоклава один конец соответствующего кабеля соедините с разъёмом «термостат» на панели измерительного блока, а другой конец – с разъёмом нагревателя автоклава.

6. Возьмите у лаборанта инструкцию по работе с измерительным блоком данной установки и внимательно прочитайте ее, обратив внимание на процедуры изменения температуры нагревателя и измерения этой температуры.

### НАЧИНАЙТЕ ЭКСПЕРИМЕНТ

7. По уровню воды в стеклянной трубке измерьте высоту столбика воды  $h_0$  при комнатной температуре.

8. Для записи данных измерений составьте таблицу:

Упражнение 5. Определение зависимости давления насыщенного пара жидкости (воды) от температуры  
Серия № \_\_\_\_\_ начальный уровень воды  $h_0 =$  \_\_\_\_\_

$t$ , °C	$T$ , К	$h$ , см	$V$ , см <sup>3</sup>	$P_{\text{п}}$ , кПа	$\ln P_{\text{п}}$	$1/T$ , $10^{-3} \text{ K}^{-1}$	$\langle r \rangle$ , МДж/кг

9. Включите тумблер «сеть». Нажатием кнопки  $T_1$  измерьте начальную температуру воды в автоклаве по показаниям измерительной системы.

10. Дальнейшее увеличение температуры делайте с шагом  $10^\circ\text{C}$  до  $80^\circ\text{C}$  и - с шагом  $3-4^\circ\text{C}$  до  $95^\circ\text{C}$ . После загорания красной сигнальной лампочки отсчет температуры производите спустя примерно 2 минуты, необходимые для установления теплового равновесия.

11. При каждом отсчете температуры измеряйте высоту столбика воды в стеклянной измерительной трубке.

12. После проведения серии измерений отключите нагреватель. Дождавшись, когда давление в мерной трубке вернется к исходному значению, отверните заглушку рукой (в перчатке!), охладите установку и повторите серию измерений еще два-три раза. Для охлаждения удобно использовать компрессор.

13. Обработайте результаты измерений. Постройте график зависимости давления насыщенного пара  $P_{\text{п}}$  от температуры  $T$ .

14. Перестройте полученную зависимость в координатах  $\ln P_{\text{п}}$  и  $1/T$ . Используя последний график, определите удельную теплоту парообразования (испарения) и сравните полученное значение с табличным.

### Контрольные вопросы:

1. Значения каких физических величин Вы будете определять в предстоящем эксперименте? Какие характерные значения имеют эти величины?
2. Как изменяется давление насыщенных паров от температуры. Нарисуйте примерный график. Как эта зависимость определяется в Вашем эксперименте?
3. В быту часто смешивают понятия: кипение, испарение, парообразование. В чем различие этих явлений?
4. Уравнение Клапейрона-Клаузиуса - его вид и смысл.
5. Получите рабочие формулы для эксперимента.
6. Как работает термометр, используемый в работе? Где он расположен? В чем преимущества и недостатки такого расположения?

### Литература

1. А.Н. Матвеев Молекулярная физика. М.: Высшая школа, 1981г. § 31,35,47.
2. И.Е. Иродов. Физика макросистем. Основные законы. – 2-е изд., дополн. - М. Лаборатория Базовых Знаний, 2001. Гл.5
3. Р.В. Телеснин. Молекулярная физика. Изд.2-е, дополненное. М. Высшая школа, 1973. Гл.12.
4. Д.В. Сивухин. Термодинамика и молекулярная физика. М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит. (Общий курс физики. т.П.) – любой год издания. Гл. X.
5. Л.Д. Ландау, А.И. Ахиезер, Е.М. Лифшиц. Курс общей физики. М.: Наука. Гл.ред.физ.-мат.лит. 1969. §§ 64-69

**Комплекс ЛКТ-2**  
**Упражнение 6.**  
**Определение удельной теплоты плавления**  
**и приращение энтропии**

(перед выполнением этой работы рекомендуется  
выполнить упражнения 1 и 2 этого комплекса)

**ФУНКЦИИ СОСТОЯНИЯ. ЭНТРОПИЯ**

Употребляя в быту термины "запас энергии" (об аккумуляторе, гире часов или пружине) или "запасенная теплота" (в толстостенной сковороде, в воздухе нагретой комнаты), мы часто не осознаем, какими свойствами должна обладать величина, для которой правомерно представление об ее запасенном количестве. Так, если употребление термина "запас энергии" вполне правомерно, то о запасе теплоты можно говорить далеко не всегда.

Сразу напомним, что такая величина, значение которой определяется только состоянием системы и не зависит от формы процесса, должна быть **функцией состояния** и иметь полный дифференциал. Например, потенциальная энергия консервативной силы: ее изменение численно равно работе совершенной этой силой на перемещении, независимо от формы пути.  $dW_p = W_{p1} - W_{p2} = \Delta A$ . В этом случае, действительно, можно сказать, что система обладала запасом энергии  $W_{p1}$ , затем, потеряв ее часть  $dW_p$ , совершила за счет ее работу  $\Delta A$ . Наоборот, совершая работы внешней силой против действия консервативной силы, мы увеличиваем запас потенциальной энергии данной силы – можно даже сказать производим потенциальную энергию. Другой пример: увеличивая температуру фиксированной массы воздуха – безразлично каким процессом, мы увеличиваем, производим его внутреннюю энергию, которая затем может, сразу или порциями, перейти в работу расширения этого газа. Внутренняя энергия – тоже функция состояния.

А вот для неконсервативной силы функции состояния не существует – работа силы трения, например, зависит от пути.

Интересно, что внутренняя энергия и работа потенциальной силы – не единственные функции состояния, используемые в термодинамике. Отыскание в теории какого-либо явления функции состояния очень удобно – мы тут же освобождаемся от необходимости вычисления интегралов по сложным траекториям фазового пространства системы и заменяем интегрирование разностью значений функции состояния. В математике существует теорема, согласно которой для любой дифференциальной формы

$$F(x, y)dx + G(x, y)dy$$

можно подобрать множитель  $M(x, y)$ , обращаящий ее в полный дифференциал некоей функции

$$(F(x, y)dx + G(x, y)dy) \cdot M(x, y) = dS.$$

Обратим эти знания к тепловым процессам. Так, работа, совершенная газом  $\delta A = pdV$ , зависит от формы траектории системы на плоскости  $p$ - $V$ , и не является изменением некоторой функции состояния. По тем же причинам не является полным дифференциалом и количество теплоты для произвольного перехода из одного состояния в другое

$$\delta Q = \nu C_v dT + pdV,$$

представленное здесь в виде дифференциальной формы

Таким образом, строго говоря, никакому состоянию системы нельзя поставить в соответствие ни работу, ни количество теплоты. Если, однако, рассмотреть величину  $\frac{\delta Q}{T}$

(количество теплоты с множителем  $\frac{1}{T}$ ), то новая величина уже будет являться функцией состояния с полным дифференциалом

$$\frac{1}{T} \cdot \delta Q = \frac{vC_v dT}{T} + \frac{pdV}{T} = \frac{vC_v dT}{T} + \frac{RdV}{V} = d(vC \ln T + R \ln V) = dS$$

Именно таким образом в термодинамике появляется еще одна из функций состояния:  $dS = \frac{\delta Q}{T}$  - **энтропия** (1865, Р. Клаузиус).

