

ИНСТИТУТ ФИЗИКИ  
КАЗАНСКОГО (ПРИВОЛЖСКОГО) ФЕДЕРАЛЬНОГО УНИВЕРСИТЕТА  
Кафедра общей физики

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ЗАДАЧИ  
ОБЩЕГО ФИЗИЧЕСКОГО ПРАКТИКУМА  
ПО МОЛЕКУЛЯРНОЙ ФИЗИКЕ и ТЕРМОДИНАМИКЕ**

Фазовые переходы. Тепловые машины.

Казань – 2019

УДК 530.10  
ББК 22.36  
Э 41

Печатается по рекомендации  
Учебно-методической комиссии  
Института Физики  
Казанского (Приволжского) федерального университета

Составители:  
профессор кафедры общей физики Ерёмина Р.М.  
доцент кафедры общей физики Скворцов А.И.  
доцент кафедры общей физики Налетов В.В.  
доцент кафедры общей физики Захаров Ю.А.

Рецензент – В.А.Уланов, д.ф.-м.н., профессор кафедры промышленной электроники Казанского государственного энергетического университета

Э 41 Экспериментальные задачи общего физического практикума по молекулярной физике и термодинамике. Фазовые переходы. Тепловые машины:/ сост. Р.М. Ерёмина, А.И. Скворцов, В.В. Налетов и др.-Казань: Казан.ун-т, 2019.-64с.

Методическое пособие «Экспериментальные задачи общего физического практикума по молекулярной физике и термодинамике. Фазовые переходы. Тепловые машины » предназначено для студентов естественно-научных специальностей университетов. Приводятся описания лабораторных работ физического практикума общего курса физики, раздел «Молекулярная физика и термодинамика», по теме «Фазовые переходы. Тепловые машины». В каждой работе даны подробные описания установок, ход выполнения работ и список вопросов для самостоятельной подготовки.

УДК 530.10  
ББК 22.36  
Э 41

©Казанский университет, 2019

## СОДЕРЖАНИЕ

231.1 ОПРЕДЕЛЕНИЕ СКРЫТОЙ ТЕПЛОТЫ ИСПАРЕНИЯ ВОДЫ.....	4
231.2 ОПРЕДЕЛЕНИЕ УДЕЛЬНОЙ ТЕПЛОТЫ ПЛАВЛЕНИЯ ЛЬДА.....	8
232. НАБЛЮДЕНИЕ ФАЗОВОГО ПЕРЕХОДА ЖИДКОСТЬ-ГАЗ В КРИТИЧЕСКОЙ ТОЧКЕ .....	11
235. Понижение точки замерзания воды.....	17
236. ПОЛУЧЕНИЕ ТРОЙНОЙ ТОЧКИ АЗОТА .....	22
237. ИЗУЧЕНИЕ ПСИХРОМЕТРА	25
238. ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫЙ ТЕРМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ (ИЗУЧЕНИЕ ФАЗОВЫХ ПЕРЕХОДОВ I-ГО РОДА В КРИСТАЛЛАХ).	29
241.1 ПРЕВРАЩЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ В ТЕПЛОТУ .....	34
241.2 ПРЕВРАЩЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ В ТЕПЛОВУЮ ЭНЕРГИЮ.....	39
242. 1. ФРИКЦИОННЫЕ ПОТЕРИ В ДВИГАТЕЛЕ, РАБОТАЮЩЕМ НА НАГРЕТОМ ВОЗДУХЕ	42
242.2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ПОЛЕЗНОГО ДЕЙСТВИЯ ДВИГАТЕЛЯ НА ГОРЯЧЕМ ВОЗДУХЕ, РАБОТАЮЩЕГО КАК НАГРЕВАТЕЛЬ	46
242.3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ПОЛЕЗНОГО ДЕЙСТВИЯ ДВИГАТЕЛЯ НА ГОРЯЧЕМ ВОЗДУХЕ, РАБОТАЮЩЕГО КАК ХОЛОДИЛЬНИК	52
242.4. PV ДИАГРАММА ДВИГАТЕЛЯ, РАБОТАЮЩЕГО НА НАГРЕТОМ ВОЗДУХЕ	58
243. ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМОВ ТЕПЛОВОГО НАСОСА .....	62
КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ	66

## 231.1 ОПРЕДЕЛЕНИЕ СКРЫТОЙ ТЕПЛОТЫ ИСПАРЕНИЯ ВОДЫ

### Введение

При передаче теплоты веществу при постоянном давлении, температура вещества, как правило, возрастает. Если, в процессе передачи происходит фазовый переход, температура не повышается, так как передаваемое количество теплоты тратится на фазовое превращение. К таким переходам относятся *фазовые переходы первого рода*. Как только фазовый переход закончен, температура снова возрастает, если нагревание продолжается. Примером фазового перехода первого рода является испарение. Энергия, потребляемая на испарение единицы массы вещества, называется *удельной теплотой испарения*  $Q_V$ .

В лабораторной работе, величина удельной теплоты испарения воды определяется по конденсации чистого пара в калориметре. Пар нагревает холодную воду до температуры смеси  $\vartheta_M$  и конденсируется в воду, в свою очередь, охлаждаясь до температуры смеси. Теплота испарения передается воде. В дополнение к температуре смеси, начальная температура  $\vartheta_2$  и масса  $m_2$  холодной воды, а также масса  $m_1$  конденсированной воды измеряются. Используя эти данные можно найти теплоту, израсходованную на испарение, а, следовательно, и удельную теплоту испарения.

Теплота, выделяемая паром является суммой теплоты:

$$\Delta Q_1 = c \cdot m_1 (100^\circ\text{C} - \vartheta_M) \quad (1)$$

( $c$  – удельная теплоемкость воды), которую сконденсированная вода выделяет, охлаждаясь с  $100^\circ\text{C}$  до температуры смеси  $\vartheta_M$ , и теплоты  $\Delta Q_2$ , которая выделяется в процессе конденсации пара в воду. Последняя, равна количеству теплоты, которое необходимо передать воде при температуре  $\vartheta_1 \approx 100^\circ\text{C}$  для того чтобы её вновь испарить, следовательно:

$$\Delta Q_2 = m_1 \cdot Q_V \quad (2)$$

Теплота, которая поглощается холодной водой при смешивании с паром, определяется:

$$\Delta Q_3 = c \cdot m_2 (\vartheta_M - \vartheta_2) \quad (3)$$

В тоже время, теплоту, которую поглощает калориметр, можно рассчитать, поскольку водяной эквивалент массы калориметра  $m_K$  известен:

$$\Delta Q_4 = c \cdot m_K (\vartheta_M - \vartheta_2) \quad (4)$$

где  $m_K = 24\text{г}$ . Так как выделяемое количество теплоты  $\Delta Q_1 + \Delta Q_2$  и поглощаемое количество теплоты  $\Delta Q_3 + \Delta Q_4$  равны между собой, получаем:

$$\frac{Q_V}{c} = \frac{m_2 + m_K}{m_1} (g_M - g_2) - (100^\circ\text{C} - g_M). \quad (5)$$

---

### **Цель работы**

- ✓ Измерить удельную теплоту испарения воды

---

### **Решаемые задачи**

- ✓ Измерение температуры с помощью термопары
- ✓ Использования калориметра для измерения теплоты
- ✓ Наблюдение фазового перехода первого рода

---

### **Экспериментальная установка**

#### **Приборы и принадлежности**

- ✓ калориметр (сосуд Дьюара)
- ✓ водоотделитель
- ✓ температурный датчик (термопара NiCr-Ni)
- ✓ цифровой термометр или Mobile-CASSY с адаптером
- ✓ лабораторные весы 610г
- ✓ парогенератор
- ✓ силиконовая трубка
- ✓ лабораторный штатив с V-образным основанием
- ✓ два штативных зажима
- ✓ два универсальных зажима
- ✓ лабораторный стакан, 400мл

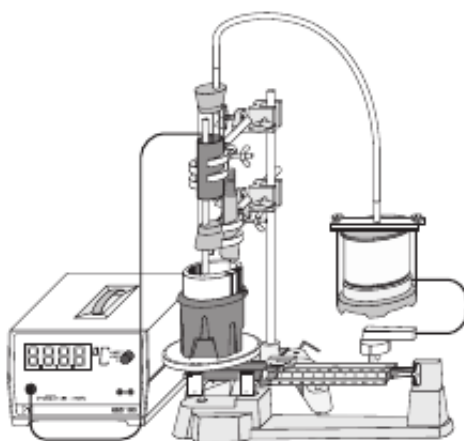


Рис. 1 Схема экспериментальной установки для определения удельной теплоемкости воды

---

### **Порядок выполнения работы**

#### **Требования безопасности при использовании сосуда Дьюара**

- ✓ Сосуд Дьюара является тонкостенным, вакуумированным стеклянным сосудом, который может быть разбит в результате механического воздействия.

- ✓ Не ударяйте и не роняйте сосуд Дьюара
- ✓ Не позволяйте каким-либо твердым предметам падать на поверхность или во внутрь сосуда
- ✓ Не царапайте стеклянную поверхность острым предметом

---

#### *Подготовка установки к работе*

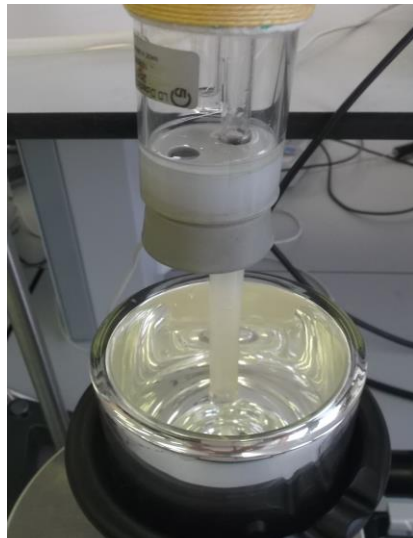
Откройте крышку парогенератора. Заполните дистиллированной водой парогенератор на высоту около 4см. Накройте крышкой и тщательно закрепите зажимным устройством.



---

#### *Выполнение измерений*

1. Выставьте нулевой отсчет на весах (в случае, если весы сбиты).
2. Поставьте сосуд Дьюара на весы и определите массу пустого сосуда.
3. Налейте приблизительно 150г дистиллированной воды в сосуд Дьюара. Определите массу воды  $m_2$  и её температуру  $\vartheta_2$ . Для определения температуры используется термомпара.
4. Пробно закрепите водоотделитель так, чтобы выходная трубка была на 1см выше середины сосуда Дьюара.



5. Налейте воды в парогенератор! Включите парогенератор в сеть. В нижней части парогенератора поставьте выключатель на цифру 4.
6. Опустите датчик температуры в сосуд Дьюара.



7. Дождитесь появления пара на выходе водоотделителя. Далее опустите водоотделитель так, чтобы выходная трубка была приблизительно на 0.5-1 см погружена в воду в сосуде Дьюара.
8. Пронаблюдайте увеличение общей массы и повышения температуры.
9. После того как общая масса увеличится на 20г, выключите парогенератор и быстро определите температуру смеси.
10. Поднимите водоотделитель выше уровня воды в сосуде Дьюара.

---

### Обработка и представление результатов

Используя формулы (1-5), определите удельную теплоту парообразования воды, сравните

с табличным значением.  $Q_V = 2.257 \cdot 10^3 \text{ кДж/кг}$

(водяной эквивалент массы калориметра  $m_K = 24 \text{ г}$ ;  $c_v = 4.19 \text{ кДж/кг К}$ )

## 231.2 ОПРЕДЕЛЕНИЕ УДЕЛЬНОЙ ТЕПЛОТЫ ПЛАВЛЕНИЯ ЛЬДА

### Введение

При передаче теплоты веществу при постоянном давлении, температура вещества, как правило, возрастает. Если, в процессе передачи происходит фазовый переход, температура не повышается, так как передаваемое количество теплоты тратится на фазовое превращение. К таким переходам относятся *фазовые переходы первого рода*. Как только фазовый переход закончен, температура снова возрастает, если нагревание продолжается. Известным примером фазового перехода первого рода является превращение воды в лед. Энергия, потребляемая на плавление единицы массы вещества, называется *удельной теплотой плавления*  $Q_S$ .

В лабораторной работе, величина удельной теплоты плавления льда определяется по изменению температуры при смешивании льда и воды в калориметре. Лёд охлаждает воду до температуры теплового равновесия  $\vartheta_m$  и тает при температуре  $\vartheta_m$ . Происходит скрытое поглощение теплоты при таянии льда. Проводя измерения температуры смеси  $\vartheta_m$ , начальной температуры  $\vartheta_2$ , массы  $m_2$  теплой воды, а также массу  $m_1$  льда, можно определить удельную теплоту плавления льда. Так как лёд, массой  $m_1$  полностью тает, то теплота, которая необходима для нагревания талой воды от температуры  $\vartheta_1 \approx 0^\circ\text{C}$  до температуры смеси  $\vartheta_m$  определяется выражением:

$$\Delta Q = c \cdot m(100^\circ\text{C} - \vartheta_m). \quad (1)$$

Теплота, которая выделяется при таянии льда равна:

$$\Delta Q_2 = m_1 \cdot Q_V. \quad (2)$$

Теплота, которая выделяется при охлаждении налитой предварительно в калориметр воды массой  $m_2$  определяется:

$$\Delta Q_3 = c \cdot m_2(\vartheta_m - \vartheta_2). \quad (3)$$

Часть энергии выделяется при охлаждении калориметра. Если предположить, что удельная теплоемкость калориметра равна удельной теплоемкости воды, то затраченная теплота рассчитывается по формуле:

$$\Delta Q_4 = c \cdot m_K(\vartheta_m - \vartheta_2), \quad (4)$$

где  $m_K = 24\text{г}$ . Так как выделяемое количество теплоты  $\Delta Q_1 + \Delta Q_2$  и поглощаемое количество теплоты  $\Delta Q_3 + \Delta Q_4$  равны между собой, получаем:

$$\frac{Q_V}{c} = \frac{m_2 + m_K}{m_1}(\vartheta_m - \vartheta_2) - (100^\circ\text{C} - \vartheta_m) \quad (5)$$



---

### **Цель работы**

- ✓ Измерить удельную теплоту плавления льда

---

### **Решаемые задачи**

- ✓ Измерение температуры с помощью термопары
- ✓ Использования калориметра для измерения теплоты
- ✓ Наблюдение фазового перехода первого рода

---

### **Экспериментальная установка**

#### **Приборы и принадлежности**

- ✓ калориметр (сосуд Дьюара)
- ✓ водоотделитель
- ✓ температурный датчик (термопара NiCr-Ni)
- ✓ цифровой термометр или Mobile-CASSY с адаптером
- ✓ лабораторные весы 610г
- ✓ парогенератор
- ✓ силиконовая трубка
- ✓ лабораторный штатив с V-образным основанием
- ✓ два штативных зажима
- ✓ два универсальных зажима
- ✓ лабораторный стакан, 400мл

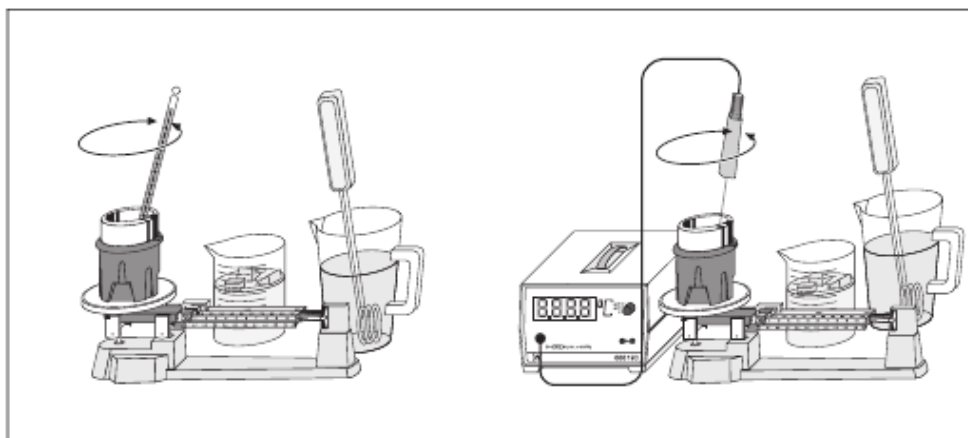


Рис. 1 Схема экспериментальной установки для определения удельной теплоты плавления льда. Слева: измерение температуры с помощью термометра Справа: измерение температуры с помощью датчика температуры

---

### **Порядок выполнения работы**

#### **Требования безопасности при использовании сосуда Дьюара**

- ✓ Сосуд Дьюара является тонкостенным, вакуумированным стеклянным сосудом, который может быть разбит в результате механического воздействия.
- ✓ Не ударяйте и не роняйте сосуд Дьюара
- ✓ Не позволяйте каким-либо твердым предметам падать на поверхность или во внутрь сосуда
- ✓ Не царапайте стеклянную поверхность острым предметом

---

### *Выполнение измерений*

1. Выставьте нулевой отсчет на весах (при условии, что весы сбиты)
2. Поставьте сосуд Дьюара на весы и определите массу пустого сосуда  $m_k$
3. Налейте приблизительно 150г дистиллированной воды в термостойкий стакан и нагрейте воду массой  $m_2$  до температуры между  $40^\circ\text{C}$  и  $50^\circ\text{C}$ .
4. Налейте теплую воду из пластикового стакана в сосуд Дьюара. Определите массу воды  $m_2$  и её температуру  $\vartheta_2$ . Для определения температуры используется термопара.
5. Взвесьте лёд массой  $m_1$  и положите его в теплую воду.
6. Перемешивайте до тех пор, пока лёд не растает, и определите температуру  $\vartheta_m$ .