Наряду с внутренней энергией и энтальпией (для изобарных процессов, см. стр 22), энтропия также является функцией состояния. Можно говорить о запасе энтропии в системе, о производстве энтропии в данном процессе или даже о скорости производства энтропии, или ее убыли (втекание в систему **негэнтропии**), если процесс неравновесный – именно такое понимание энтропии позволило ввести термодинамику неравновесных процессов представление о стреле времени в открытых системах.

Клаузиус показал, что техника определения этой величины удобна для вычисления количества теплоты в любом процессе, поскольку теперь  $\delta Q = TdS$

В термодинамике сама абсолютная величина энтропии  $S$  не определяется<sup>23</sup> и не используется, как и потенциальная энергия в механике. Известно, лишь соотношение для ее изменения, просуммированное по разным стадиям процесса

$$\Delta S = \sum \left( \frac{\delta Q}{T} \right)_i$$

**Например, в нашем практикуме, при исследовании процессов плавления, изменение энтропии выражается простым соотношением, содержащим только одно слагаемое:**

$$\Delta S = \delta Q_2 / T_{пл} = \lambda M / T_{пл}$$

Более сложные случаи расчета здесь рассматриваться не будут.

Самый факт существования связи между  $\Delta S$  и  $\delta Q$  выясняется не в термодинамике, а лишь с позиций молекулярно-кинетической теории. Энтропия данного состояния определяется числом степеней свободы микрочастиц системы и при переходе системы в состояние с большим числом степеней свободы, энтропия системы увеличивается. Сообщение телу тепла приводит к усилению теплового движения атомов, то есть к увеличению хаотичности распределения внутренней энергии по возможным состояниям. При плавлении, например, происходит увеличение числа степеней свободы – кроме колебательного движения частицы кристалла получают возможность еще и поступательного движения в любом из направлений. Так, превращение льда в воду сопровождается разрушением около 15% связей кристаллической решетки. Естественно также, что влияние сообщенного количества тепла на изменение состояния тела определяется относительным значением этого количества по сравнению с внутренней энергией тела – величиной, пропорциональной температуре тела - и поэтому убывает с температурой.

Добавим, что кроме возможности определения количества теплоты, энтропия как физическая величина используется для качественной характеристики способности системы переходить в другие состояния. Так, если внутренняя энергия системы при температуре  $T$  известна и равна  $U$ , то можно показать, что система может совершить работу не бо-

<sup>23</sup> Впрочем, примеры расчета энтропии методами статистической теории можно найти, например в [1]. Там, в частности показано, что моль водорода в нормальных условиях имеет энтропию равную 877 Дж/град относительно состояния при абсолютном нуле температуры.



лее чем  $A = U - T \cdot S$ . В записанном соотношении величина  $S$  - энтропия системы. Важно сказать, что хотя закон сохранения энергии допускает и полное преобразование внутренней энергии в работу, но ограничение здесь накладывается вторым началом термодинамики. Оно утверждает, что в отсутствии внешних сил (изолированные системы) возможны лишь такие процессы, которые не уменьшают общую энтропию системы  $\sum (dS_i) \geq 0$ . Величина  $(U - T \cdot S)$  получила название **свободная энергия**, тогда как  $T \cdot S$  - **связанная энергия**. Показывается, что связанную энергию система может отдать только посредством теплообмена, тогда как при совершении работы эта часть энергии не может быть использована. Сказанное поясняет, почему энтропию рассматривают иногда как меру обесцененности энергии тела.

### Выполнение упражнения 6

#### Определение удельной теплоты плавления и приращение энтропии

**Цель работы:** с использованием печи-термостата, по зависимости температуры от времени определить теплоемкости вещества до и после плавления, температуру плавления, удельную теплоту плавления и приращение энтропии.

#### *Принадлежности и оборудование.*

*Печь-термостат в составе Лабораторного комплекса с Измерительной системой. Два тигля, заполненные расплавленными веществами: парафином и металлическим сплавом; теплоизолирующий кожух; прижимная планка с пружинами; мензурка; перчатка х/б; глицерин; спичка (чистая палочка); салфетка; кабель с магнитофонными разъемами.*

#### Метод измерения и суть эксперимента:

В данной работе определяются параметры одного из фазовых переходов первого рода: температура плавления и кристаллизации, а также теплоемкость и удельная теплота плавления для двух относительно легкоплавких веществ: парафин (или стеарин) и металл - сплав Розе<sup>24</sup>. Исследуемое вещество (около 30 мл) помещается в тигель на плите термостата. В процессе последующего нагревания вещества до состояния полного расплавления и дальнейшего охлаждения, производятся дискретные отсчеты температуры, и на их основе строится кривая зависимости температуры от времени, на которой четко прослеживается плато плавления и отвердевания (при обратном ходе кривой).

Температура фазового перехода в данной работе измеряется непосредственным отсчетом, тогда как определение теплоемкости образца и его удельной теплоты плавления - косвенное, по рабочей формуле.

Необходимые рассуждения проводятся по следующей схеме.

1. Определение удельной теплоемкости вещества. Если в результате эксперимента снять зависимость температуры образца от времени, то по увеличению температуры системы на  $\Delta T$  за время  $\Delta t_1$  на стадии нагревания можно заключить, что образец получил количество теплоты

$$\delta Q_1 = (W - W') \cdot \Delta t_1 - C_0 \cdot \Delta T$$

---

97,1°C. При небольших изменениях состава изменяется и значение температуры плавления. Плотность сплава <sup>24</sup> Сплав Розе: олово - 159 весовых частей, свинец - 280, Висмут - 56,1. Табличная температура плавления  $9,5 \cdot 10^3 \text{ кДж/м}^3$

где  $W$ - мощность нагревателя и  $W'$ - мощность потерь в данном диапазоне температур, определяемая данными графика (см.) – он построен по результатам отдельного эксперимента. Однако, лучше воспользоваться графиком ваших измерений при выполнении упражнения (ЛКТ-2 упр1).

$C_0$  – теплоемкость печи с тиглем (по данным уже упомянутого эксперимента она равна  $130 \pm 20$  Дж/К).

На этой стадии нагревания или охлаждения удельную теплоемкость вещества можно определить по известной формуле:  $C = \delta Q_1 / m \cdot \Delta T$ .

2. Определение удельной теплоты плавления В течение процесса плавления или кристаллизации говорить о теплоемкости не имеет смысла – температура не изменяется и равна  $T_{пл}$ . На графике зависимости температуры от времени, наблюдается "плато". Для оценки количества теплоты  $\delta Q_2$ , расходуемого в процессе кипения, используют иную физическую величину - удельную теплоту плавления (устаревшее название – скрытая теплота плавления).

Для определения удельной теплоты плавления нужно по графику найти количество теплоты  $\delta Q_2 = (W - W') \cdot \Delta t$ , полученное образцом на участке плато. После чего удельная теплота плавления определяется по известному соотношению

$$\lambda = \delta Q_2 / m$$

3. Определение приращения энтропии. Данных эксперимента по измерению зависимости температуры от времени в процессе нагревания и плавления вполне достаточно для дополнительного определения такой известной величины как приращение энтропии в этом процессе.

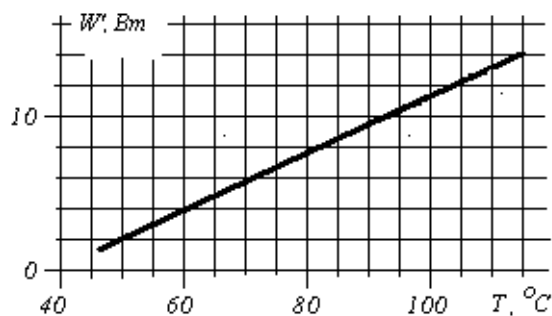
При исследуемых в данной работе процессах нагревания и плавлении приращение энтропии выражается соотношением:

$$\Delta S = \delta Q_2 / T_{пл} = \lambda M / T_{пл}$$

**ДЛЯ УСПЕШНОГО ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА НЕ ПРОЯВЛЯЙТЕ ОПЕРЕЖАЮЩИХ ДЕЙСТВИЙ, ДЕЙСТВУЙТЕ СТРОГО ПО ПРИВОДИМОЙ НИЖЕ ИНСТРУКЦИИ, НЕ ПРОПУСКАЯ ПУНКТОВ!**

ПОДГОТОВЬТЕ УСТАНОВКУ К РАБОТЕ.

1. Возьмите у лаборанта инструкцию по работе с измерительным блоком данной установки и внимательно прочитайте ее, обратив внимание на процедуры изменения температуры нагревателя и измерения этой температуры. Если вы уже сделали это, переходите к пункту 2.



Мощность потерь печи в зависимости от температуры, встроенного датчика T1 вблизи нагревателя (график построен по результатам выполнения ЛКТ-2 упр 1")

Минимальное время проведения одной серии измерений – около 50-ти минут. Для проведения простейшей статистической обработки необходимы результаты не менее трех серий по каждому веществу! Прежде, чем приступить к проведению очередной серии измерений убедитесь, что Вы располагаете необходимым временем! Новую серию можно начинать и после перерыва в работе и даже в другой день!

2. Разметьте лист протокола измерений примерно так (около 30-ти строк, данные в колонках проставлены как пример заполнения, примечания не устанавливаются заранее - производятся в течении эксперимента):

Упражнение 6. Определение теплоемкости веществ, температуры плавления, удельной теплоты плавления и приращение энтропии.

Вещество: \_\_\_\_\_ Масса тигля с веществом<sup>25</sup>: \_\_\_\_\_

Масса пустого тигля  $60,0 \pm 0,5$ г. \_\_\_\_\_ Масса вещества: \_\_\_\_\_

Начальное напряжение: \_\_\_\_\_ Начальный ток: \_\_\_\_\_ → Мощность: \_\_\_\_\_

Полное время начала измерений: Час- мин- сек

Серия измерений № \_\_\_\_\_

Температура, °C	Мин-сек.	U, В / I, мА	Температура, °C	Мин-сек.	U, В / I, мА
Нач.					
40	38-00				
50	38-35		...		
60	...	19.5 / 1870	Оконч. плав.		
...					
80	40-20		Вентилятор.		
Начало плав.			124	06-05	
...			...		

3. Возьмите пузырек с глицерином, обмакните в него кончик спички. Нанесите две – три капли глицерина на поверхность плиты для теплового контакта.

4. Вденьте кончики пружин прижимной планки в отверстия стоек по бокам от плиты, плотно поставьте на плиту один из тиглей. Закройте тигель теплоизолирующим кожухом и прижмите кожух прижимной планкой.

5. Регулятор "ТЕМПЕРАТУРА" установите на значение, близкое к максимальному (чтобы избежать срабатывания системы стабилизации температуры), а регулятор "НАГРЕВ" - на значение около 20 В. В дальнейшем установленные значения будут уточнены измерением и занесены в протокол измерений.

6. Убедитесь что тумблеры "СЕТЬ" и "ВКЛ" на лицевой панели измерительной системы находятся в положении – вниз. Возьмите кабель с магнитофонными разъемами и соедините посредством него измерительную систему и печь-термостат. Убедитесь, что провод на задней стенке лабораторного комплекса ЛКТ-2 включен в сеть. Включите установку тумблером "Сеть" на передней панели измерительной системы. На наличие напряжения в сети укажут зеленая лампочка регулятора "ТЕМПЕРАТУРА" и четырехразрядный индикатор. Если все кнопки нижнего ряда отжаты, то показания индикатора будут "-001".

7. Нажмите кнопку T1 – считайте с индикатора и занесите в протокол значение начальной температуры системы. Оставьте кнопку зафиксированной в нажатом положении.

ДАЛЬНЕЙШИЕ ДЕЙСТВИЯ УДОБНО ВЫПОЛНЯТЬ ВДВОЕМ!

Вам предстоит записать серию- около 60-ти парных измерений "Температура - время". Значение температуры – на индикаторе, значения времени – на часах, установленных на одной из панелей комплекса. Учтите, что вначале изменения температуры БУДУТ ПРОИСХОДИТЬ ДОСТАТОЧНО БЫСТРО – не отвлекайтесь при считывании показаний приборов и аккуратно занесении данных в заранее заготовленную таблицу.

## НАЧИНАЙТЕ ЭКСПЕРИМЕНТ

8. Включите тумблер «сеть». Нажатием кнопки  $T_1$  измерьте начальную температуру автоклава по показаниям измерительной системы.

<sup>25</sup> Масса тигля с веществом определяется расчетным образом по известной плотности и измеренному объему.

9. Ознакомившись с описанием электронного блока управления, произвести нагрев термостата постоянной мощностью до  $120^{\circ}\text{C}$  (Регулятор "Температура" установлен на максимальную температуру). Снять зависимость температуры от времени. Шаг по температуре для сплава Розе:  $10^{\circ}\text{C}$  при температурах ниже  $90^{\circ}\text{C}$  и  $2^{\circ}\text{C}$  в диапазоне  $90-120^{\circ}\text{C}$ . Рекомендуемая мощность  $30-40\text{ Вт}$ . Пуск секундомера рекомендуем проводить начиная с температуры  $30-40^{\circ}\text{C}$ .

*Пронаблюдайте процесс плавления через отверстие в кожухе.*

*При необходимости воспользуйтесь зеркальцем и лампой - они у лаборанта.*

10. После начала плавления продолжайте нагревание до полного расплавления всего вещества в тигле.

11. Как только процесс изменения температуры замедлится, нажмите кнопку  $U_H$  и занесите в протокол значение напряжения питания. Также считайте значение тока  $I_H$ . Затем в процессе нагревания проверяйте несколько раз эти значения по мере прогресса печи.

12. По достижении температуры  $120^{\circ}\text{C}$  необходимо включить вентилятор и, продолжая отсчет времени, снять зависимость температуры от времени при охлаждении.

13. После проведения измерений постройте график зависимости температуры от времени и продумайте ваши действия при вычислениях по рабочим формулам:

14. Вычислите хотя бы одно значение теплоемкости и значение удельной теплоты плавления, чтобы проверить правильность записей и хода эксперимента.

15. Приготовьтесь к проведению новой серии измерений с тем же веществом.

16. Для смены вещества рукой в перчатке (х/б) осторожно снимите и отведите в сторону от себя прижимную планку с пружинами, снимите с тигля кожух и аккуратно, плавно сдвиньте тигель с места. Снимите тигель с плиты и поставьте остывать на подставку (не на стол!), расположив ее рядом с установкой.