---

### *Обработка и представление результатов*

1. Используя формулы (1-5), определите удельную теплоту плавления льда. Эксперимент проведите три раза и определите среднюю удельную теплоту плавления льда, сравните с табличным значением
2. Эксперимент проведите три раза и определите среднюю удельную теплоту плавления льда, сравните с табличным значением.

## 232. НАБЛЮДЕНИЕ ФАЗОВОГО ПЕРЕХОДА ЖИДКОСТЬ-ГАЗ В КРИТИЧЕСКОЙ ТОЧКЕ

### Введение

Одной из важных характеристик идеального газа является то, что он не конденсируется, даже если температура достигает абсолютного нуля. Такого газа в природе не существует. В противном случае он должен был бы состоять из частиц, которые малы по сравнению со средними расстояниями между ними даже при низких температурах. А также, которые за исключением упругих столкновений, не взаимодействуют друг с другом.

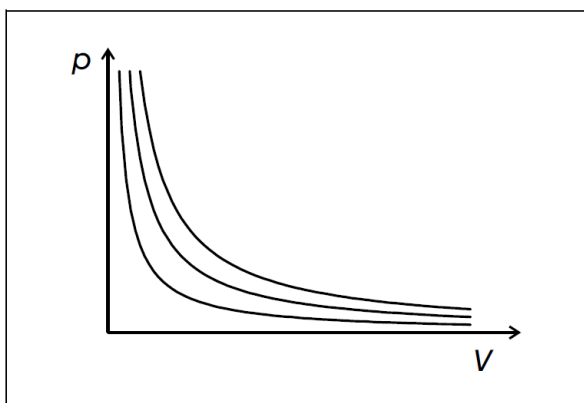


Рис. 1 PV диаграмма с изотермами идеального газа

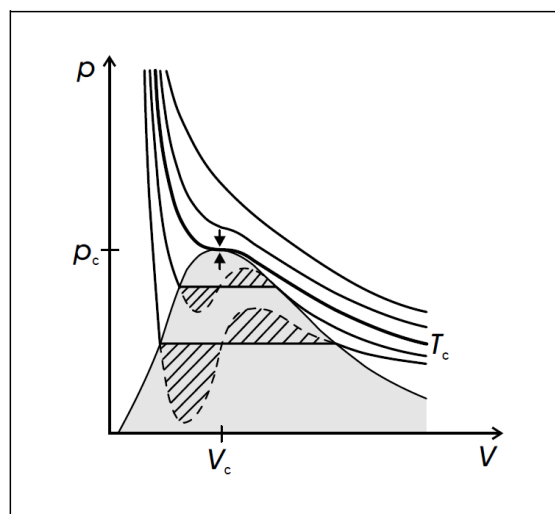


Рис. 2 PV диаграмма с изотермами реального газа. Смеси пар-жидкость существуют в затемненной области диаграммы. Стрелками обозначено положение критической точки.

Когда идеальный газ сжимают при постоянной температуре, давление увеличивается обратно пропорционально объему (см. рис. 1). Отношение между давлением  $p$ , температурой  $T$  и молярным объемом  $V$  идеального газа описывается уравнением состояния идеального газа:

$$pV=RT \tag{1}$$

где  $R = 8.314 \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}}$  – газовая постоянная.

Большинство реальных газов приближаются к свойствам идеального газа тогда, когда их состояние довольно далеко от точки конденсации или сжижения, т. е. при комнатной температуре и атмосферном давлении. Как только газ приближается к точке конденсации, т. е. при повышении давления  $p$  или при понижении температуры  $T$ , его свойства значительно отклоняются от свойств идеального газа. Плотность газа увеличивается, и частицы в среднем располагаются экстремально близко друг к другу. Поведение реального

газа приблизительно описывается уравнением Ван-дер-Ваальса:

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

В этом уравнении, зависящие от вещества, константы  $a$  и  $b$  имеют смысл поправок на взаимное притяжение частиц газа и их эффективный объем.

На Рис. 2 показаны изотермы реального газа в виде  $PV$  диаграммы. Изотерма, к которой может быть проведена горизонтальная касательная в переломной точке, имеет особое значение. Точку перегиба определяют как критическую точку, а величины, связанные с ней, называют: критическим давлением  $p_c$ , критическим молярным объемом  $V_c$  и критической температурой  $T_c$ .

При температурах выше критической вещество находится в газообразном состоянии при любых давлениях и изотермы соответствуют уравнению Ван-дер-Ваальса, которое в этом случае приближается к уравнению состояния идеального газа. Вещество называют газом.

При температурах ниже критической, ситуация намного сложнее. Если объем достаточно большой (рис.2 справа от затененной области), вещество находится в газообразном состоянии, и называется паром. В малых объемах (слева от затененной области), вещество является жидкостью, и она практически несжимаема. Затененная область относится к смеси жидкость-пар в котором объем пара пропорционально увеличивается с лево на право. В этой области уравнение Ван-дер-Ваальса отклоняется от действительности: при постоянной температуре, изменение объема приводит к изменению пропорции пара в смеси, но давление в смеси не изменяется. Пунктирные кривые, которые соответствуют уравнению Ван-дер-Ваальса, должны быть заменены на горизонтальные отрезки. Отрезки соответствуют давлению пара, при котором пар и жидкость находятся в равновесии друг с другом. Жидкость и пар разделяются под действием силы тяжести, так как имеют различные плотности. Плотность пара увеличивается с температурой, в то время как плотность жидкости уменьшается. При критической температуре их плотности одинаковы. Жидкость и пар неразличимы, они полностью перемешаны.

Когда смесь находится в критическом состоянии (точке), рассеяние света в барокамере достигает очень высокого уровня. Этот феномен назван критической опалесценцией и происходит из-за флуктуаций плотности. Флуктуации значительно увеличиваются при приближении к критической точке, потому что сжимаемость сильно возрастает и сопротивление изменению плотности становится слабым. Коротковолновый свет рассеивается значительно сильнее, чем длинноволновый.

Это явление можно наблюдать в барокамере при критической температуре. Оболочка камеры нагревается потоком горячей воды или паром. Два устойчивых к высокому

давлению прозрачных окна позволяют нам наблюдать поведение субстанции внутри барокамеры, когда она достигает критической температуры  $T_c$  при нагревании, и наоборот, когда остывает. Явление может наблюдаться непосредственно в барокамере, либо проецировать на экран.

Барокамера заполнена фторидом серы  $SF_6$ . При комнатной температуре, величина критической плотности  $SF_6$  (обратная величина от критического объема) приблизительно равна усредненному значению плотности жидкости и газа. При комнатной температуре барокамера наполовину наполнена сжиженным газом и таким образом при нагревании система способна пройти через критическую точку.

$SF_6$  имеет следующие значения термодинамических величин в критической точке: критическая температура:  $T_c=318.7$  К, критическое давление:  $p_c=37.6$  Атм и критический молярный объем:  $V_c=200$  см<sup>3</sup>/моль

---

### ***Цель работы***

- ✓ Наблюдение размытия границы раздела фаз между жидкостью и газом при нагревании выше критической температуры
- ✓ Наблюдение образования границы раздела фаз при охлаждении ниже критической температуры
- ✓ Наблюдение критической опалесценции

---

### ***Решаемые задачи***

- ✓ Измерение температуры с помощью термопары
- ✓ Использование оптических приборов для создания изображения физического процесса в проходящем свете
- ✓ Наблюдение фазового перехода первого рода в барокамере

---

### ***Экспериментальная установка***

#### **Приборы и принадлежности**

- ✓ барокамера
- ✓ лампа с фокусирующим объективом
- ✓ трансформатор
- ✓ оптическая скамья
- ✓ линза в держателе
- ✓ прямоугольная призма
- ✓ четыре струбины
- ✓ лабораторный штатив
- ✓ термостат замкнутого цикла
- ✓ резиновые трубки
- ✓ цифровой термометр
- ✓ температурный датчик (термопара NiCr-Ni)

---

## Порядок выполнения работы

### Требования безопасности при работе с барокамерой

- ✓ Для нагрева барокамеры использовать только пар или циркулирующую воду.
- ✓ Во избежание обжога не касаться барокамеры во время эксперимента.
- ✓ Необходимо осторожно проверить выход горячей воды или пара.
- ✓ Перед началом эксперимента проверить надёжность закрепления трубок.
- ✓ Не ослаблять винт-заглушку при повышенном давлении в барокамере.
- ✓ Не нагревать барокамеру выше  $90^{\circ}$ .

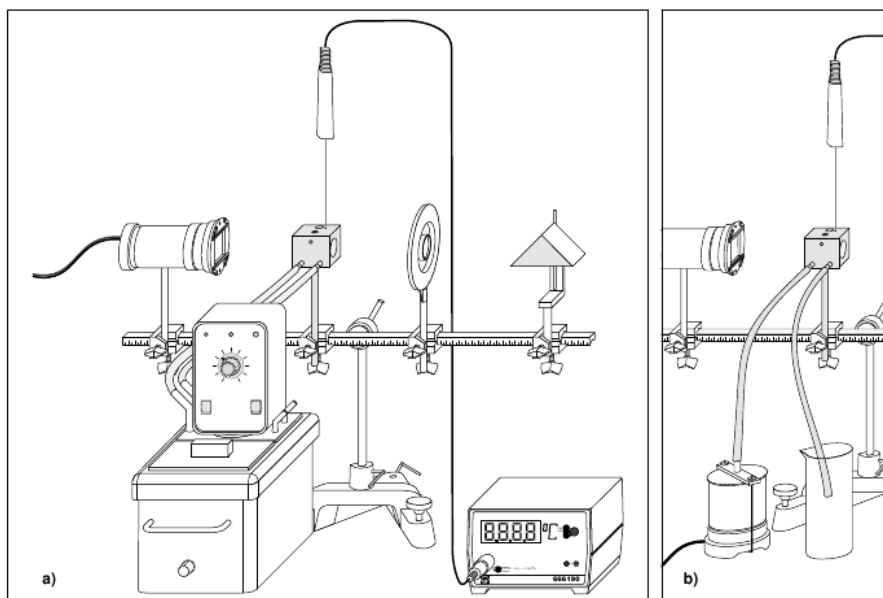


Рис. 3 Экспериментальная установка для наблюдения критической точки

---

### Подготовка установки к работе

1. Проверьте по рис.1а комплектность и правильность сборки экспериментальной установки.
2. Для улучшения теплового контакта добавьте немного воды в отверстие с температурным датчиком.
3. Включите лампу и спроецируйте изображение вещества, заполняющего барокамеру, на экран (например, лист белой бумаги).
4. Сфокусируйте изображение мениска жидкости, передвигая линзу вдоль оптической скамьи.

---

### Выполнение измерений

1. Включите термостат и установите начальную температуру  $40^{\circ}\text{C}$ .
2. После достижения температуры  $40^{\circ}\text{C}$  повышайте температуру циркулирующей воды медленно, чтобы нагрев содержимого барокамеры происходил равномерно. Это позволит отчетливо наблюдать размытие границы раздела фаз.
3. После того, как температура превысит критическое значение, установите температуру

на термостате ниже критической температуры.

4. Чтобы уменьшить отрицательное воздействие температурных градиентов по объему камеры, целесообразно после того, как температура в системе спадёт ниже критической, вновь постепенно увеличить температуру и повторить эксперимент.
5. Как результат вашего наблюдения запишите значение критической температуры.

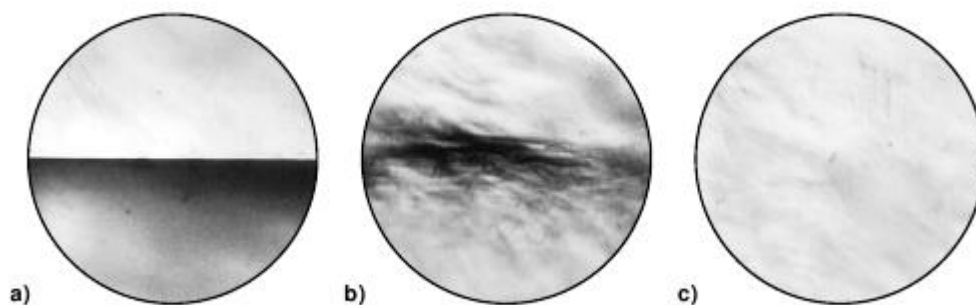


Рис. 2 Наполнение барокамеры:

- а) ниже критической температуры*
- б) при критической температуре (разложение фазовой границы)*
- в) выше критической температуры*

### **Пример наблюдения**

Сразу после начала нагрева, в жидкой фазе появляются прослойки (неоднородности в форме полос). Далее жидкость начинает кипеть, а с верхней части камеры, капать конденсат. Окончательно, появляются прослойки в газовой фазе, особенно на границе. Незадолго до достижения критической точки, кипение становится таким интенсивным, что жидкость, неоднородная вследствие пузырьков газа, рассеивает свет по всем направлениям (диффузно). Это затемняет проецируемое изображение жидкости. Неоднородности становятся более интенсивными, изначально в газовой фазе непосредственно выше границы раздела, затем внутри газовой фазы и, окончательно, в оставшейся жидкой фазе.

Когда система медленно проходит через критическую температуру, фазовая граница между жидкостью и газом начинает флуктуировать, расширяться и, в итоге, исчезает. В последний момент, перед исчезновением границы, жидкая фаза принимает коричневый оттенок. Исчезновение границы между газовой и жидкой фазой можно наблюдать на проецируемом изображении. Изображение становится ярким, как только содержание барокамеры трансформируется в однородную фазу. Тем не менее, в барокамере наблюдается интенсивная турбулентность с прослойками, которая рассеивается при дальнейшем повышении температуры. Эти процессы обусловлены имеющимися в камере градиентами

температуры.

После выключения нагрева, прослойки, почти полностью исчезнувшие, становятся опять отчетливыми при приближении к критической температуре. В нижней части камеры наблюдается небольшое затемнение, обусловленное образованием аэрозоли. Содержимое барокамеры, целиком, становится все более и более красно-коричневым (критическая опалесценция). Прослойки продолжают увеличиваться. Внезапно, внутри барокамеры темнеет, газ конденсируется и наблюдается рост уровня жидкости. Газовая фаза содержит аэрозоль, которая постепенно конденсируется. Окончательно, газовая фаза становится прозрачной, в то время как жидкая фаза продолжает кипеть.

При возобновлении нагрева, жидкость кипит все более и более интенсивно. Далее, газовая фаза становится желтоватой, а жидкая приобретает красно-коричневый цвет (критическая опалесценция). Граница раздела расширяется, затем полностью исчезает. Сразу выше критической температуры, содержимое барокамеры становится однородно желто-коричневым, вместе с интенсивными прослойками и бурной турбулентностью. В итоге, температура выходит из диапазона существования критической опалесценции и в барокамере наблюдаются только вихревые прослойки.