**БУДЬТЕ ОСТОРОЖНЫ! ПОМНИТЕ,  
ЧТО В ТИГЛЕ – ГОРЯЧЕЕ ВЕЩЕСТВО!**

17. По окончании работ, охладите печку, протрите ее салфеткой. Восстановите порядок на рабочем месте.

18. Нанесите все зависимости по данному веществу на один график. Сделайте обработку результатов измерений. Вычислите средние значения, оцените погрешности. Сравните полученные результаты с табличными значениями

**Контрольные вопросы:**

1. В чем различие понятий "агрегатное состояние" и "фаза"? Какие фазовые переходы можно наблюдать в данном эксперименте, и какими физическими величинами характеризуются эти процессы?

2. Значения каких физических величин Вы будете определять в предстоящем эксперименте? Какие характерные значения Вы ожидаете получить?

3. В каких случаях можно говорить о запасе или расходе того или иного значения физической величины в системе.

4. Что означает термин "энтропия"? Как измеряется изменение энтропии в данной лабораторной работе

**Литература**

1. А.Н. Матвеев Молекулярная физика. М.: Высшая школа, 1981г. §§ 19,23,57.

2. И. Е. Иродов. Физика макросистем. Основные законы. – 2-е изд., дополн. - М. Лаборатория Базовых Знаний, 2001. Гл 3.

3. Р.В. Телеснин. Молекулярная физика. Изд.2-е, дополненное. М. Высшая школа, 1973. Гл. 5.

4. Д.В. Сивухин. Термодинамика и молекулярная физика. М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит. (Общий курс физики. Т. II.) – любой год издания. §§ 37 - 41.

5. Л.Д. Ландау, А.И. Ахиезер, Е.М. Лифшиц. Курс общей физики. М.: Наука. Гл.ред. физ.-мат. лит. 1969. §§ 64-69

## Комплекс ЛКТ-2

### Упражнение 7

Определение теплоемкости воздуха  
при постоянном давлении по истечению из капилляра

#### Упражнение 6. Определение теплоемкости воздуха при постоянном давлении в струе

**Цель работы:** ознакомление с основами термодинамики газов; определение теплоемкости воздуха при постоянном давлении в струе.

Список принадлежностей

Автоклав-реометр;

Калориметр газовый (см.рис. ниже);

Набор трубок;

Заглушки на капилляры (2 шт.);

Блок дросселей (от нем. *drosseln* – душить, сокращать) – устройство для сужения диаметра газопровода, создающее повышенное местное гидродинамическое сопротивление. Здесь – набор заглушек с тонкими металлическими трубками-капиллярами (см.фото));

Секундомер;

Кабель, соединяющий разъем "термостат" с "газовым калориметром".

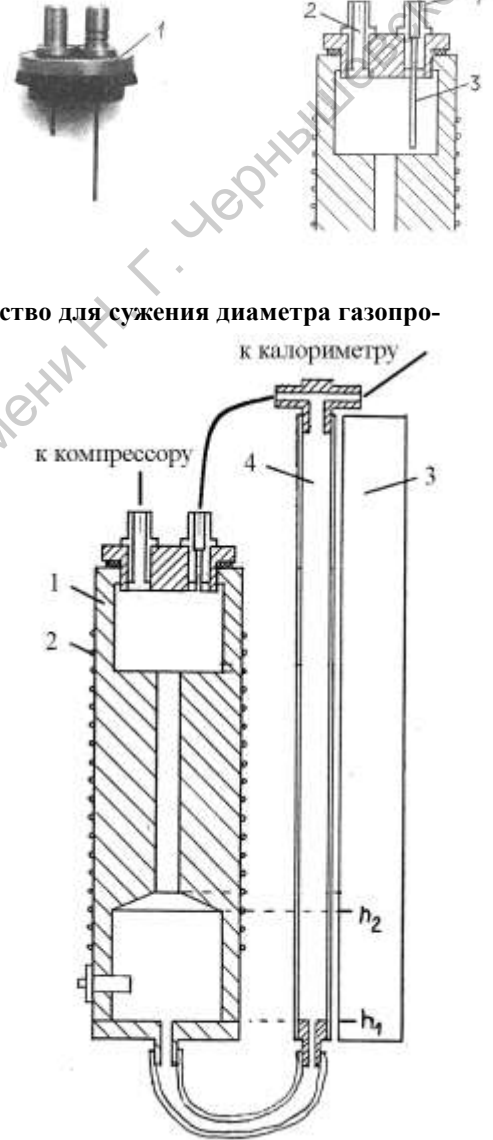
**Подготовка к работе.** Соберите реометр, как показано на рисунке 2. Дроссель № 0 (не имеет риски) соединяется с компрессором, дроссель № 1 – со стеклянной (имеет одну риску). Включите сеть (рычажок внизу справа). Проверьте работоспособность компрессора. Он включается рычажком справа, напор воздуха регулируется при помощи регулятора. Соедините выход компрессора (буква "К" на верхней панели) с реометром при помощи трубки.

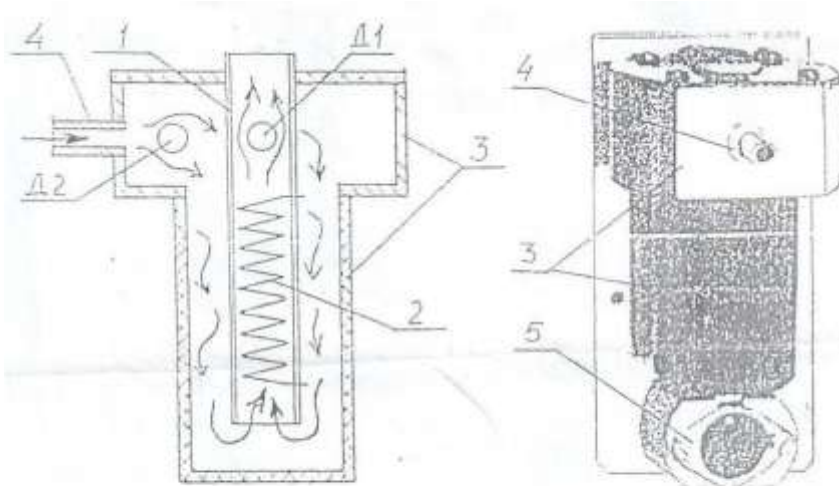
#### Внимание! Трубки не должны перегибаться!

Соедините термостат с датчиком при помощи проводов; один конец провода воткните в магнитофонный разъем на термостате, другой – в разъем на панели управления.

**Внимание! Соединение датчика с термостатом осуществляется при помощи только одного провода!**

**Суть эксперимента:** используется метод нагрева струи. Выбранная методика измерений и обработки результатов позволяет уменьшить систематическую погрешность, обусловленную неидеальностью изоляции. Определяется зависимость мощности нагрева от расхода газа при фиксированной разнице температур на входе струи в нагреватель и на выходе из него. В этом случае мощность потерь можно считать постоянной, и отношение приращения мощности нагрева к приращению расхода газа позволяет определить молярную теплоемкость газа при постоянном давлении. Запишем уравнение энергетического баланса. Энергия калориметра расходуется на нагрев поступающего воздуха и на потери в системе  $W'$ .





Модуль газовый калориметр

1-труба-теплообменник; 2-спираль-нагреватель и выходной датчик температуры Д1;  
3- корпус со штуцером; 4- выходной датчик температуры Д2; 5 - разъем-гнездо



Разъем-гнездо - 5 Электрическая схема



$$W = c_p \frac{dv}{dt} \Delta T + W'$$

Здесь  $c_p$  — молярная теплоемкость при постоянном давлении (последнее считается равным атмосферному),  $\Delta T$  — разность температур на входе и выходе из калориметра,  $\frac{dv}{dt}$  — количество воздуха (в молях), проходящее через калориметр в единицу времени.

Запишем данное равенство для двух различных мощностей нагрева  $W_1$  и  $W_2$  и вычтем из одного соотношения другое, получим:  $\Delta W = c_p \Delta T \frac{d}{dt} \Delta v$ .

Здесь символом  $\Delta$  обозначена разность физических величин в двух состояниях 1 и 2.

Количество молей выразим через уравнение Клапейрона-Менделеева:  $v = \frac{P_0 V}{RT} = \frac{P_0 \lambda}{RT} dt$ ,

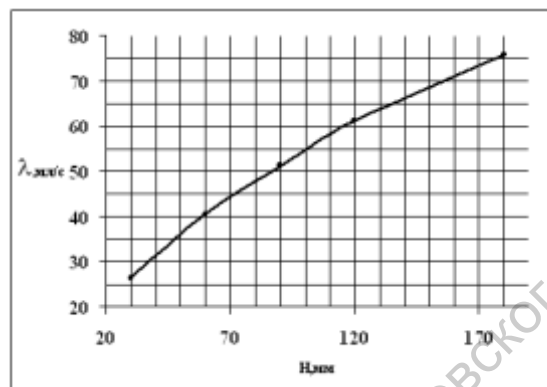
здесь мы выразили объем воздуха через скорость накачки компрессора  $\lambda$ . Подставляя это

соотношение, получим рабочую формулу  $\frac{c_p}{R} = \frac{\Delta W}{\Delta \lambda} \frac{T_0}{\Delta T P_0}$

Где  $R$  — универсальная газовая постоянная,  $T_0$  — начальная (на входе в нагревательный узел) температура (по Кельвину),  $P_0$  — атмосферное давление, считается равным

$$P_0 = 10^5 \text{ Па}$$

**Особенности измерения.** Датчик, расположенной внизу панели, служит для измерения температуры, напряжения и тока в зависимости от нажатой клавиши внизу (Т1 – температура на выходе калориметра в градусах Цельсия, Т2 – на входе,  $I_H$  - напряжение на катушке калориметра в вольтах,  $I_H$  - ток в миллиамперах). Для определения скорости вытекания воздуха (накачки) из компрессора  $\lambda$  используется разность высоты подъема дистиллированной воды в трубке при наличии накачки воздуха и при ее отсутствии (см. экспериментальный график и п.6 этой работы). Режиму термостатического равновесия отвечает одновременное свечение обеих лампочек (красной и зеленой), расположенных над регулятором "температура".



**Внимание!** Степень свечения лампочек в состоянии равновесия одинакова! Равновесие не наступает немедленно! Необходимо выждать около 2-3 минут для установления хорошего распределения температур!

**При появлении в трубке пузырьков воздуха уменьшите напор компрессора!**

#### Порядок измерений.

1. Определите начальную температуру на входе и выходе калориметра. Для этого запишите показания датчика при нажатых клавишах Т1 и Т2 соответственно. Средняя начальная температура определяется по формуле:

$$\langle T \rangle = \frac{T_1 + T_2}{2}$$

2. Установите напряжение системы (регулятор "нагрев") на значении  $10 \div 16$  вольт, установите желаемую температуру в пределе  $50 \div 100$  градусов Цельсия (регулятор "температура").
3. Запишите начальную высоту подъема жидкости  $h_0$  (данная высота не должна превышать высоты  $h_2 = 21 \text{ мм}$ ). Если в манометре нет воды, налейте туда дистиллированной воды из емкости, находящейся у инженера. Для этого аккуратно извлеките стеклянную трубку из пазов и отклоните на себя. Снимите колпачок с верхней части мензурки и влейте необходимое количество воды при помощи воронки.
4. Включите компрессор и добейтесь подъема жидкости в трубке на выбранную вами высоту, снимите соответствующее значение  $h$ .
5. Включите термостат (включение производится переключателем "вкл" рядом с переключателем "сеть"). Дождитесь установления состояния термодинамического равновесия. При этом загорятся обе лампочки вокруг рычажка, регулирующего температуру.

**Внимание!** При расходе газа менее 20 мл/с нагреватель не включать.

6. Запишите соответствующие значения Т1, Т2,  $U_H$ ,  $I_H$ . Данные занесите в таблицу. Величину  $\lambda$  определите из графика. Мощность рассчитайте по формуле  $W = UI$ .
7. Повторите описанные выше измерения для четырех различных значений  $h$ . Определите величины  $\Delta W$  и  $\Delta \lambda$  как разности между соответствующими величинами при различном уровне подъема жидкости.

8. Подставьте полученные данные в формулу:  $\frac{c_p}{R} = \frac{\Delta W}{\Delta \lambda} \frac{T_0}{\Delta T P_0}$  и произведите усреднение.

Произведите описанные измерения при иных значениях параметров из пункта 2 (не менее трех).

Данные запишите в таблицу и оформите графически зависимость  $\frac{c_p}{R} \Delta\lambda$

### Контрольные вопросы:

1. Что такое теплоемкость газов?
2. Начала термодинамики.
3. Чему равно теоретическое значение  $c_p/R$  ?
4. Насколько сильно (и почему) могут различаться значения  $c_p/R$  в разные времена года?

### Список литературы

1. А.К. Кикоин, И.К. Кикоин. «Молекулярная физика», М. 1976, с. 107-116;
2. Сивухин Д.В. «Общий курс физики», т. 2, М. 1990
3. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М., «Курс общей физики, Механика и молекулярная физика»
4. **А.Н. Матвеев. Молекулярная физика. М.:Высшая школа, 1981.**
5. Р.В. Телеснин. Молекулярная физика. Изд.2-е, дополненное. М. Высшая школа, 1973.



(Комплекс ЛКТ-2)  
Упражнение 19

Определение коэффициента поверхностного натяжения жидкости

**Цель работы:** определение коэффициента поверхностного натяжения жидкости в диапазоне температур.

Краткая теория

Явление поверхностного натяжения внешне чаще всего проявляется в том, что поверхности жидкости проявляют свойства пленки, стягивая объем жидкости, например в каплю, не давая выливаться жидкости из наполненного даже выше краев сосуда. Отсюда и происхождение названия. По мере наблюдений мы замечаем и другие, более сложные свойства этой "пленки". Например, то, что упругость пленки не растет и не изменяется по мере роста или уменьшения поверхности. Это отличает ее свойства от свойств упругих пленок. Оплывание со временем острых краев даже твердых тел (стекла, стали, и др.) показывает, что явление поверхностного натяжения присуще не только жидкостям, но и вообще всем телам. Современные представления о свойствах поверхностей еще далеко не полны. Однако интерес последних лет резко возрос, а знания существенно обогатились в связи с развитием нанотехнологий.