## 235. Понижение точки замерзания воды

### Введение

Условием кристаллизации является равенство давления насыщенного пара растворителя над раствором давлению пара над твёрдым растворителем. Поскольку давление пара растворителя над раствором всегда ниже, чем над чистым растворителем, это равенство всегда будет достигаться при температуре более низкой, чем температура замерзания растворителя. Так, океанская вода начинает замерзать при температуре около минус 2°C. Разность между температурой кристаллизации растворителя  $T_{fr}^0$  и температурой начала кристаллизации раствора  $T_{fr}$  приводит к понижению температуры кристаллизации. Изменение температуры кристаллизации бесконечно разбавленных растворов не зависит от природы растворённого вещества и прямо пропорционально моляльной концентрации раствора  $m$ .

$$T_{fr}^0 - T_{fr} = Km \quad (1)$$

Моляльная концентрация — количество растворённого вещества (число молей) в 1000 г растворителя. Измеряется в [моль/кг]. Поскольку по мере кристаллизации растворителя из раствора концентрация последнего возрастает, растворы не имеют определённой температуры замерзания и кристаллизуются в некотором интервале температур. Коэффициент пропорциональности  $K$  в выражении (1) — это криоскопическая постоянная растворителя, имеющая физический смысл понижения температуры кристаллизации раствора с концентрацией 1 моль/кг. Для воды она равна  $1.86 \text{ К} \cdot \text{моль}^{-1} \cdot \text{кг}$ .

В свойствах смесей есть интересная закономерность: температура плавления смеси нескольких веществ ниже, чем температура плавления каждого из чистых веществ по отдельности. Например, температура плавления чистой воды (в виде льда или снега)  $0^0\text{C}$ . Если смешать лёд с поваренной солью, то смесь начинает плавиться при более низких минусовых температурах. Температура плавления зависит от соотношения льда и соли, скорости перемешивания и даже степени измельчения льда. Самая низкая температура замерзания данного раствора соли называется *криогидратной* температурой (точкой). Для раствора NaCl криогидратная температура минус  $21,2^0\text{C}$  при концентрации 23,1%.

Криоскопическим методом можно определить молекулярную массу вещества. Молекулярная масса — масса молекулы, выраженная в атомных единицах массы, численно равна молярной массе, но, однако, они различаются по размерности.

Для растворов, проводящих электрический ток (электролитов) в отклонение температуры замерзания раствора Вант-Гофф внес поправку, учитывающий диссоциацию молекул растворённого вещества — изотонический коэффициент  $i$ :

$$T_{fr}^{\circ} - T_{fr} = iK m. \quad (2)$$

---

### **Цель работы**

- ✓ Измерить криоскопическую константу воды; молекулярную массу вещества; изотонический коэффициент Вант-Гоффа

---

### **Решаемые задачи**

- ✓ Измерение температуры с помощью термопары
- ✓ Использования прибора для криометрических измерений для измерения температуры замерзания растворов
- ✓ Наблюдение фазового перехода первого рода

---

### **Экспериментальная установка**

#### **Приборы и принадлежности**

- ✓ Мерный цилиндр 100мл
- ✓ Фарфоровая ступка, 113 мм Ш
- ✓ Ванночки для весов
- ✓ воронка
- ✓ Адаптер, конус резьба
- ✓ Цифровой термометр
- ✓ Шпатель, 150 x 5 мм
- ✓ Шпатель с наконечником в виде ложки, 150 x 22 мм
- ✓ Фарфоровый пестик, длина 100 мм
- ✓ Датчик температуры NTC, длинный
- ✓ Аппарат для определения молярной массы - температура застывания
- ✓ Гидрохинон, 250 г
- ✓ Хлорид натрия, 500г
- ✓ Цифровой секундомер
- ✓ Прецизионные электронные весы TE-153

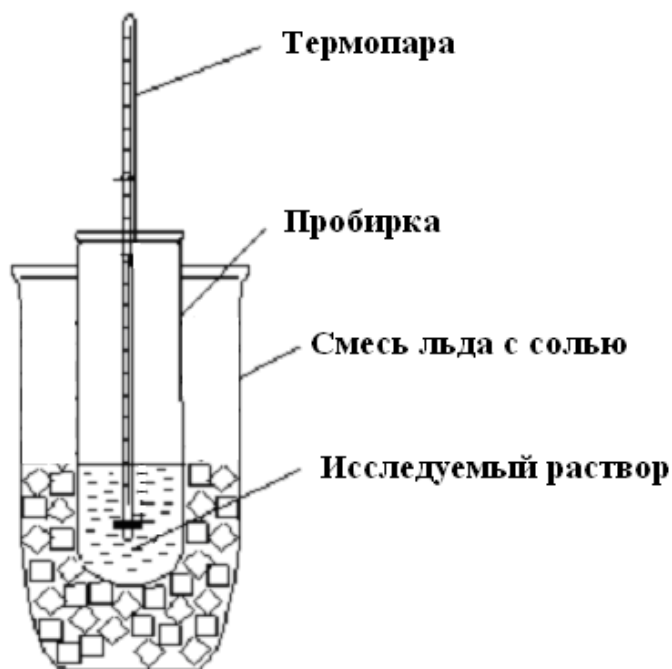


Рис.1. Прибор для криометрических измерений.

### Порядок выполнения работы

#### Требования безопасности при использовании сосуда Дьюара

- ✓ Опасность взрыва: прибор для криометрических измерений является тонкостенным, вакуумированным стеклянным сосудом, который может быть разбит в результате механического воздействия.
- ✓ Не ударяйте и не роняйте прибор
- ✓ Не позволяйте каким-либо твердым предметам падать на поверхность или во внутрь сосуда
- ✓ Не царапайте стеклянную поверхность острым предметом

#### Подготовка установки к работе

Для того, чтобы повысить точность измерений необходимо, чтобы охлаждение исследуемой жидкости происходило как можно медленнее. Для этого служит воздушная прослойка между внешней и внутренней пробирками. При проведении опыта исследуемую жидкость необходимо постоянно перемешивать для её равномерного охлаждения.

Лёд перед проведением эксперимента необходимо измельчить, потом поместить в стеклянный сосуд и смешать с солью.

#### Выполнение измерений

##### **Упражнение 1. Определение криоскопической константы воды**

1. Положите раздробленный лёд в емкость для криометрических измерений, смешайте лёд с солью KCl.
2. Налейте дистиллированную воду в пробирку так, чтобы уровень жидкости не

превышал уровень льда. Осторожно опустите её в прибор и с помощью термопары определите температуру замерзания.

3. Измерьте температуру замерзания заранее приготовленных лаборантом растворов. Для каждого раствора определите температуру замерзания. Для этого налейте раствор в пробирку и определите с помощью термопары температуру замерзания. Пробирку вынимают из льда, осторожно нагревают рукой для расплавления образовавшихся кристаллов льда (при правильном проведении опыта кристаллы должны образовываться в объёме жидкости, а не на стенках пробирки). После того, как все кристаллы расплавились, опыт повторяют. Если разность между первым и вторым полученными значениями  $t_0$  превышает 0.1 С, опыт проводят ещё раз. Проведите измерения для всех готовых растворов.
4. Сосчитайте моляльную концентрацию раствора. Постройте график зависимости измеренной температуры замерзания от моляльной концентрации растворов. По тангенсу угла наклона графика определите криоскопическую константу воды и сравните её с табличным значением.

### **Упражнение 2. Определение молекулярной массы растворенного вещества криоскопическим методом**

1. Приготовьте раствор соли вещества – неэлектролита, молекулярную массу которого надо определить (по указанию преподавателя или лаборанта), предварительно взвесив вещество  $m_1$  и определив объем дистиллированной воды  $V$ . По формуле  $m_2 = \rho \cdot V$ , где  $\rho$  - плотность воды, сосчитайте массу воды.
2. Определите температуру замерзания. Для этого налейте раствор в пробирку и определите с помощью термопары температуру замерзания. Пробирку вынимают из льда и осторожно нагревают рукой для расплавления образовавшихся кристаллов льда (при правильном проведении опыта кристаллы должны образовываться в объёме жидкости, а не на стенках пробирки). После того, как все кристаллы расплавились, опыт повторяют. Если разность между первым и вторым полученными значениями  $t_0$  превышает 0.1 С, опыт проводят ещё раз.
3. Сосчитайте понижение температуры кристаллизации раствора:

$$\Delta t_{кр} = t_{кр}(0\%) - t_{кр}. \quad (3)$$

4. По формуле (4) рассчитайте молекулярную массу растворенного вещества, где  $K$  – криоскопическая константа воды,  $m_1$  – растворенного вещества,  $m_2$  – масса воды:

$$M = K \frac{1000 \cdot m_1}{m_2 \cdot \Delta t_{кр}} \quad (4)$$

5. Сравните полученное значение с табличным. Вычислите относительную ошибку

определения молекулярной массы и предельную погрешность метода.

### Упражнение 3. Определение степени диссоциации электролита криоскопическим методом.

1. Приготовьте раствор соли вещества – электролита (по указанию преподавателя или лаборанта), предварительно взвесив дистиллированную воду и вещество.
2. Определите температуру замерзания. Для этого налейте раствор в пробирку и определите с помощью термометра температуру замерзания. Пробирку вынимают из льда и осторожно нагревают рукой для расплавления образовавшихся кристаллов льда (при правильном проведении опыта кристаллы должны образовываться в объёме жидкости, а не на стенках пробирки). После того, как все кристаллы расплавились, опыт повторяют. Если разность между первым и вторым полученными значениями  $t_0$  превышает 0.1 С, опыт проводят ещё раз.
3. По формуле (3) сосчитайте понижение температуры кристаллизации раствора.
4. По формуле (5) рассчитайте изотонический коэффициент Вант-Гоффа, где  $K$  – криоскопическая константа воды,  $m_1$  – масса растворенного вещества,  $m_2$  – масса воды,  $M$  – молекулярная масса растворенного вещества (табличное значение):

$$i = \frac{m_2 \cdot \Delta t_{кр} \cdot M}{1000 \cdot K \cdot m_1} \quad (5)$$

5. По формуле (6) рассчитайте степень диссоциации электролита.

$$\alpha = \frac{i - 1}{\nu - 1} \quad (6)$$

где  $\nu$  – число ионов, образующихся при диссоциации молекулы электролита.

6. Сравните полученное значение с табличным. Вычислите относительную ошибку определения изотонического коэффициента Вант-Гоффа и предельную погрешность метода.

## 236. ПОЛУЧЕНИЕ ТРОЙНОЙ ТОЧКИ АЗОТА

---

### *Введение*

Если при комнатной температуре заполнить сосуд Дьюара жидким азотом, он будет кипеть. Причем бурное поначалу кипение относительно быстро сменится довольно спокойным. Очевидно, это произойдет после охлаждения внутренних стенок и свободного объема дьюара до температуры жидкого азота. Если из сосуда откачивать газ, то можно утверждать, что внутри дьюара окажется только азот в газообразном и жидком состоянии. При этом «вялое» кипение может рассматриваться как свидетельство того, что газ и жидкость близки к равновесному состоянию. Медленно понижая давление в дьюаре и измеряя при этом температуру и давление, можно установить зависимость давления насыщенных паров азота от температуры, а при некотором значении давления получить равновесное трехфазное состояние азота – тройную точку. Свидетельством достижения этого состояния при медленной откачке является образование в сосуде твердой фазы в виде снега (в некотором смысле – твердого воздуха).

---

### *Цель работы:*

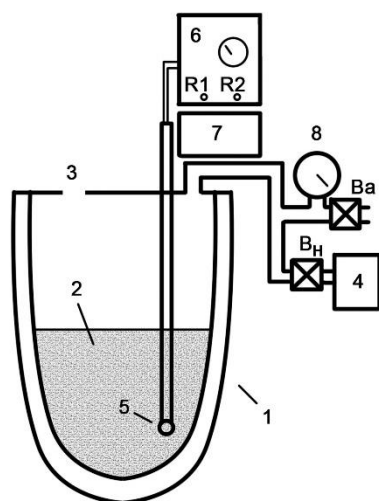
- ✓ Получение равновесного состояния трех фаз азота.
- 

### *Задачи работы:*

- ✓ Знакомство с проблемой исследования равновесных состояний многофазных систем
  - ✓ Измерение зависимости давления насыщенных паров азота от температуры
  - ✓ Измерение скрытой теплоты парообразования азота
  - ✓ Достижение и наблюдение тройной точки азота.
- 

### *Экспериментальная установка*

Схема экспериментальной установки показана на рисунке. Прозрачный сосуд Дьюара 1 заполняется жидким азотом 2 через отверстие в крышке 3, которое затем закрывается пробкой. При заливке азота в дьюар вентиль сообщения с атмосферой  $V_a$  должен быть открыт. Во время откачки паров из дьюара форвакуумным насосом 4 через вентиль  $V_n$  жидкость кипит и интенсивно охлаждается. Для измерения температуры в нее помещен заранее отградуированный кремниевый термодатчик 5 типа КД-103 с блоком питания 6. Электрический ток в его схеме регулируется резисторами  $R_1$  и  $R_2$ , а напряжение регистрируется вольтметром 7. Давление во время опыта измеряется стрелочным вакуумметром 8.



### Ход работы

1. Открыть обе пробки на дьюаре. Открыть вентиль  $B_a$ , а вентиль  $B_n$  закрыть. Под наблюдением инженера залить жидкий азот в дьюар примерно на одну четверть с помощью воронки и плотно закрыть пробки.
2. Включить тумблером блок питания термодатчика и с помощью переменных резисторов  $R_1$  (грубо) и  $R_2$  (точно) установить рабочий ток 2 мкА. Включить вольтметр. Через 1-2 минуты измерить напряжение  $U$  при нулевом показании вакуумметра. (В случае использования цифрового вольтметра для этого необходимо нажать кнопку «Запуск»).
3. Включить форвакуумный насос поворотом выключателя на электрическом щитке. Осторожно приоткрыть вентиль  $B_n$  против часовой стрелки для слабой откачки дьюара, следя за тем, чтобы вакуумметр не зашкаливал (послышится характерное «бульканье» в насосе). Закрыть вентиль  $B_a$ .
4. Регулируя скорость откачки поворотом ручки вентиля  $B_n$ , последовательно добиваться стабильных показаний вакуумметра ( $P$ , дел), указанных в таблице, и записывать соответствующие показания вольтметра ( $U$ , В). При этом внимательно наблюдать за состоянием азота и зафиксировать показания приборов  $P_i$  и  $U$ , в момент появления твердой фазы в дьюаре.

1	$P$ , дел	0	16	34	50	70	80	86	89	92	$P_i =$
2	$P$ , Па										$P_i =$
3	$\ln(P, \text{Па})$										
4	$U$ , В										$U_i =$
5	$T$ , К										$T_i =$

6	$1/T, \text{K}^{-1}$										
7	$S_2 - S_1, \text{Дж}/(\text{К}\cdot\text{моль})$										

---

*Порядок отключения установки.*

После измерений при максимальном вакууме закрыть вентиль  $V_n$  и осторожно напустить воздух в систему, приоткрыв вентиль  $V_a$ . Выключить питание форвакуумного насоса и напустить в него воздух, открыв вентиль  $V_n$ . Выключить блок питания термодатчика и вольтметр.

---

*Обработка данных.*

1. Перевести показания вакуумметра в Паскали (Па).
2. Перевести показания вольтметра в абсолютную температуру ( $T$ ), используя градуировочный график термодатчика (находится на рабочем месте).
3. Полностью заполнить таблицу.
4. Построить график зависимости давления насыщенных паров азота ( $P$ ) от температуры ( $T$ ).
5. Построить полулогарифмический график зависимости давления от температуры в координатах  $\ln(P, \text{Па})$  и  $(1/T)$ . По тангенсу его наклона вычислить скрытую молярную теплоту испарения азота  $L$ .