Механизм действия явления поверхностного натяжения связан с тем, что все атомы и молекулы испытывают, как известно, силу притяжения, нарастающую по мере сближения, почти до их классического радиуса. Однако наличие множества соседей приводит к тому, что силы, действующие на каждый атом внутренних областей тела со стороны их объемного окружения, взаимно компенсируются. Тогда как сумма сил, действующих на атомы поверхности, не компенсируется, а получает составляющую, затягивающую атом по возможности в глубину тела (на фоне хаотического движения). При этом, поверхностный атом тянет за собой соседние атомы поверхности. А это и порождает силу сопротивления поверхностных атомов внешним усилиям по увеличению поверхности, то есть "вытаскиванию" новых атомов из глубины тела – **силу поверхностного натяжения.**

Для теоретического описания этого обстоятельства можно использовать различные подходы. Один из них состоит в том, чтобы оценить потенциальные энергии взаимодействия внутренних и внешних атомов. Так, известно, что потенциальная энергия сил притяжения тел всегда отрицательна. Достаточно вспомнить выражения для энергии гравитационного взаимодействия

$$U_{г\ddot{o}} = -G \frac{m_1 m_2}{r^2} \quad \text{или} \quad \text{электростатиче-}$$

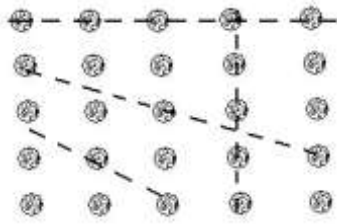
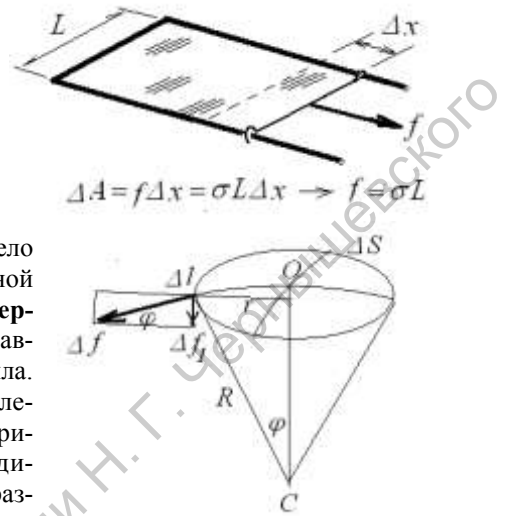
ского взаимодействия  $U_{э\ddot{o}} = -\frac{1}{4\pi \epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r^2}$ . Конкретную формулу энергии взаимодействия таких слож-

ных систем, как атомы или молекулы написать сложно, однако она тоже будет отрицательной. Обозначим ее  $U_{\ddot{o}} = -U_1$ . Тогда, для **внутреннего атома**, имеющего  $N_{внутр}$  соседей, его энергия взаимодействия будет равной  $U_{\ddot{o}, \text{внутр}} = -U_1 \cdot N_{\text{внутр}}$ . У каждого **внешнего атома** соседей почти вдвое меньше и его энергия будет большей, чем у каждого из внутренних атомов  $U_{\ddot{o}, \text{вн}} = -U_1 \cdot N_{\text{вн}}$ . Таким образом, **поверхностные атомы активнее внешних.** Сумма поверхностных энергий всех атомов поверхности составляет т.наз. поверхностную энергию. Ее значение на рассматриваемой в конкретной задаче поверхности будет пропорционально этой поверхности тела.  $U_{\text{поверх}} = -\alpha \cdot S_{\text{поверх}}$ , где  $\alpha$  – коэффициент пропорциональности. В современных нанотехнологиях для увеличения активности вещества (моющего, поглощающего, химических препаратов) стремятся измельчить его до состояния, при котором поверхностная энергия частиц станет сравнимой, или даже больше значения пассивной внутренней энергии этих частиц. При попытке увеличить поверхность вещества (например, растянуть пленку мыльного пузыря) на  $\Delta S$  мы окажемся перед необходимостью совершить дополнительную работу внешними силами. Эта работа равна:  $\Delta A = -\Delta U_{\text{поверх}} = \sigma \cdot \Delta S_{\text{поверх}}$ . Записанная формула и является определением **коэффициента поверхностного натяжения**, описывающего свойства вещества в эффекте поверхностного натяжения. Размерность этого коэффициента Н/м. Распространенные обозначения коэффициента  $\alpha$  или  $\sigma$ .



Так, коэффициент поверхностного натяжения для воды при 0°C равен 0,072Н/м (72мН/м). Уже при 60°C значение коэффициента падает до 66мН/м. Коэффициент поверхностного натяжения для ртути примерно 470мН/м в широком интервале температур, а например для ацетона, спирта, керосина составляет 22...30мН/м.

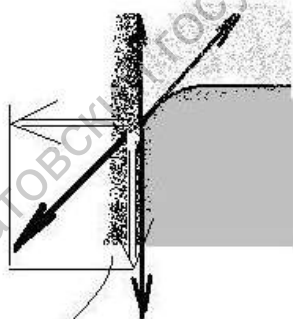
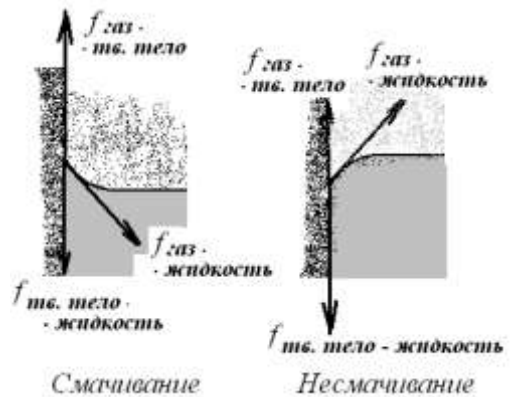
Вид размерности коэффициента поверхностного натяжения (сила, отнесенная к длине) позволяет получить другую формулу  $f = \alpha \cdot L_{\text{адиабол на}}$ , часто более подходящую для анализа многих практических ситуаций. Ее вывод становится ясным из рисунка, описывающего один из подобных опытов по растяжению пленки жидкости с помощью подвижной рамки.



Коэффициент поверхностного натяжения в таблицах приводят обычно лишь для жидкостей. Дело в том, что значение поверхностной энергии для кристаллического твердого тела различно для разных направлений скола поверхности кристалла. Действительно, в различных направлениях расстояние между атомами кристалла различно, тогда как в жидкой фазе это расстояние в среднем одинаково, из-за относительно слабой связи между атомами, потоянно разрушаемой тепловым движением.

Особенно ярко проявляется явление поверхностного натяжения на границах контакта сред, например, у стенок сосуда с жидкостью. Здесь часто проявляется контакт поверхностей трех сред: жидкости, стенок и газа (или другой жидкости, налитой поверх первой). Каждая из трех сред имеет свою поверхность. В результате атомы каждой из сред испытывают силы со стороны атомов трех типов, и тогда граница раздела приобретает некоторую равновесную форму – мениск (см. рис. для примера "газ – жидкость – твердое тело"). Здесь, в зависимости от соотношения сил, различают смачивающиеся и несмачивающиеся пары "жидкость-поверхность". Как видим, явление смачивания непосредственно связано с явлением поверхностного натяжения и имеет ту же физическую природу. Тем не менее, проявления смачивания приводит к эффектам, действующим в природе в интересных и важных ситуациях.