## 237. ИЗУЧЕНИЕ ПСИХРОМЕТРА

### Введение

Количество водяного пара в воздухе заметным образом влияет на жизнедеятельность организмов и работоспособность техники. Поэтому его измерение является практически важным. Мера количества водяного пара называется влажностью.

Влажность воздуха измеряется в абсолютных и относительных единицах. Абсолютная влажность равна плотности водяного пара, т.е. массе парообразной воды в единице объема воздуха

$$\xi = \frac{m_{в.п.}}{V}.$$

Из уравнения идеального газа

$$P = \nu \frac{RT}{V} = \frac{m}{\mu} \frac{RT}{V}$$

(где  $m$  - масса газа в объеме  $V$ ,  $\mu$  - его молярная масса,  $\nu$  - количество молей,  $R$  - универсальная газовая постоянная) следует, что при данной температуре  $T$  и объеме мерой количества вещества может давление.

Необходимо учитывать, что в воздух представляет собой смесь газов и именно давление смеси можно измерить на опыте. Согласно закону Дальтона общее давление  $P$  в смеси газов (например, в воздухе) равно сумме парциальных давлений ее компонентов  $P_i$ . С учетом уравнения состояния идеального газа можно записать:

$$P = \sum P_i = \frac{RT}{V} \sum \nu_i,$$

где  $\nu_i$  - количество  $i$ -го компонента смеси. Следовательно, парциальное давление паров воды в воздухе равно:

$$P_{в.п.} = \nu_{в.п.} \frac{RT}{V} = \frac{m_{в.п.}}{\mu_{в.п.}} \frac{RT}{V}.$$

Таким образом, для абсолютной влажности воздуха справедливо уравнение:

$$\xi = \frac{m_{в.п.}}{V} = \frac{\mu_{в.п.}}{RT} P_{в.п.} \quad (1)$$

Относительной влажностью называется выраженное в процентах отношение парциального давления пара в воздухе к давлению насыщенного пара при тех же условиях:

$$\chi = \frac{P_{в.п.}}{P_{в.п.н.}} 100\%, \quad (2)$$

где  $P_{в.п.н.}$  - давление насыщенного пара при данной температуре воздуха.

Приборы для измерения влажности называются психрометрами.

Чаще всего используются психрометры, идея конструкции которых состоит в том, что при испарении воды поглощается тепло, и вода охлаждается.

Серийный психрометр состоит из двух термометров, установленных рядом с друг другом. Баллончик одного из термометров обернут лоскутком ткани, нижний край которой опускается в стаканчик с водой. Вода смачивает ткань, и, испаряясь, охлаждает баллончик термометра. Поэтому показания влажного термометра  $t_B$ , как правило, меньше, чем сухого  $t$ . Эта разница зависит от скорости испарения воды и скрытой теплоты этого фазового перехода. Скорость испарения воды в свою очередь определяется влажностью воздуха, его температурой, давлением, наличием ветра и конвективных потоков. Поэтому серийный психрометр снабжен градуировочной таблицей, в которой указана связь между температурой, разностью показаний термометров и искомой влажностью, в отсутствие ветра и конвективных потоков.

Имея в распоряжении психрометр и два термометра, можно относительно просто сделать новый психрометр. Для этого баллончик одного из термометров нужно обернуть тканью и поместить в сосуд с водой, так, чтобы воды касался только краешек ткани, а термометр не был погружен в воду.

Масса воды  $m$ , испаряющаяся в единицу времени с площади  $S$  влажной поверхности термометра, очевидно пропорциональна  $S$ , а также разности давлений насыщенного пара при температуре влажного термометра  $P_{в.п.н.}$  и пара, находящегося в воздухе  $P_{в.п.}$ . В то же время она обратно пропорциональна атмосферному давлению  $P$ .

$$m = A \frac{S(P_{в.п.н.} - P_{в.п.})}{P}, \quad (3)$$

где  $A$  – коэффициент пропорциональности, учитывающий другие трудно контролируемые факторы испарения (конвекцию, гигроскопичность объекта и т.д.). Для испарения  $m$  требуется теплота  $Q$ . Эта теплота отбирается у смоченной поверхности, что снижает показания термометра. Поэтому после стабилизации показаний сухого и влажного термометров можно записать:

$$Q = mL = BS(t - t_B), \quad (4)$$

где  $L$  – удельная теплота парообразования воды,  $B$  - коэффициент теплоотдачи. Отсюда:

$$P_{в.п.} = P_{в.п.н.} - \frac{B}{A} \frac{P}{L} (t - t_B). \quad (5)$$

Влажность воздуха в основном зависит от близости водоема и погоды, а в помещениях – от

вентиляции и кондиционирования. Естественные перепады атмосферного давления вносят незначительный вклад. Поэтому при градуировке бытовых психрометров они не учитываются.

---

### **Цель работы**

- ✓ Изучение психрометра

---

### **Решаемые задачи**

- ✓ Знакомство с принципом работы и устройством психрометра
- ✓ Измерение влажности воздуха
- ✓ Изготовление и градуировка психрометра
- ✓ Наблюдение зависимости показаний психрометра от интенсивности воздушных потоков и типа смачивающих жидкостей.

---

### **Экспериментальная установка**

#### **Приборы и принадлежности**

- ✓ Серийный психрометр
- ✓ Барометр
- ✓ Жидкостно-стеклянный термометр на штативе
- ✓ Флаконы с водой и спиртом
- ✓ Куски фильтровальной бумаги
- ✓ Вентилятор.

---

### **Порядок выполнения работы**

#### **Проведение измерений**

1. Привести серийный психрометр в рабочее состояние, проверив наличие воды в пробирке одного из термометров. Измерить разность показаний термометров. По таблице на панели психрометра определить влажность воздуха в лаборатории. Выразить влажность в относительных и абсолютных единицах.
2. Вычислить парциальное давление водяных паров  $P_{в.п.i.}$  в лаборатории.
3. Выяснить, можно ли определять влажность по общему градуировочному графику, а не по таблице психрометра. Для этого на одном графике построить три зависимости  $(t - t_B)$  от  $P_{в.п.}$  для максимальной, комнатной и минимальной температуры  $t$  по табличным данным, указанным на панели серийного психрометра. Рекомендуется воспользоваться формулой (2) и справочными данными  $P_{в.п.}(t)$ .
4. По наклону каждого графика определить диапазон измерения величины  $BP/AL$  по формуле (5) для данного психрометра. Выяснить, можно ли считать ее константой при

измерениях влажности в широком интервале температур.

5. Изготовить самодельный психрометр. Для этого баллончик лабораторного жидкостно-стеклянного термометра обернуть кусочком сухой фильтровальной бумаги размером 2х2 см и закрепить обертку резиновым колечком.
6. Установить термометр вертикально в штативе и снять показание температуры  $t$ .
7. Подставить флакончик с водой под термометр, так чтобы нижняя часть обертки касалась воды, а верхняя часть смачивалась за счет пропитки.
8. Дождаться стабилизации температуры  $t_B$  и снять ее отсчет.
9. Повторить пункты 6-7, меняя обертки 5 раз. Вычислить среднее арифметическое значение  $t_B$ .
10. Включить вентилятор и направить струю воздуха на термометр со смоченной оберткой. Записать новое значение температуры.
11. По формуле (5) вычислить коэффициент  $BP/AL$  для самодельного психрометра без вентилятора, используя измеренное серийным психрометром значение влажности в лаборатории. Сравнить результат с коэффициентом серийного психрометра.
12. Установить новую обертку на термометр и смочить ее во флаконе со спиртом. Записать показание термометра. Объяснить его возможное отличие от результата, полученного с водой в п. 8.

## 238 ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫЙ ТЕРМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ (ИЗУЧЕНИЕ ФАЗОВЫХ ПЕРЕХОДОВ I-ГО РОДА В КРИСТАЛЛАХ).

### Введение

Фазой в термодинамике называется состояние вещества, отличающееся по физическим свойствам от других возможных равновесных состояний того же вещества, например, агрегатным состоянием, строением кристаллической решетки, электрическими, магнитными свойствами и т.д. признаком наличия нескольких фаз является существование границ – областей резкой смены физических свойств. При этом часть системы, находящуюся в отличной от других частей фазы, можно отделить от них механическим способом. Фазовое равновесие предполагает равенство температуры и давления, а также неизменность количества вещества в различных фазах. В смеси, состоящей из  $k$  химических компонент, одновременно в равновесии могут существовать не более  $k+2$  фаз (правило Гиббса). Совокупность точек на плоскости  $(P, T)$ , отвечающих состояниям фазовых равновесий, называется фазовой диаграммой. На фазовой диаграмме химически чистого вещества (см. рисунок) тройная точка (т.е. состояние в котором одновременно находятся в равновесии три фазы) находится на месте пересечения графиков зависимости равновесного давления  $P$  от температуры  $T$  между твердой, жидкой и газообразной фазами, то есть трех кривых, соответствующих плавлению – кристаллизации, испарению – конденсации и сублимации – кристаллизации.



В газообразном состоянии при любых условиях существует только одна фаза. Единственный случай одновременного существования двух фаз в химически однородной жидкости отмечен в жидком гелии. В твердом состоянии, даже химически однородного вещества, наличие двух и более фаз отмечается часто. Пример – графит и алмаз.

---

**Фазовым переходом** называется переход вещества из одной фазы в другую при изменении внешних условий : температуры, давления, магнитных и электрических полей и т.д. различают фазовые переходы двух родов. Фазовые превращения. При которых производные удельных термодинамических потенциалов меняются скачкообразно, называются первого рода (ФП-1). При любых ФП-1 скачком меняются энтропия и объем. Скачок объема приводит к скачку плотности. Скачок энтропии обуславливает выделение или поглощение определённого количества теплоты, называемого теплотой фазового перехода. Или скрытой теплотой перехода  $L$ :

$$L = T_{\text{п}}(S_2 - S_1),$$


---

Где  $T_{\text{п}}$  – температура перехода,  $S_2$  и  $S_1$  – энтропия вещества в разных фазах. Связь давления и температуры на кривой фазового равновесия, соответствующей ФП-1, определяется уравнением :

$$\frac{dP}{dT} = \frac{S_2 - S_1}{V_2 - V_1} = \frac{L}{T(V_2 - V_1)},$$

где  $V_2 - V_1$  - изменение объема вещества при фазовом переходе.

При фазовых переходах второго рода (ФП-2) первые производные от термодинамического потенциала остаётся непрерывной, а вторые меняются скачкообразно. Вторыми производными термодинамического потенциала являются, например, теплоёмкость при постоянном объеме, удельный коэффициент объёмного термического расширения, диэлектрическая проницаемость, магнитная восприимчивость. Очевидно, что при ФП-2 уравнение (2) не информативно. В этом случае связь между равновесными значениями температуры и объема определяется соотношениями Эренфеста, связывающие скачкообразные изменения теплоемкости, изобарного коэффициента  $\alpha_p$  термического расширения и изотермического коэффициента сжатия  $\beta_T$ .

$$\frac{dP}{dT} = \frac{C_{p2} - C_{p1}}{VT(\alpha_{p2} - \alpha_{p1})}, \quad \frac{dP}{dT} = \frac{\alpha_{p2} - \alpha_{p1}}{VT(\beta_{T2} - \beta_{T1})}$$

К ФП-2 относится: переход парамагнетик-ферромагнетик, диэлектрик-сегнетоэлектрик и др.

Характерно, что ФП-2 происходит непрерывно и сразу во всем объеме тела, а при ФП-1 рост новой фазы начинается в некоторых точках – зародышах, где имеются неоднородности свойств вещества. Например, на мелких частичках примесей, или вблизи сильно искривлённой поверхности сосуда. Дальнейший рост новой фазы тем более заметен, чем быстрее обеспечивает доступ тепла к зародышам или отвод тепла от их.

Суть метода дифференциального термического анализа (ДТА) заключается в регистрации разности температуры  $\Delta T$  в контейнерах с навесками исследуемого и эталонного вещества при их нагревании или охлаждении в одинаковых условиях. В качестве эталонных веществ используют те, в которых фазовые переходы в интересующем интервале температур заведомо отсутствуют и их температура  $T$  характеризует динамику нагрева или охлаждения контейнеров. Если в исследуемом веществе происходит фазовый переход первого рода, который сопровождается поглощением или выделением скрытой теплоты, то зависимость  $\Delta T$  от  $T$  проходит через максимум или минимум. Это позволяет определить температуру фазовых переходов в исследуемом веществе. Площадь  $S$  таких пиков на регистрограммах ДТА пропорциональна теплоте  $L$  соответствующих фазовых переходов:

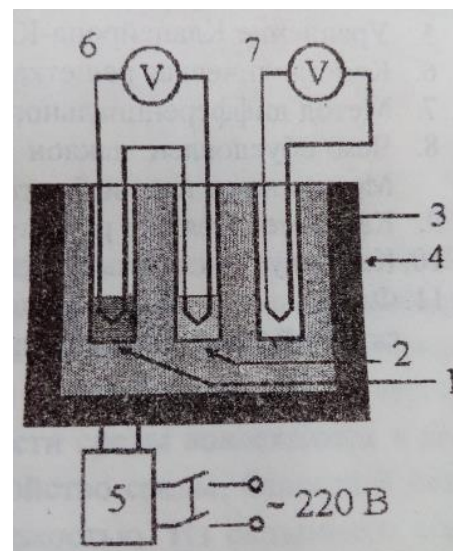
$$S = aL$$

Коэффициент пропорциональности  $a$  зависит от особенностей прибора для ДТА. Его можно найти экспериментально по ДТА-регистрограмме фазового перехода с известной  $L$ , зная массу вещества. Вычислив  $a$ , можно определять теплоты других фазовых переходов. В качестве исследуемого образца в работе исследуется кристаллический азотнокислый калий  $KNO_3$ . Известно, что в области температур от комнатной до  $400^\circ C$  он испытывает два фазовых перехода первого рода: первый связан с переходом ромбической структуры в тетрагональную, другой с переходом «кристалл-жидкость».

**Цель работы:** освоение метода дифференциального термического анализа для исследования фазовых переходов.

**Задачи работы:**

1. знакомство с принципом работы установки ДТА;
2. обнаружение и исследование фазовых переходов I-го рода в кристалле нитрата калия;
3. измерение скрытой теплоты фазового перехода в твердом состоянии нитрата калия;



### Экспериментальная установка

Схема установки приведена на рисунке. Образец 1 -  $\text{KNO}_3$  ( $T_1$ ) и эталон 2 - порошок  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ( $T_2$ ) помещены в углублениях контейнера 3 электропечи 4, питаемой через лабораторный автотрансформатор 5. С помощью термопар, подключенных к ПК, измеряются температуры в контейнерах, также вычисляется разность температур  $\Delta T$  в контейнерах с  $\text{KNO}_3$  и  $\text{Al}_2\text{O}_3$ .  $\Delta T = T_1 - T_2$

### Ход работы.

1. Включить ПК и модуль Cassy lab2 . Открыть файл ДТА\_эксперимент.
2. Измерить комнатную температуру  $T_k$  по термометру в лаборатории.
3. По показаниям термопары 2 убедиться в том, что температура контейнера меньше  $80^\circ\text{C}$ .
4. Включить нагрев контейнера в соответствии с рекомендациями, находящимися на рабочем месте (спросить у инженера лаборатории). Начать измерения температурной зависимости образца и эталона, а также их разности, нажав на ПК кнопку F9. Измерять приблизительно до  $400^\circ\text{C}$ . Время измерений  $t=2300$  сек.
5. Выключить печь и включить охлаждающий вентилятор. Сообщить инженеру лаборатории об окончании опыта.
6. Построить график полученной зависимости  $\Delta T$  от  $T$  (вкладка dif T(T). Определить температуру каждого фазового перехода.
7. Определить теплоту фазового перехода образца из ромбической модификации в тетрагональную  $L_1 = s_1/a = s_1 L_2 / s_2$ , где  $L_2 = 185$  кДж/кг теплота высокотемпературного фазового перехода «кристалл-жидкость»,  $s_1$  и  $s_2$  – площади низкотемпературного и высокотемпературного пиков на снятой регистрограмме ДТА.  
Для вычисления площади войдите во вкладку diagram → calculate integral → peak area  
Значение интеграла (площадь пика) высветится в левом нижнем углу.
8. Используя уравнение Клапейрона-Клаузиуса,  $\frac{dP}{dT} = \frac{s_2 - s_1}{V_2 - V_1} = \frac{L}{T(V_2 - V_1)}$ , где  $V_2 - V_1$  - изменение удельного объема вещества при переходе из I-й фазы во вторую, определить изменение удельного объема образца при изменении симметрии кристаллической решетки, если известно, что при повышении давления на 100 атм, температура фазового перехода увеличивается на  $0.9\text{ K}$ .

$m(\text{KNO}_3) = 0.8$  г



Контрольные вопросы и дополнительные задания.

1. Определение фазы. Условия равновесия фаз.
2. Классификация фазовых переходов и примеры соответствующих переходов.
3. Какие термодинамические параметры определяют скрытую теплоту перехода?
4. Фазовая диаграмма.
5. Уравнение Клапейрона-Клаузиуса и соотношение Эренфеста.
6. Кристаллическая решетка и ее симметрии.
7. Метод дифференциального термического анализа.
8. Чем обусловлен наклон регистрограммы в отсутствии фазовых переходов? Можно ли от него избавиться?
9. Как измениться вид регистрограммы, если термопары поменять местами?
10. Как будут выглядеть на регистрограмме фазовые переходы второго рода?
11. Фазовые переходы в исследуемом образце. Объяснить разницу в величинах скрытой теплоты переходов.

## 241.1 ПРЕВРАЩЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ В ТЕПЛОТУ

---

### *Введение*

Энергия является одной из основных физических величин. Энергия имеет различные формы, которые могут преобразовываться из одной в другую. В замкнутых системах, в процессе перехода полная энергия сохраняется.

В данной работе устанавливается соотношение механической и тепловой энергии. Механическая работа затрачивается на преодолении сил трения при прокручивании шнура. При этом повышается температура в калориметре и, следовательно, увеличивается тепловая энергия. Два вида энергии, механическая и тепловая, могут быть получены и рассчитаны из числа оборотов и температуры.

---

### *Цель работы*

- ✓ Получение соотношения между механической энергией и тепловой энергией (теплотой) при их преобразовании в данной экспериментальной установке
- 

### *Решаемые задачи*

- ✓ Измерение температуры с помощью термопары
  - ✓ Использования калориметра для измерения теплоты
  - ✓ Экспериментальное наблюдение преобразование работы силы трения в теплоту
- 

### *Экспериментальная установка*

#### **Приборы и принадлежности**

- ✓ компьютерный интерфейс для регистрации экспериментальных данных сенсор-  
CASSY 2 (①, Рис.1)
- ✓ водяной калориметр (②, Рис.1)
- ✓ медный калориметр (③, Рис.1)
- ✓ алюминиевый калориметр (④, Рис.1)
- ✓ большой алюминиевый калориметр (⑤, Рис.1)
- ✓ термопара (⑥, Рис.1)
- ✓ световые ворота (⑦, Рис.1)
- ✓ груз, 5 кг (⑧, Рис.1)
- ✓ вращающий механизм (⑨, Рис.1)

## Порядок выполнения работы

### Требования безопасности

- ✓ Убедитесь в том, что экспериментатор стоит так, что он или она не подвержен опасности, если вдруг, по неосторожности, упадет груз.

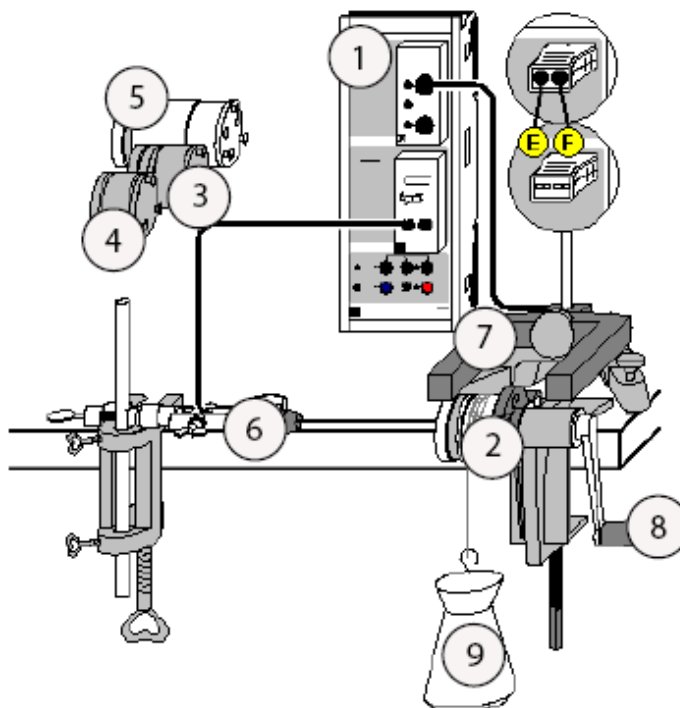


Рис.1

### Подготовка установки к работе

1. Проверьте правильность сборки установки (см. рис. 1). Световые ворота, необходимые для подсчета количества оборотов, необходимо установить так, чтобы при совершении оборотов, рука проходила через них (Рис.2)



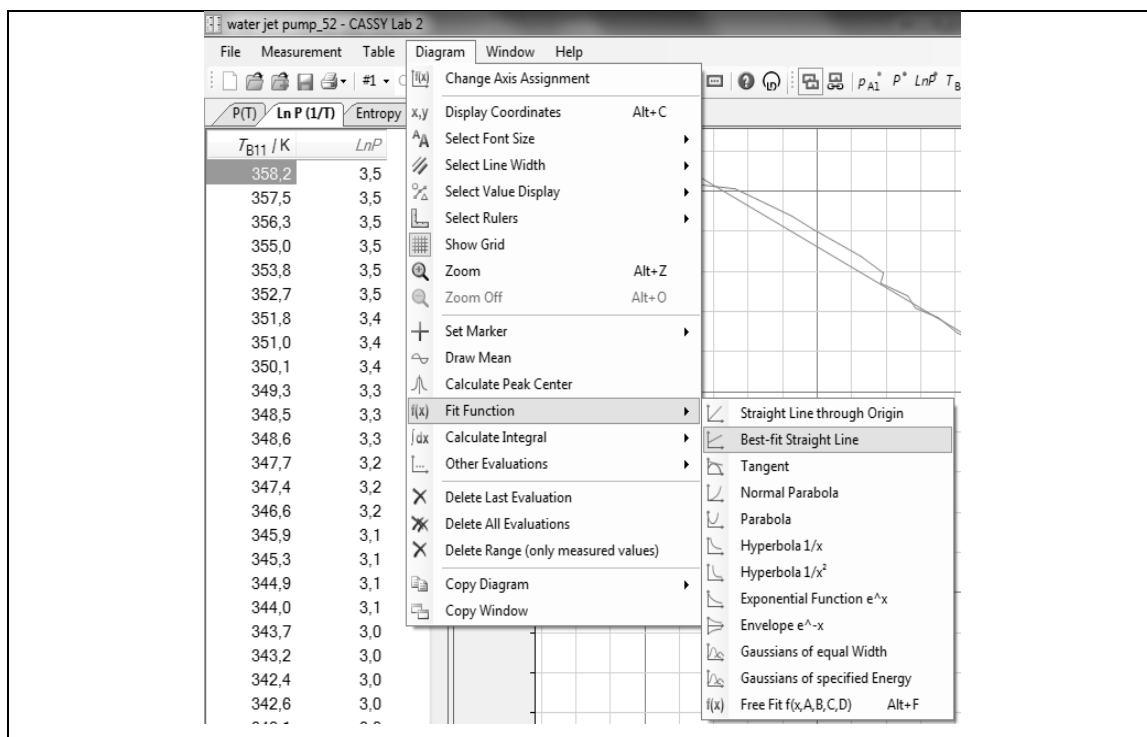
Рис.2

2. Залейте воду до края в водный калориметр. Закройте его блокировочным винтом.

3. Закрепите наполненный калориметр в основном механизме (см. рис. 1). Для этого вставьте штифт в углубление пластмассового держателя и поворотом тела калориметра заблокируйте штифт в пазе.
4. Намотайте шнур (4, максимум 6 оборотов) на калориметр.
5. Подвесьте груз так, чтобы при вращении ручки вращательного механизма, шнур проскальзывал и груз оставался на постоянной высоте (несколько сантиметров) от пола. Если он поднимается (опускается) уменьшить (увеличить) число витков шнура на калориметре.
6. Вставьте термопару в калориметр как можно глубже. Подтяните блокировочный винт. Закрепите ручку термопары в заранее подготовленный держатель (см. рис. 1).
7. Для измерения числа оборотов, положение световых ворот должно быть таким как указано на рисунке 2 Световые ворота должны быть подключены к входу А сенсор-CASSY.
8. Проверьте подсоединение датчика температуры через температурный блок к входу В сенсор-CASSY через «временной» блок.
9. Запустите на ноутбуке CASSY Lab 2. Загрузите настройки для работы. (File-Open; D:\эксперименты\2332).
10. В настройках CASSY обнулите значения числа оборотов (Sensor-CASSY2 – Input A<sub>1</sub> – Time; |→0←|), задайте теплоемкость калориметра ( $C=40+4.2$  Дж/К, 4.2 Дж/К – теплоемкость воды) (Calculator – Formula – Heat capacity).

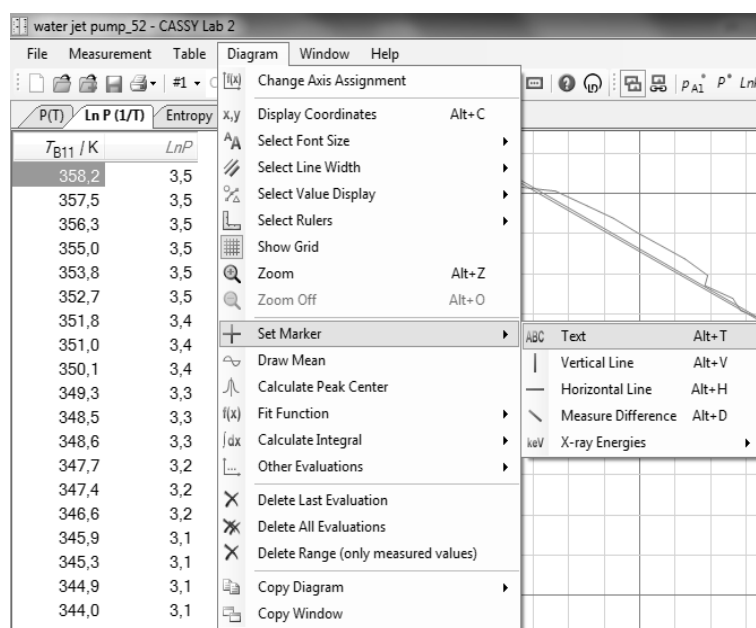
### **Выполнение измерений**

1. Запустите эксперимент в CASSY (F9). Диск D – эксперименты — 241.1
2. Крутите ручку вращательного механизма. Необходимо следить, чтобы веревка не наматывалась на калориметр. Остановить эксперимент при достижении температуры на 5<sup>0</sup>С выше начальной (F9).
3. Повторить эксперимент для медного калориметра ( $C=264+4.2$  Дж/К), алюминиевого калориметра ( $C=188+4.2$  Дж/К) и большого алюминиевого калориметра ( $C=384+4.2$  Дж/К).
4. Аппроксимируйте экспериментальные точки E<sub>th</sub> от E<sub>m</sub> прямой линией, проходящей через начало координат и вычислите тангенс угла наклона. Для этого:
  - a) Зайдите во вкладку «Diagram», из пункта «Fit Function» выберите «Best-fit-Straight Line», если график проходит через начало координат, *то выберите «Straight Line through origin»*



б) Наведите курсор мыши на левую нижнюю точку графика и, зажав левую кнопку, потяните курсор вдоль экспериментальной прямой (при этом прямая будет выделяться цветом). Отпустите левую кнопку мыши.

в) Во вкладке «Diagram» перейдите в пункт «Set Marker» и выберите «Text»



г) На экране появится уравнение прямой и его параметры (в левом нижнем углу). Параметр A соответствует тангенсу наклона прямой

д) На экране появится уравнение прямой и его параметры (в левом нижнем углу). Параметр A соответствует тангенсу наклона прямой.

5. Проанализируйте соотношение между механической энергией и тепловой энергией по тангенсу угла наклона аппроксимационной прямой для всех калориметров.

---

### Обработка и представление результатов

В течение эксперимента температура калориметра постоянно отображается как функция числа оборотов. Механическая энергия  $E_m$  равна произведению величины силы трения  $F$  и длины шнура  $s$ , намотанного на калориметр:

$$E_m = FS$$

$$F = mg,$$

$$s = N\pi d,$$

где  $m$  – масса груза,  $g$  – ускорение свободного падения,  $N$  – число витков,  $d$  – диаметр калориметра, равный 47 мм.

Увеличение тепловой энергии обусловлено увеличением температуры и определяется как:

$$E_{th} = C(\theta_2 - \theta_1)$$

где  $C$  – теплоемкость калориметра и воды,  $\theta_1$  и  $\theta_2$  – начальная и конечная температуры, соответственно.

На вкладке Evaluation, тепловая энергия строится в зависимости от механической энергии.

## 241.2 ПРЕВРАЩЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ В ТЕПЛОВУЮ ЭНЕРГИЮ.

---

### *Введение*

Энергия есть мера запасенной работы (энергия в физике отождествляется со способностью произвести работу). Она проявляется в различных формах, которые могут переходить из одной в другую. В замкнутой системе в процессе превращения полная энергия сохраняется, таким образом, энергия является одной из основных физических величин.

В данной лабораторной работе опытным путем устанавливается эквивалентность электрической энергии (работы электрического поля по перемещению электрического заряда в проводнике) и тепловой энергии. Электрическая энергия преобразуется в тепловую энергию (теплоту) в результате нагрева металлической спирали, погруженной в воду. Это приводит к повышению температуры воды в калориметре и самого калориметра. Электрическая и тепловая энергии рассчитываются и сравниваются между собой в процессе измерения.

---

### *Цель работы*

- ✓ Проверка закона сохранения энергии при преобразовании электрической энергии в тепловую энергию.

---

### *Решаемые задачи*

- ✓ измерение температуры с помощью термопары
- ✓ использования калориметра для измерения теплоты
- ✓ экспериментальное наблюдение преобразование работы электрического поля по перемещению электрического заряда в проводнике в теплоту

---

### *Экспериментальная установка*

#### **Приборы и принадлежности**

- ✓ компьютерный интерфейс для регистрации экспериментальных данных сенсор- CASSY 2 (①, Рис.1)
- ✓ медный калориметр (②, Рис.1)
- ✓ алюминиевый калориметр (③, Рис.1)
- ✓ большой алюминиевый калориметр (④, Рис.1)
- ✓ датчик температуры (термопара NiCr-Ni) (⑤, Рис.1)
- ✓ источник пониженного переменного и постоянного напряжения (⑥, Рис.1)

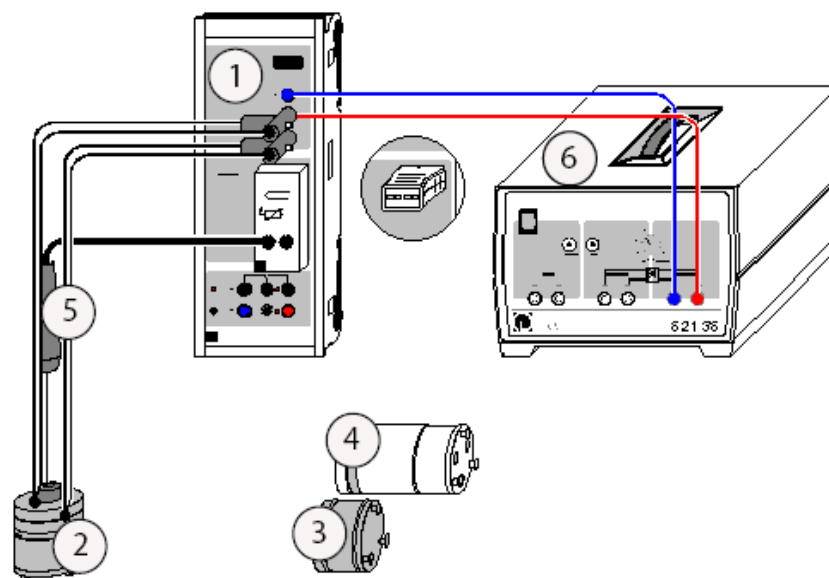


Рис.2

### Подготовка установки к работе

1. Залейте воду до края в медный калориметр, закройте его блокировочным винтом.
6. Вставьте датчик температуры как можно глубже в отверстие калориметра.
7. Подключите источник напряжения к сенсор-CASSY как показано на рисунке.
8. Подключить нагреватель колориметра к входу А сенсор-CASSY (см. рисунок).
9. Подсоедините датчик температуры через температурный блок к входу В сенсор-CASSY.