Так, если в ситуации несмачивания рассмотреть силу, действующую, в соответствии с третьим законом динамики, на весь объем жидкости (см. рис.), то легко понять, что составляющая силы, направленная внутрь жидкости (под выпуклым мениском), создает давление, дополнительное к гидростатическому. Это давление дополнительно сжимает жидкость (или газ, например, в пузыре на поверхности жидкости). А в случае смачивания (вогнутый мениск) – даже растягивает жидкость, заставляя ее подниматься вдоль смачивающей стенки.



Составляющая поверхностной силы, действующая на массу жидкости

Получим формулу, позволяющую вычислить значение дополнительного давления (формула Лапласа). Выделим малый сферический сегмент  $\Delta S$ , например, на **выпуклом** мениске жидкости (см. рис.). Силы поверхностного натяжения, приложенные к контуру этого сегмента на каждом участке границы касательны к сферической поверхности. Рассмотрим силу  $\Delta f$  на элементе контура  $\Delta l$ . Ее составляющая, действующая на массу жидкости равна  $\Delta f_1 = \alpha \cdot \Delta l \cdot \sin \varphi$ .

Такие же силы, приложены к другим элементам контура. Этот контур есть окружность радиуса  $r$  поэтому результирующая сила, приложенная к границе участка поверхности будет равна сумме всех этих элементарных сил:

$$f_1 = \alpha \cdot 2 \pi r \cdot \sin \varphi = \alpha \cdot 2 \pi r \cdot \frac{r}{R}$$

Значение избыточного давления получим, разделив эту силу на площадь той части мениска, которая ограничена поверхностью контура, то есть на  $\pi R^2$ . Получим  $\Delta p = \frac{2\alpha}{R}$

Для случая несферической поверхности эта формула приобретает вид :

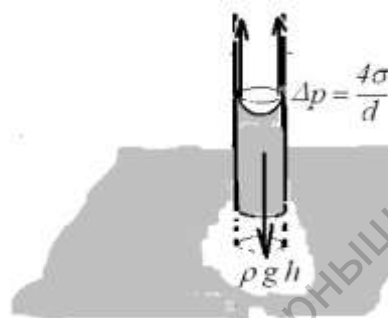
$$\Delta p = \alpha \cdot \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right), \text{ где } R_1 \text{ и } R_2 - \text{ радиусы кривиз-}$$

ны мениска в двух произвольных, но перпендикулярных друг другу в сечениях.

Одним из опытов по определению коэффициента относительного взаимного натяжения для пары металл – вода мы воспользуемся в данной работе.

Опустим капилляр в жидкость. В смачиваемом капилляре поверхность поднимается вверх до уровня, на котором сумма давлений окажется равной нулю. Из рисунка видно, что давления над поверхностью мениска и под ней ее сравниваются, когда выполняется соотношение

$$\rho g h = \frac{4\alpha}{d}.$$



### ВНИМАНИЕ!

Описанные в данном пособии работы физического практикума выполняются на рабочих местах Лабораторного комплекса (ЛКТ-2 – термодинамика и молекулярная физика), разработанного и изготовленного в Московском инженерно-физическом институте (ИТЦ "Владис").

Комплекс предназначен для выполнения на нем около 20-ти различных упражнений по темам курса "Молекулярная физика и термодинамика".

Одна часть этого комплекса (каркас с электропитанием и ящиками, датчики температуры, соединительные кабели или провода, измерительная система и др.) является общей для всего комплекса и используется во всех работах.

Другая часть (баллоны с различными штуцерами, печь-термостат, резонатор, реометр, калориметр, принадлежности и проч.) – используется по специально объявленному назначению.

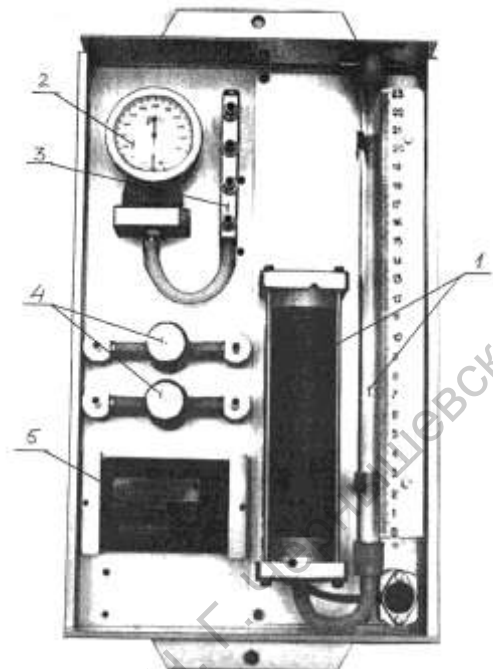
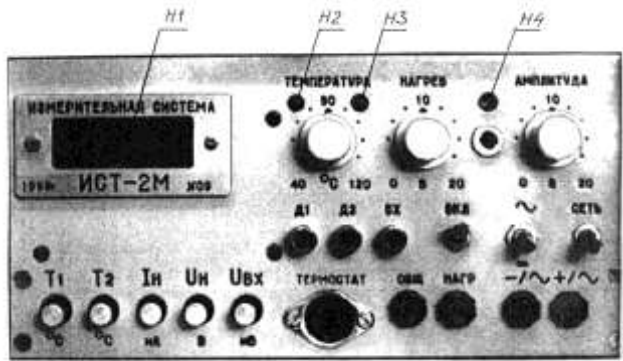
При подготовке к отчету перед выполнением работ по конкретной теме, Вам необходимо: изучить теоретическую часть данного упражнения (описание явления, метод конкретного измерения, рабочая формула, представления о методике обработки результатов эксперимента)

внимательно ознакомиться с инструкцией к измерительной системе комплекса и детально (по пунктам) освоить работу на той части комплекса, с соответствующими аксессуарами (калькулятор, мультиметр, кабели, штангенциркуль и т.п.), которая необходима вам для выполнения данного упражнения и которую вам предстоит использовать.

**Состояние остальной, не знакомой Вам, части комплекса  
изменять не следует**

## Рабочая формула

Для проведения эксперимента используется следующая схема измерения с использованием автоклава, в который залита вода выше нижнего торца капилляра (см. рис). Здесь  $h_5$  - координата нижнего торца капилляра,  $h$  - координата стабилизированного уровня жидкости. При уменьшении давления в верхней полости автоклава уровень воды в мерной трубке уменьшается. Это происходит до тех пор, пока из капилляра



в жидкость не начнут выделяться пузырьки воздуха. В этом случае положение уровня воды в мерной трубке стабилизируется. Определив координату  $h$  этого стабилизированного уровня, коэффициент

поверхностного натяжения рассчитывается по формуле 
$$\alpha = \frac{d}{4} \rho g (h_5 - h)$$
,

где  $\rho$  - плотность жидкости,  $g$  - ускорение свободного падения,  $d$  - диаметр капилляра (для смачивающей жидкости – внутренний, для несмачивающей – внешний).