### Выполнение измерений

1. Запустите на ноутбуке CASSY Lab 2. Загрузите настройки для работы: File-Open; D:\эксперименты\241.2.
2. В настройках CASSY вывести показания напряжения: Sensor-CASSY2 – Input A<sub>1</sub> – Voltage U<sub>A1</sub>.
3. Включить источник напряжения. Вращая ручку выставить напряжение U<sub>A1</sub> примерно 9 В.
4. Прочитать точное значение U<sub>A1</sub> и ввести его в Setting U как параметр.
5. Выключить источник напряжения. Выбрать Current I<sub>A1</sub> в качестве измеряемой величины и 0 .. 2.1 А, как диапазон в Setting UA1.
6. В настройках Setting C задайте теплоемкость медного калориметра и воды (264+4.2 Дж/К) (Calculator – Formula – Heat capacity).
7. Запустить эксперимент в CASSY (F9).



8. Если начальная температура не изменяется со временем, включить источник напряжения.
9. Выключить источник напряжения при достижении конечной температуры на 5°C выше начальной.
10. Остановить эксперимент в CASSY (F9) при неизменной конечной температуре.
11. Повторить эксперимент для алюминиевого калориметра ( $C=188+4.2$  Дж/К) и большого алюминиевого калориметра ( $C=384+4.2$  Дж/К).
12. Посмотреть соотношение между механической энергией и тепловой для всех калориметров на диаграмме во вкладке Evaluation.
13. Аппроксимируйте экспериментальные точки  $E_{th}$  от  $E_{el}$  прямой линией, проходящей через начало координат.
14. Проанализируйте соотношение между электрической энергией и тепловой энергией по тангенсу угла наклона аппроксимационной прямой для всех калориметров.

---

#### **Обработка и представление результатов**

Сила тока  $I_{A1}$  и температура  $\theta_{B11}$  измеряются и отображаются на графике в зависимости от времени в процессе эксперимента. Работа электрического поля по перемещению электрического заряда в проводнике (электрическая энергия) равна:

$$E_{el}=U \cdot I \cdot \Delta t,$$

где  $\Delta t$  – время в течении которого происходит нагрев. Тепловая энергия определяется выражением:

$$E_{th}=C \cdot (\theta_2 - \theta_1),$$

где  $C$  - теплоемкость калориметра и воды,  $\theta_1$  и  $\theta_2$  – начальная и конечная температуры, соответственно.  $E_{th}$  строится в зависимости от  $E_{el}$  на диаграмме во вкладке Evaluation.

## 242. 1. ФРИКЦИОННЫЕ ПОТЕРИ В ДВИГАТЕЛЕ, РАБОТАЮЩЕМ НА НАГРЕТОМ ВОЗДУХЕ

---

### Введение

Ознакомьтесь с принципом работы теплового двигателя на нагретом воздухе (двигатель Стирлинга). За один оборот двигатель потребляет количество теплоты  $Q_1$  из резервуара 1, совершает механическую работу  $W$  и передает энергию  $Q_2 = Q_1 - W(I)$  в резервуар 2. Если двигатель на горячем воздухе работает в качестве холодильника, то механическая работа  $W$  совершается извне. В этом случае также количество тепла  $Q_1$  берется из резервуара 1, и количество тепла  $Q_2$  передается в резервуар 2. В обоих случаях происходят потери энергии, которые входят в энергетический баланс двигателя горячего воздуха. Например, определенное количество механической энергии (фрикционные работы) за один оборот расходуется на трение поршня в цилиндре, таким образом, трение превращается в тепловую энергию (тепло). Фрикционные потери, связанные с работой поршня в цилиндре могут быть определены количественно, так как вызывают нагревание охлаждающей воды. В эксперименте, потери энергии на преодоление сил трения при работе поршня определяются путем измерения повышения температуры воды в цикле охлаждения, двигатель горячего воздуха приводится в движение электрическим двигателем. Энергия, которая передается охлаждающей воде, рассчитывается по формуле:

$$P = c \cdot \rho \cdot \frac{\Delta V}{\Delta t} \cdot \Delta \theta \quad (1)$$

$c=4.185$  Дж/(гр·К) удельная теплоемкость воды;  $\rho = 1$  гр/см<sup>3</sup> плотность воды

$\frac{\Delta V}{\Delta t}$  объем воды, протекающей в единицу времени, расходуемой на охлаждение воды,

$\Delta \theta$  - изменение температуры.

Работа сил трения за один оборот двигателя на горячем воздухе рассчитывается по

формуле:  $W_R = \frac{P}{f}$ .

---

### Цель работы

Знакомство с законами тепловых машин, работающих по замкнутым циклам

---

### Решаемые задачи

- ✓ Определение потерь на трение в воздушном двигателе, по нагреванию воды охлаждающего цикла.

---

### Экспериментальная установка

#### Приборы и принадлежности

- ✓ Двигатель на горячем воздухе
- ✓ Принадлежности для измерения мощности
- ✓ Электродвигатель
- ✓ Блок управления двигателем

- ✓ Счетчик
- ✓ П – образные световые ворота
- ✓ Многожильный кабель
- ✓ Секундомер
- ✓ Термометр
- ✓ V- образный штатив
- ✓ Штативный стержень
- ✓ Пластиковый стакан
- ✓ Водяной насос
- ✓ Низковольтный источник питания
- ✓ Siliconовая подводка
- ✓ Резервуар для воды 10 л

---

### Порядок выполнения работы

#### Подготовка эксперимента. Сборка установки

1. Вставьте термопару в тройник «С».

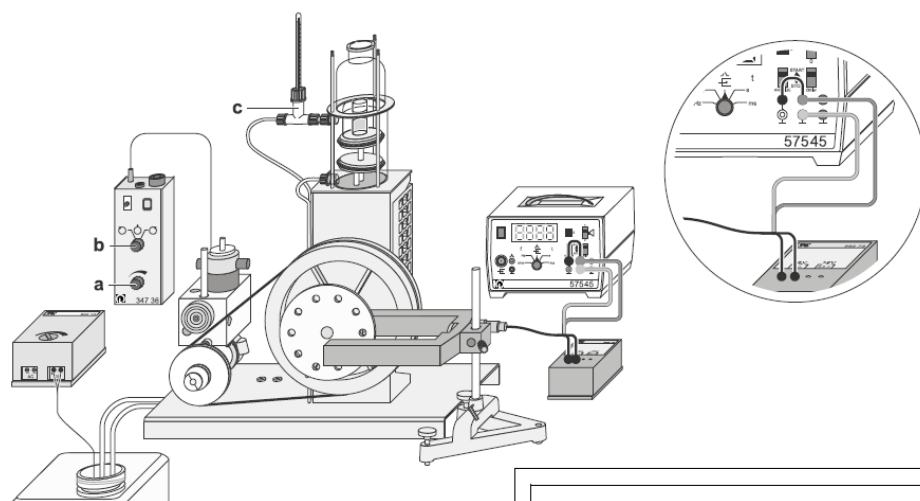


Рис.1

#### **Охлаждение двигателя:**

2. Заполните канистру водой (несколько литров).
3. Подключите выход насоса к трубке, по которой втекает в двигатель поток охлаждающей воды, и опустите насос в воду, направьте слив воды из двигателя в канистру.
4. Подключите насос к источнику питания низкого напряжения 9В.

#### **Настройка двигателя на горячем воздухе:**

5. Подключите электродвигатель к блоку управления.
6. Установите приводной ремень на маховик диска, и присоедините его к поворотному колесу электрического двигателя.

#### **Измерение частоты:**

7. Приложите диск с отверстиями к маховику.

8. Консоль 575471 включить в розетку. Кабель от световых ворот подключить к входу «Е». С помощью кнопки «mode» выбрать режим измерение частоты. Горят индикаторы «f<sub>E</sub>» и «Hz».
9. Направление луча света приведите в соответствие с отверстием, расположенным на диске.

### Выполнение эксперимента

1. Установите переключатель (b) в среднее положение (режим ожидания),
2. Установите ручку настройки скорости (a) в среднюю позицию, и включите блок управления.
3. Включите циркуляцию воды, для этого включите источник низковольтного питания.
4. Проверьте циркуляцию, ждите, пока вода не побежит обратно через выпускающий шланг.
5. Запустите вращение двигателя на горячем воздухе в направлении по часовой стрелке, рукоятка (b) влево.
6. Измерьте частоту вращения двигателя горячего воздуха. Скорость вращения двигателя получается из измеренной частоты и количества отверстий диска.
7. Измерение температуры воды проводить через каждые 2 минуты, и ждать, пока температура не стабилизируется.
8. Когда температура достигнет своего максимального значения, выключите двигатель, рукоятка (b) в среднем положении, продолжайте измерения температуры охлаждающей воды каждые 2 минуты, пока температура не стабилизируется.
9. Положите конец выходного шланга для охлаждающей воды в мерный стакан, и определить объем вытекающей воды  $\Delta V$  за время  $\Delta t$ .
10. Измените скорость вращения электродвигателя с помощью ручки настройки скорости (a), и повторите измерения (1-9) для двух значений частоты.
11. Повторите эксперимент, запустив вращение двигателя на горячем воздухе в направлении против часовой стрелки, рукоятка (b) вправо. Повторите пункты (6-10).

---

### *Обработка и представление результатов*

1. Результаты измерений занесите в таблицу 1, и постройте график зависимости температуры охлаждающей воды от времени для каждой частоты вращения двигателя.

Таблица 1. Температура охлаждающей воды, измеренной с интервалом в 2 минуты

t (мин)	$\theta^{\circ}\text{C}$

2. Из графиков установите абсолютную величину изменения температуры, и результаты занесите в таблицу и постройте график зависимости изменения температуры от частоты.

Таблица 2: Изменения температуры охлаждающей воды и работы, измеренной при различных частотах вращения двигателя

$f$ (сек <sup>-1</sup> )	$\Delta\theta^{\circ}\text{C}$	$W_R$ (Дж)

3. Рассчитайте величину силы трения за один оборот, при разных частотах вращения двигателя, постройте график зависимости работы сил трения от частоты вращения двигателя.

## 242.2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ПОЛЕЗНОГО ДЕЙСТВИЯ ДВИГАТЕЛЯ НА ГОРЯЧЕМ ВОЗДУХЕ, РАБОТАЮЩЕГО КАК НАГРЕВАТЕЛЬ

### Введение

При работе тепловой машины двигатель забирает энергию  $Q_1$  из первого резервуара (нагревателя), совершает полезную работу  $W$  и отдает энергию  $Q_2$  второму резервуару (холодильнику). Если нет никаких потерь энергии, то следующее соотношение между величинами должно соблюдаться:

$$Q_1 = Q_2 + W \quad (1)$$

Двигатель на горячем воздухе не является оптимальным, так как происходит потери тепла на тепловое излучение и нагревание. Следовательно,

$$Q_1 > Q_2 + W \quad (2)$$

Коэффициент полезного действия определяется выражением:

$$\eta = \frac{W}{Q_1} \quad (3)$$

В случае двигателя на горячем воздухе наиболее корректно использовать соотношение:

$$\eta = \frac{W}{Q_2 + W} \quad (4)$$

Энергия  $Q_2$  затрачивается на нагревание охлаждающей двигатель воды, повышение её температуры. Однако, повышение температуры также обусловлено работой сил трения (см. работу 2421). В уравнении теплового баланса дополнительно к механической работе должны рассматриваться потери энергии на работу сил трения.

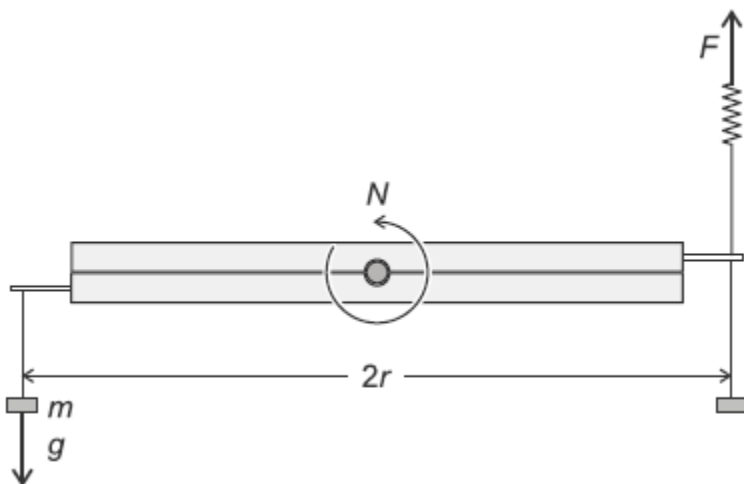


Рис.1. Вращающий момент  $N=(F+mg) \cdot r$ .

В эксперименте двигатель вращает с частотой  $f$ . Тогда затраченная энергия равна:

$$W' = 2\pi \cdot N \quad (5)$$

Механическая работа определяется выражением:

$$W = W' + W_R \quad (6)$$

Увеличение температуры холодной воды требует дополнительной энергии в единицу времени, которая равна:

$$P = c \cdot \rho \cdot \frac{\Delta V}{\Delta t} \cdot \Delta \vartheta, \quad (7)$$

$c = 4,185$  Дж/ (г·К) - удельная теплоемкость воды,  $\rho = 1$  г/см<sup>-3</sup> - плотность воды,  $\frac{\Delta V}{\Delta t}$  -

объем вытекающей воды, который может быть измерен. Исходя из этих соотношений, можно рассчитать теплоту  $Q_2'$ , которая передается охлаждающей воде за один цикл, как:

$$Q_2' = \frac{P}{f}, \quad (8)$$

где  $f$  – частота вращения. Разность между  $Q_2 = Q_2' - W_R$  позволяет рассчитать энергию, которая передается резервуару 2.

### ***Цель работы***

Знакомство с законами тепловых машин, работающих по замкнутым циклам

### ***Решаемые задачи***

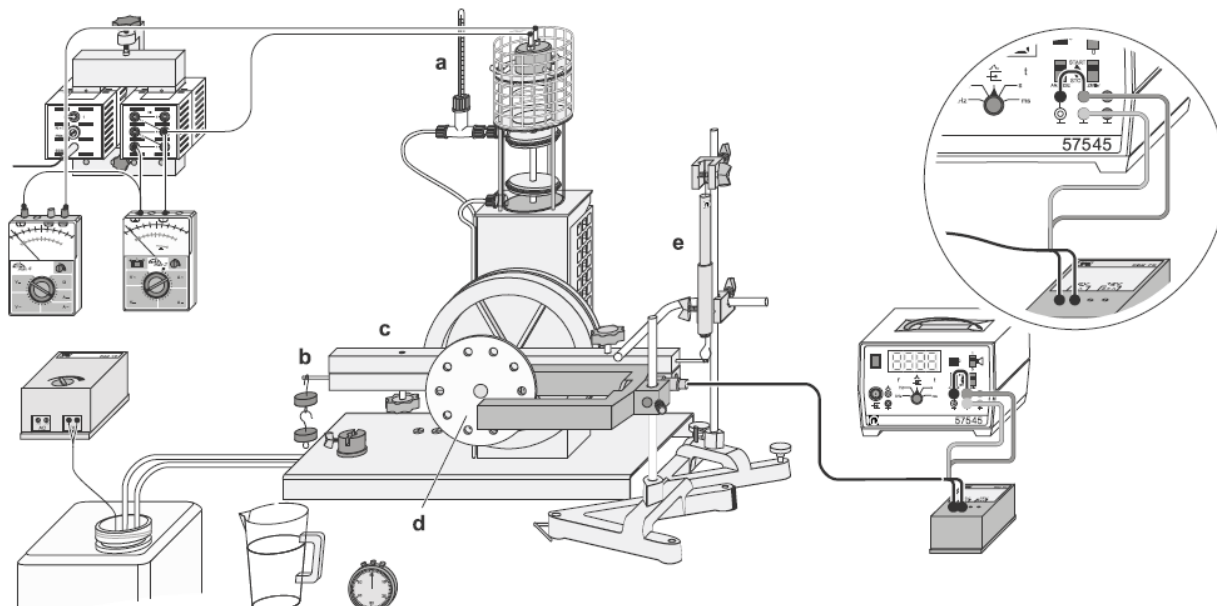
- ✓ Определение потерь на трение в воздушном двигателе, по нагреванию воды охлаждающего цикла.
- ✓ Вычисление коэффициента полезного действия нагревателя.

### ***Экспериментальная установка***

#### **Приборы и принадлежности**

- ✓ Sensor-CASSY 524013
- ✓ CASSY Lab2 524220
- ✓ Источник тока 524031
- ✓ датчик вращательного движения S 524082
- ✓ Vbox 524038
- ✓ датчиком давления и 529038
- ✓ Двигатель на горячем воздухе 388182
- ✓ Кордовая нить
- ✓ Винтовая пружина из 35208ET2
- ✓ U-сердечник с вилкой 56211
- ✓ Зажимное устройство с пружинным зажимом 562121
- ✓ катушка индуктивности, 500 витков 56221
- ✓ низковольтная катушка индуктивности, 50 витков 56218
- ✓ ПВХ трубки,  $\varnothing$  8 мм 307 70
- ✓ Водяной насос 12 В388181
- ✓ Низковольтный источник питания 521231
- ✓ Соединительные провода, 100 см, черный 50133
- ✓ Резервуар для воды 10 л

**Подготовка эксперимента. Сборка установки**



Снимите закручивающийся колпачок на выходе из головки цилиндра с трубок, по которым течет охлаждающая вода. Вставьте термометр в температурную вставку, и зажмите его с помощью гайки GL18.

**Охлаждение двигателя:**

1. Заполните канистру примерно 10 л воды.
2. Подключите выход насоса к трубке, по которой втекает в двигатель поток охлаждающей воды, и опустите насос в воду, направьте слив воды из двигателя в канистру.
3. Подключите насос к источнику питания низкого напряжения диапазон 12В. При необходимости, ослабьте шайбу GL я на короткое время, позволяя воде подняться немного в стеклянную трубку, потом закрепите шайбу GL.

**Настройка двигателя на горячем воздухе:**

1. Поставьте электродвигатель, и подключить его к блоку управления.
2. Установите приводной ремень на маховик диска, и присоедините его к поворотному колесу электрического двигателя.

**Подключение питания:**

1. Установите нить на головку блока цилиндров с крышкой. Поверните маховик, проверьте, насколько плотно закрыт двигатель на горячем воздухе, при необходимости закройте пробкой штуцер датчика давления.



2. Установите съемной трансформатор, и подключите 12-V вывод на 4-мм разъемы головки блока цилиндров вместе с вольтметром и амперметром

### **Измерение частоты.**

1. Приложите диск (d) с отверстиями от аксессуаров для двигателя горячего воздуха к коленчатому валу.
2. Установите диск с отверстиями в подставке, на расстоянии 20 см, и выровняйте его в соответствии с отверстиями перфорированного диска, диск находится в покое.
3. Подключить 4-полюсный кабель адаптера к разьему 6V на выходе трансформатора (черный заглушки) и к входу счетчика P (частота измерения, красный и серый разъем).
4. Установите переключатель в положение "f" и включите счетчик P.

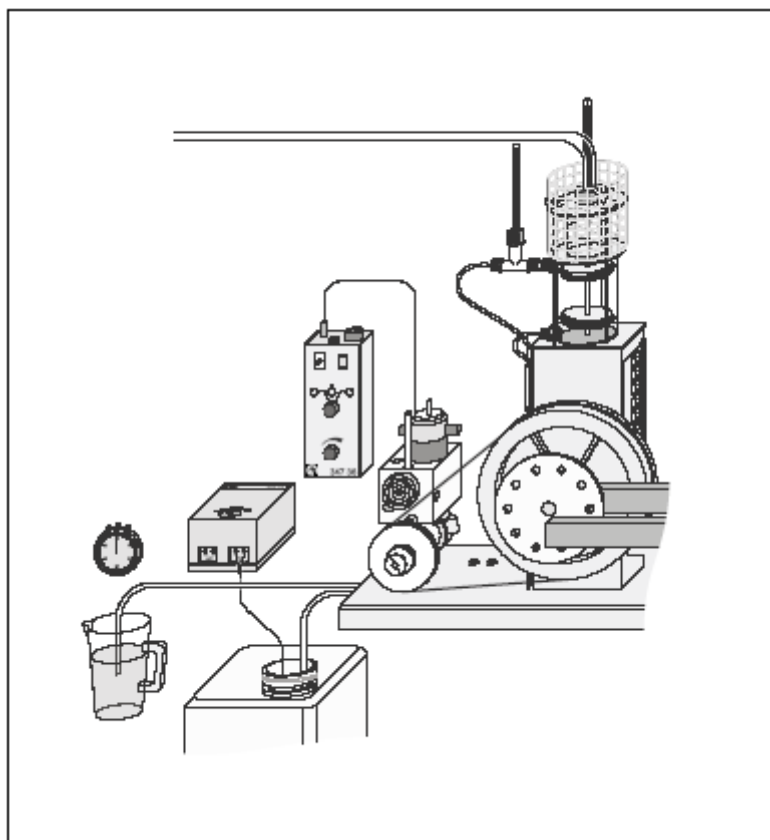


Рис.2. Определение объема вытекающей воды  $\Delta V$  за время  $\Delta t$ .

### **Требования безопасности**

- ✓ До проведения каждого эксперимента, убедитесь, что горячая пластина помещена в пазы и нагретая нить не касается перемещающегося поршня.
- ✓ Нагретая часть двигателя может стать очень горячей, шатуны при движении и перемещения поршней могут вызвать травмы при работе двигателя. По этой причине всегда используйте защитный чехол от прикосновений, когда двигатель работает.

- ✓ **Никогда не используйте двигатель без охлаждающего потока воды. Вы можете соединить двигатель с краном с водопроводной водой или использовать циркуляционный насос с резервуаром; в этом случае рекомендовано использование дистиллированной или кипячёной (без окислыны) воды. Если поток уменьшился при использовании водопроводной воды, промойте всю систему теплой (без окислыны) водой. Циркуляция воды должна быть безупречна. Не допускайте перегрева. Когда вода попадает в контур охлаждения, температура охлаждающей воды не должна превышать 30<sup>0</sup> С.**
- ✓ **Смазывайте два цилиндра двигателя силиконовым маслом регулярно. Самый простой способ сделать это - убрать горячую пластину, подвинуть перемещающийся поршень к нижней мёртвой точке, с помощью соломинки накапать силиконового масла из сжатой бутылки, так чтобы оно потекло вниз по стенке цилиндра на вершину поршневого кольца. Так как перегородка не полностью непроницаема, необходимое масло достигнет нижнего поршневого кольца за короткое время.**
- ✓ **Никогда не подключайте сетевую обмотку (56221) без сердечника трансформатора.**

### **Выполнение эксперимента**

1. Включите охлаждающую воду (для этого, установить, низковольтный блок питания в положение 12В), проверьте циркуляцию, и ждите, пока вода не побежит обратно через выпускающую трубу.
2. Положите конец выходной трубы в пластмассовый стаканчик, и определите объем вытекающей воды  $\Delta V$  за интервал времени  $\Delta t$  (см. рис 2.).
3. Измеряйте температуру  $\theta$  охлаждающей воды через каждые 2 минуты, и ждите до тех пор, пока температура не стабилизируется
4. Включите трансформатор сверхнизкого напряжения на 12В.
5. Как только нити раскалятся, запустите двигатель на горячем воздухе поворотом маховика по часовой стрелке. Если двигатель на горячем воздухе не запустился, выключите трансформатора и проверьте установку.
6. Как только двигатель на горячим воздухе начнет работать, уменьшите напряжение накала до  $U = 8$  В. При необходимости, отрегулируйте  $U$  напряжение накала, а также измените ток накала.
7. Рассчитайте скорость вращения двигателя, которая определяется из измеренной частоты и количества отверстий в перфорированном диске.
8. Измерение температуры воды проводить через каждые 2 минуты, и ждать, пока температура не достигнет максимального значения.
9. Остановите электродвигатель, переведя регулятор «а» в среднее положение, и продолжайте измерять температуру охлаждающей воды.
10. Повторите измерения при напряжении накала 10В, 12В, 14В
11. Определите силу  $F$  по показаниям динамометра. Рассчитайте момент:  

$$N = (F + M \cdot g) \cdot 0,25$$
12. Определить увеличение температуры охлаждающей воды.
13. Увеличьте силы трения тормоза, и повторите измерения.

Обработка и представление результатов

14. Результаты измерений занесите в таблицу 1,

Таблица 1.

Частота (Гц)	Напряжение (В)	Сила тока (А)	Изменение температуры (°С)

15. Рассчитайте  $Q_1$ ,  $Q_2$ ,  $W_R$ ,  $W$  и результаты занесите в таблицу 2.

Таблица 2.

Частота (Гц)	$Q_1$ (Дж)	$Q_2$ (Дж)	$W_R$ (Дж)	$W$ (Дж)

16. Определите коэффициент полезного действия  $\eta$  двигателя по формуле (3), и результаты расчета представить в виде графика зависимости коэффициента полезного действия от частоты вращения двигателя.

### 242.3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ПОЛЕЗНОГО ДЕЙСТВИЯ ДВИГАТЕЛЯ НА ГОРЯЧЕМ ВОЗДУХЕ, РАБОТАЮЩЕГО КАК ХОЛОДИЛЬНИК

#### Введение

Двигатель может работать как холодильник. Пусть теплота, которая вырабатывается  $Q_2$ , а теплота, которая передается воде, на охлаждение  $Q_1$ . Так как теплота передается от холодильника к более нагретому телу (воде), то есть в противоположном направлении спонтанной передачи тепла, то определенное количество механической работы  $W$  должно поставляться извне за один оборот. Холодильник, таким образом, это тепловая машина, которая работает в обратном направлении. Если нет никаких потерь, то следующее соотношение между величинами должно соблюдаться:

$$Q_1 = Q_2 + W \quad (1)$$

Коэффициент полезного действия холодильника определяется соотношением:  
Эффективность холодильника определяется выражением:

$$\eta = \frac{Q_2}{W}. \quad (3)$$

Коэффициент полезного действия определяется экспериментально при движении маховика двигателя на горячем воздухе (двигатель Стирлинга) с электродвигателем с частотой  $f$  и определяется способностью электродвигателя нагревать, что поддерживает цилиндры при комнатной температуре для компенсации изменений. Электродвигатель поставляет за оборот теплоту  $Q_2$ , которая определяется выражением:

$$Q_2 = \frac{U \cdot I}{f}, \quad (4)$$

где  $U$  - напряжение, а  $I$  - сила тока.

Увеличение температуры холодной воды требует дополнительной энергии в единицу времени, которая равна:

$$P = c \cdot \rho \cdot \frac{\Delta V}{\Delta t} \cdot \Delta \vartheta, \quad (5)$$

$c = 4,185$  Дж/(г·К) - удельная теплоемкость воды,  $\rho = 1$  г/см<sup>-3</sup> - плотность воды,  $\frac{\Delta V}{\Delta t}$  -

объем вытекающей воды, который может быть измерен. Исходя из этих соотношений, можно рассчитать теплоту  $Q_1$ , которая передается охлаждающей воде за один цикл, как:

$$Q_1 = \frac{P}{f}, \quad (6)$$

где  $f$  – частота вращения. Разность между  $W = Q_1 - Q_2$  позволяет рассчитать механическую работу, которая поставляется за один оборот. Она также содержит механическую работу  $W_R$ , которая требуется для преодоления трения поршня и вызывает дополнительное нагревание охлаждающей воды (см. работу 2421). Механическая работа, которая будет необходима для термодинамического цикла, то есть для передачи тепла от более холодного к более нагретому телу определяется выражением:

$$W = Q_1 - Q_2 - W_R \quad (7)$$

---

## **Цель работы**

Знакомство с законами тепловых машин, работающих по замкнутому циклу

---

## **Решаемые задачи**

- ✓ Определение потерь на трение в воздушном двигателе, по нагреванию воды охлаждающего цикла.
  - ✓ Вычисление коэффициента полезного действия холодильника
- 

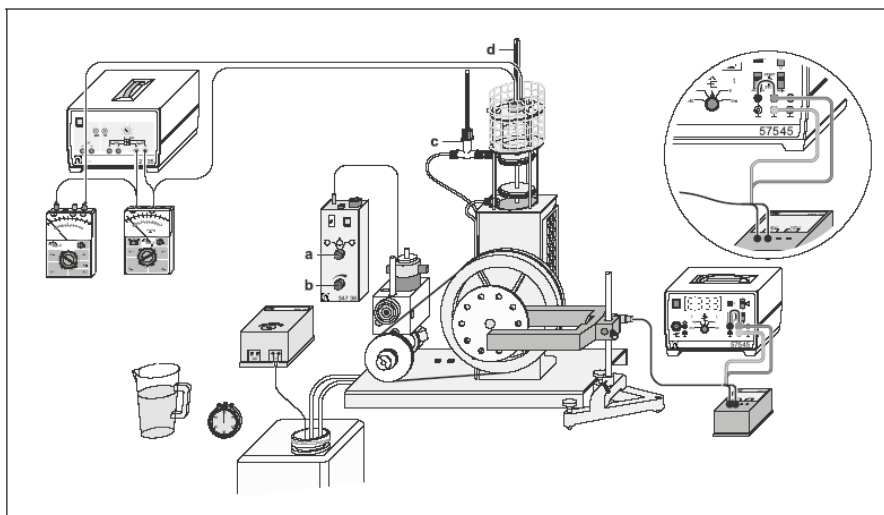
## **Экспериментальная установка**

### **Приборы и принадлежности**

- ✓ Sensor-CASSY 524013
  - ✓ CASSY Lab2 524220
  - ✓ Источник тока 524031
  - ✓ датчик вращательного движения S 524082
  - ✓ Vbox 524038
  - ✓ датчиком давления и 529038
  - ✓ Двигатель на горячем воздухе 388182
  - ✓ Кордовая нить
  - ✓ Винтовая пружина из 35208ET2
  - ✓ U-сердечник с вилкой 56211
  - ✓ Зажимное устройство с пружинным зажимом 562121
  - ✓ катушка индуктивности, 500 витков 56221
  - ✓ низковольтная катушка индуктивности, 50 витков 56218
  - ✓ ПВХ трубки,  $\varnothing$  8 мм 307 70
  - ✓ Водяной насос 12 В388181
  - ✓ Низковольтный источник питания 521231
  - ✓ Соединительные провода, 100 см, черный 50133
  - ✓ Резервуар для воды 10 л
- 

## **Порядок выполнения работы**

### **Подготовка эксперимента. Сборка установки**



1. Снимите завинчивающей колпачок на выходе из головки цилиндра с трубок, по которым течет охлаждающая вода. Вставьте термометр в температурную вставку, и зажмите его с помощью гайки GL18.

#### **Охлаждение двигателя:**

1. Заполните канистру примерно 10 л воды.
2. Подключите выход насоса к трубке, по которой втекает в двигатель поток охлаждающей воды, и опустите насос в воду, направьте слив воды из двигателя в канистру.
3. Подключите насос к источнику питания низкого напряжения диапазон 12В. При необходимости, ослабьте шайбу GL я на короткое время, позволяя воде подняться немного в стеклянную трубку, потом закрепите шайбу GL.