## Экспериментальная установка

Для проведения измерений используются:

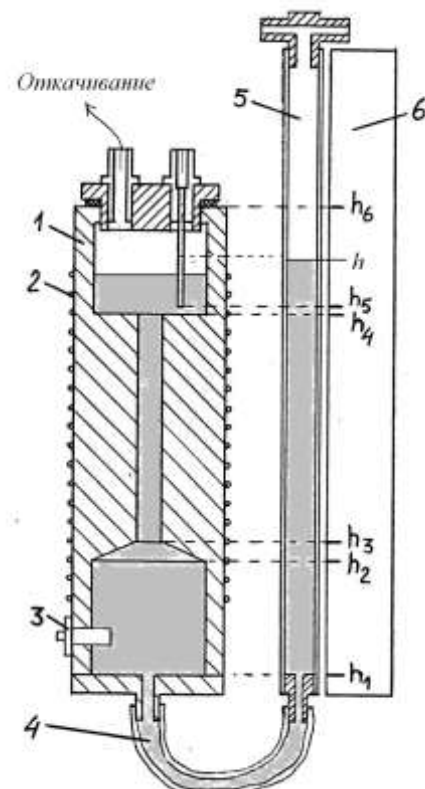
а) модуль ГАЗ-ЖИДКОСТЬ. На рис. 2 цифрами отмечены основные элементы модуля: 1- автоклав с мерной трубкой и отсчетной линейкой; **Манометр 2** и разветвитель **3** с четырьмя штуцерами (в данной работе не используются!);

б) измерительная система ИСТ-2М.

Цифрами отмечены следующие основные элементы системы, используемые при проведении измерений:

1- цифровой индикатор, отображающий измеряемое (текущее) значение температуры;

2- регулятор установки температуры автоклава «ТЕМПЕРАТУРА» в пределах  $40-120^{\circ}C$ . Для контроля режима термостатирования используется два индикатора И1, И2. Если горит индикатор И1 (красный), то текущая температура автоклава меньше или больше температуры установленной регулятором «ТЕМПЕРАТУРА». Если кроме И1 горит зеленый индикатор



И2 , то автоклав переходит в режим термостатирования и его температура будет поддерживаться постоянной около значения установленного регулятором «ТЕМПЕРАТУРА». Точное значение температуры автоклава отображается на цифровом индикаторе 1.

- 3- ручка регулировки напряжения питания нагревателя автоклава в пределах от 0 до 20 В.
- 4- тумблер включения нагревателя автоклава. При поднятой рукоятке (положение «ВКЛ») подается напряжение на нагревательный элемент автоклава.
- 5- тумблер включения измерительного блока в сеть.
- 6- разъем «ТЕРМОСТАТ» для подключения измерительного блока к автоклаву.

**Внимание:** При проведении измерений кнопка Т<sub>1</sub> должна быть нажата, а кнопка Т<sub>2</sub> - отжата. Остальные кнопки и разъемы в данной работе не используются.

в) комплект заглушек для штуцеров

г) комплект дросселей (рис. 3). Каждый дроссель имеет номер, совпадающий с числом канавок на штуцере. Так штуцер №1 имеет одну канавку, штуцер №2 – две канавки и т.д.

д) Резиновая груша со шлангом.

#### Подготовка экспериментальной установки к измерениям

*Внимание: сборка и разборка экспериментальной установки производится только при выключенном сетевом питании!*

- 1) Выверните заглушку на верхнем торце автоклава.
- 2) Проверьте отсутствие заглушек в верхней части мерной трубки.
- 3) С помощью мензурки и воронки залейте в автоклав исследуемую жидкость до уровня 101-105 мм по отчетной линейке.
- 4) Вместо заглушки автоклава установите блок дросселей, **аккуратно** (чтобы не погнуть дроссели-капилляры!) ввернув его по часовой стрелке до упора.
- 5) Установите заглушки на дроссели с номерами №1 и №3.
- 6) Соедините кабелем разъемы автоклава и измерительного блока (разъем 6 (рис. 2) и разъем «Термостат».

#### Проведение измерений

1. Включите питание измерительного блока (тумблер «Сеть»). На цифровом индикаторе должно отображаться значение температуры автоклава.

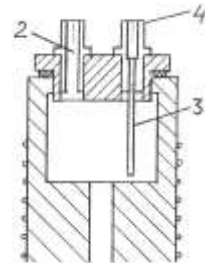
2. Предварительно сжав грушу, наденьте шланг на штуцер дросселя №0.

3. Медленно (!) отсасывайте воздух из автоклава до тех пор, пока из капилляра в жидкость не начнут выделяться пузырьки воздуха. Этот момент определяется по движению жидкости в мерной трубке: в начале отсасывания уровень опускается, а при выделении пузырьков воздуха уровень стабилизируется.

4. Определите координату  $h$  этого стабилизированного уровня. Проведите измерения этой координаты не менее пяти раз (!) и найдите среднее значение  $\langle h \rangle$ .

5. По расчетной формуле определите значение коэффициента поверхностного натяжения жидкости для комнатной температуры.

6. Проведите аналогичные измерения для температур жидкости 50°C, 70°C, 85°C. Для этого установите регулятором «Температура» измерительной системы (поз. 2, рис.2) необходимую температуру. Регулятор нагрева (поз. 3, рис.2) установите на значение из диапазона 14-16 В. Включите нагрев автоклава тумблером «Вкл» (поз. 4, рис.2). Нагрев проводится до тех пор пока не наступит режим термоста-



тирования (загорится зеленый индикатор И2). После этого фиксируются показания температуры Т и проводятся измерения.

7. Результаты измерений и параметры капилляра оформите в виде таблицы 1. Сравните полученные результаты с известными по справочникам.

Таблица 1

$d = \underline{\hspace{2cm}}$  мм,  $h_k = 98$  мм,  $\rho = 1,00$  г/см<sup>3</sup>

$T, ^\circ C$				
$h, мм$				
$P, мм H_2O$				
$\alpha, мН/м$				

По завершению измерений: выключите нагрев автоклава, регуляторы «ТЕМПЕРАТУРА» и «НАГРЕВ» установите в крайнее левое положение. Дождитесь охлаждения автоклава до температуры 40-50<sup>0</sup> С, выключите измерительный блок, отсоедините все шланги и заглушки. Вместо блока дросселей установите заглушку автоклава.

### Литература

1. Сивухин Д.В. Общий курс физики. Термодинамика и молекулярная физика. – М.: Наука, 1990, т.2, § 106-109, с. 438-469

## СОДЕРЖАНИЕ

Комплекс ЛКТ-9 Упражнение 5.	Определение удельной теплоты парообразования воды.	3
Комплекс ЛКТ-2	Описание комплекса	5
Комплекс ЛКТ-2 Упражнение 1	Определение значения величины мощности, теплоемкости и КПД нагревателя печи-термостата	10
Комплекс ЛКТ-2 Упражнение 2	Определение мощности потерь печи-термостата при стабилизированной температуре печи	13
Комплекс ЛКТ-2 Упражнение 3	Определение теплоемкости металлов	16
Комплекс ЛКТ-2 Упражнение 4	Определение теплоемкости и теплоты парообразования жидкости	24
Комплекс ЛКТ-2 Упражнение 5	Кривая фазового равновесия воды.	32
Комплекс ЛКТ-2 Упражнение 6.	Определение удельной теплоты плавления и приращение энтропии	39
Комплекс ЛКТ-2 Упражнение 7	Определение теплоемкости воздуха при постоянном давлении по истечению из капилляра	45
Комплекс ЛКТ-2 Упражнение 19	Определение коэффициента поверхностного натяжения жидкости	49
	Содержание	55