#### **Настройка двигателя на горячем воздухе:**

1. Поставьте электродвигатель, и подключить его к блоку управления.
2. Установите приводной ремень на маховик диска, и присоедините его к поворотному колесу электрического двигателя.

#### **Измерение частоты:**

1. Приложите диск с отверстиями от аксессуаров для двигателя горячего воздуха к коленчатому валу.
2. Консоль для измерения частоты включить в розетку, с помощью кнопки «mode» установить измерение частоты, горит индикатор «Hz», вход «E».
3. Направление луча света приведите в соответствие с отверстием, расположенным на диске.

#### **Установка термометра и нагревателя.**

1. Удалите нить "термометр с подогревом" из контакта штифтов.
2. Отвинтите винт прокладки из "головки цилиндра, и установите "термометр с нагревателем» на головку цилиндра.
3. Положите нить обратно на контактные штырьки, а также следите за тем, чтобы нить не касалась стекла термометра.
4. Осторожно прикрепите колпачок головки цилиндра на цилиндр двигателя горячего воздуха.
5. Поверните маховик двигателя горячего воздуха, и убедитесь, что нить не касается перемещающегося поршня в любом положении поршня.
6. Подключите переменное сверхнизкое напряжение через трансформатор S на нагреватель вместе с вольтметром и амперметром (диапазон измерений 10А).

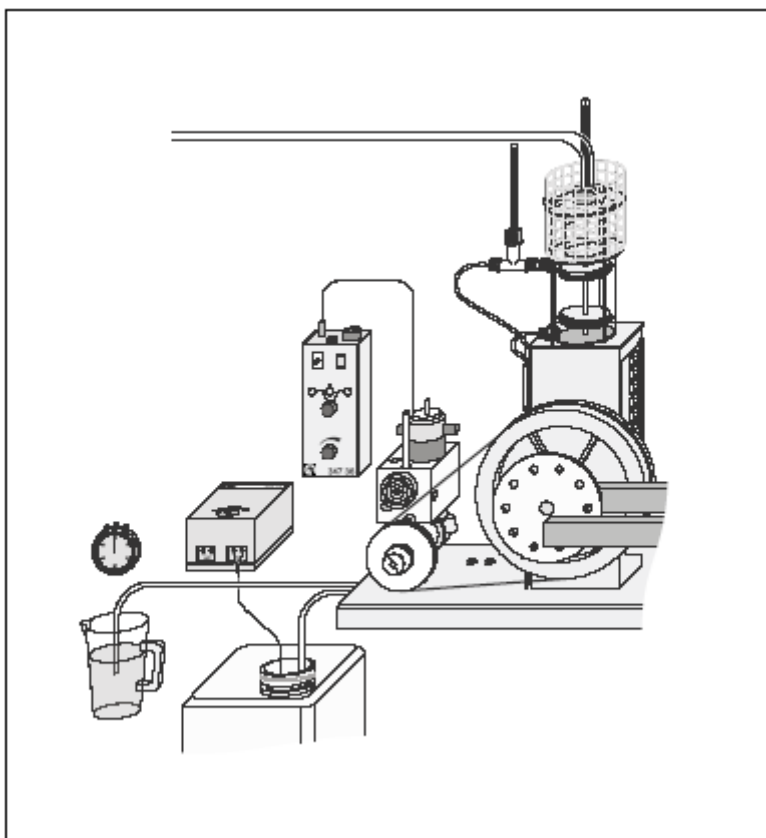


Рис.2. Определение объема вытекающей воды  $\Delta V$  за время  $\Delta t$ .

### Требования безопасности

- ✓ До проведения каждого эксперимента, убедитесь, что горячая пластина помещена в пазы и нагретая нить не касается перемещающегося поршня.
- ✓ Нагретая часть двигателя может стать очень горячей, шатуны при движении и перемещения поршней могут вызвать травмы при работе двигателя. По этой причине всегда используйте защитный чехол от прикосновений, когда двигатель работает.
- ✓ Никогда не используйте двигатель без охлаждающего потока воды. Вы можете соединить двигатель с краном с водопроводной водой или использовать циркуляционный насос с резервуаром; в этом случае рекомендовано использование дистиллированной или кипячёной (без окалины) воды. Если поток уменьшился при использовании водопроводной воды, промойте всю систему теплой (без окалины) водой. Циркуляция воды должна быть безупречна. Не допускайте перегрева. Когда вода попадает в контур охлаждения, температура охлаждающей воды не должна превышать  $30^{\circ}\text{C}$ .
- ✓ Смазывайте два цилиндра двигателя силиконовым маслом регулярно. Самый простой способ сделать это - убрать горячую пластину, подвинуть перемещающийся поршень к нижней мёртвой точке, с помощью соломинки накапать силиконового масла из сжатой бутылки, так чтобы оно потекло вниз по стенке цилиндра на вершину поршневого кольца. Так как перегородка не полностью непроницаема, необходимое масло достигнет нижнего поршневого кольца за короткое время.
- ✓ Никогда не подключайте сетевую обмотку (56221) без сердечника трансформатора.

### Выполнение эксперимента

1. Включите охлаждающую воду (для этого, установить, низковольтный блок питания в положение 12В), проверьте циркуляцию, и ждите, пока вода не побежит обратно через выпускающую трубу.
2. Положите конец выходной трубы в пластмассовый стаканчик, и определите объем вытекающей воды  $\Delta V$  за интервал времени  $\Delta t$  (см. рис 2.).
3. Измерить температуру  $\theta_1$  в головке цилиндра.
4. Установите переключатель (а) в среднее положение (режим ожидания), установите ручку настройки скорости (b) в среднюю позицию, и включите блок управления.
5. Измеряйте температуру  $\theta$  охлаждающей воды через каждые 2 минуты, и ждите до тех пор, пока температура не стабилизируется
6. Поверните переключатель (а) влево ( вращение по часовой стрелке) и измерьте частоту вращения двигателя на горячем воздухе. Скорость вращения двигателя получается из измеренной частоты деленной на количество отверстий диска.
7. Включите трансформатор сверхнизкого напряжения S, а также выберите U напряжение нагрева так, чтобы температура  $\theta_1$  оставалось постоянной, несмотря на работу двигателя.
8. При необходимости, отрегулируйте U напряжение нагрева, а также измените ток нагрева.
9. Измерение температуры воды проводить через каждые 2 минуты, и ждать, пока температура не достигнет максимального значения.
10. Остановите электродвигатель, переведя регулятор «а» в среднее положение, и продолжайте измерять температуру охлаждающей воды.
11. Определите изменение температуры  $\Delta\theta$  охлаждающей воды. Если объем доступной воды охлаждения слишком мал, температура Дьюара будет также расти. Измерьте температуру  $\Delta\theta$ , а потом внесите исправления, соответственно.
12. Измените скорость вращения электродвигателя с помощью ручки настройки скорости (b), и повторите измерения для пяти значений частоты.

---

#### Обработка и представление результатов

1. Результаты измерений занесите в таблицу 1, Таблица 1.

Частота (Гц)	Напряжение (В)	Сила тока (А)	Изменение температуры (°С)

2. Рассчитайте  $Q_1$ ,  $Q_2$ ,  $W_R$ ,  $W$  и результаты занесите в таблицу 2.



Таблица 2.

Частота (Гц)	$Q_1$ (Дж)	$Q_2$ (Дж)	$W_R$ (Дж)	$W$ (Дж)

3. Определите коэффициент полезного действия  $\eta$  двигателя по формуле (3), и результаты расчета представить в виде графика зависимости коэффициента полезного действия от частоты вращения двигателя.

## 242.4. $pV$ ДИАГРАММА ДВИГАТЕЛЯ, РАБОТАЮЩЕГО НА НАГРЕТОМ ВОЗДУХЕ

---

### *Введение*

Термодинамические квазистатические циклы можно описать замкнутой кривой на диаграмме  $pV$  ( $p$  - давление,  $V$  - объем). Работе, совершённой системой или над системой (в зависимости от направления вращения) соответствует площадь фигуры, ограниченной этой кривой. Данный эксперимент записывает  $pV$  диаграмму двигателя, работающего на горячем воздухе. Датчик давления измеряет давление  $p$  в цилиндре, а датчик перемещения измеряет положение поршня, которое позволяет вычислить объем, как функцию времени.

---

### *Цель работы*

Знакомство с законами тепловых машин, работающих по замкнутому циклам

---

### *Решаемые задачи*

- ✓ Запись цикла теплового двигателя в координатах  $pV$
  - ✓ Вычисление полезной работы двигателя
- 

### *Экспериментальная установка*

#### **Приборы и принадлежности**

- ✓ Sensor-CASSY 524013
- ✓ CASSY Lab2 524220
- ✓ Источник тока 524031
- ✓ датчик вращательного движения S 524082
- ✓ Vbox 524038
- ✓ датчиком давления и 529038
- ✓ Двигатель на горячем воздухе 388182
- ✓ Кордовая нить
- ✓ Винтовая пружина из 35208ET2
- ✓ U-сердечник с вилкой 56211
- ✓ Зажимное устройство с пружинным зажимом 562121
- ✓ катушка индуктивности, 500 витков 56221
- ✓ низковольтная катушка индуктивности, 50 витков 56218
- ✓ ПВХ трубки,  $\varnothing$  8 мм 307 70
- ✓ Водяной насос 12 В388181
- ✓ Низковольтный источник питания 521231

- ✓ Соединительные провода, 100 см, черный 50133
- Резервуар для воды 10 л

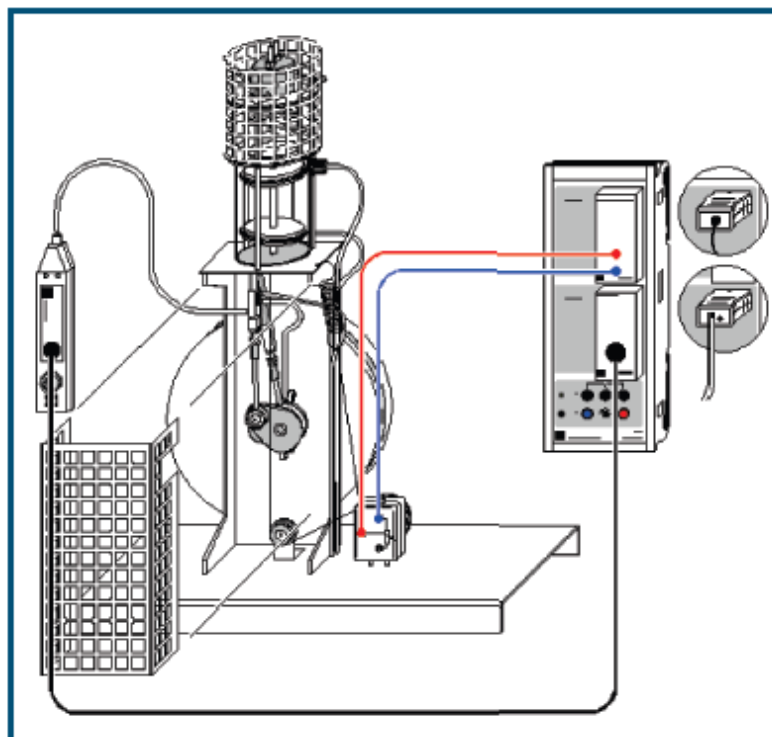


Рис.1

---

### *Порядок выполнения работы*


#### **Подготовка эксперимента. Сборка установки**

1. Установите съёмный трансформатор и зажмите скобу на нём.
2. Установите горячую пластину как описано в экспериментальной установке и подсоедините нагреватель к двум внешним разъёмам низковольтной катушки, используя два соединительных провода.
3. Вставьте шланг датчика давления в штуцер давления рабочего поршня шатуна. Датчик давления подключите к Vbox на входе BSensor-CASSY.
4. Прикрепите датчик перемещения к опорной плите с двумя соединительными разъёмами и подключите его ко входу ASensor-CASSY.
5. Рабочий поршень снабжен иглой с ушком на нижнем конце для крепления шнура. Подвесьте возвратную пружину в отверстие основания. Она должна быть растянута, когда цилиндр находится в нижней мертвой точке. Обмотайте шнур два раза вокруг блока датчика перемещения, чтобы предотвратить скольжение! При калибровке датчика имейте в виду, что объём цилиндра при положении поршня в верхней мертвой точке приблизительно  $50 \text{ см}^3$ .

### Требования безопасности

- ✓ До проведения каждого эксперимента, убедитесь, что горячая пластина помещена в пазы и нагретая нить не касается перемещающегося поршня.
- ✓ Нагретая часть двигателя может стать очень горячей, шатуны при движении и перемещения поршней могут вызвать травмы при работе двигателя. По этой причине всегда используйте защитный чехол от прикосновений, когда двигатель работает.
- ✓ Никогда не используйте двигатель без охлаждающего потока воды. Вы можете соединить двигатель с краном с водопроводной водой или использовать циркуляционный насос с резервуаром; в этом случае рекомендовано использование дистиллированной или кипячёной (без окалины) воды. Если поток уменьшился при использовании водопроводной воды, промойте всю систему теплой (без окалины) водой.
- ✓ Смазывайте два цилиндра двигателя силиконовым маслом регулярно. Самый простой способ сделать это - убрать горячую пластину, подвинуть перемещающийся поршень к нижней мёртвой точке, с помощью соломинки капнуть силиконового масла из сжатой бутылки, так чтобы оно потекло вниз по стенке цилиндра на вершину поршневого кольца. Так как перегородка не полностью непроницаема, необходимое масло достигнет нижнего поршневого кольца за короткое время.
- ✓ Никогда не подключайте сетевую обмотку (56221) без сердечника трансформатора.

### Выполнение эксперимента

1. Загрузите настройки CASSYc Рабочего стола. Students results/242AAP/pV-diagram(hot-air-engine)-2.labx
2. Проверьте датчик перемещения, чтобы убедиться, что он работает правильно: поверните мотор один раз рукой и наблюдайте, находится ли отображаемый объём в пределах диапазона измерения. Если это не так, слегка ослабьте шнур, поверните колесо датчика перемещения, пока отображаемое значение не станет правильным.
3. Включите подогрев с помощью переключателя на сетевой катушке. При запуске в первый раз, вы должны подождать примерно 1 минуту до запуска двигателя, пока газ станет достаточно горячим для легкого запуска. В последующих экспериментах вы можете запустить двигатель, когда нагревательная спираль начинает светиться.
4. Начните измерение, нажав кнопку  (F9). Программа автоматически записывает и отображает определенное количество измеряемых точек; измерение настроено работать всего несколько циклов, чтобы упростить последующее интегрирование.
5. Проверьте правильно ли вычисляется объем. Он должен получаться путем умножения площади поршня ( $28,3 \text{ см}^2$ , т.к. диаметр составляет 60 мм) на путь поршня  $S_{A1}$ .
6. Работа за цикл определяется как площадь фигуры ограниченной полученной кривой. Для её вычисления выберите Calculate Integral (Peak Area) в меню Evaluations (нажмите правой кнопкой мыши на

диаграмму) и отметьте один цикл (нажмите на начальную точку, нажмите и удерживайте левую кнопку мыши и перетащите указатель вдоль цикла). Точки, используемые для интегрирования, будут выделены. При отпускании кнопки мыши, площадь цикла будет выделена цветом, и соответствующее значение отобразится в строке состояния Status line.

**Замечание.** Мощность двигателя составляет  $P = W f$ , где  $f$  частота холостого хода или скорость. Вы можете определить частоту  $f$  с помощью светового барьера и счетчика. Другим способом является использование изображения частотного спектра Frequency Spectrum (нажмите на эту вкладку с помощью мыши). Однако, лучшее частотное разрешение требует больших измеренных значений, чем записано в примере (увеличьте число от 125 до, например, 2000 в диалоговом окне Параметры измерения Measuring Parameters dialog).

## 243. ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ТЕПЛООВОГО НАСОСА

### Введение

Тепловой насос, схема которого представлена на рисунке 1, извлекает энергию из теплового резервуара с температурой  $T_1$  при испарении охлаждающей жидкости и передает энергию в резервуар с температурой  $T_2$  в процессе конденсации газа - теплоносителя. В результате разность температур  $\Delta T = T_2 - T_1$  между двумя резервуарами увеличивается. Эффективность теплового насоса определяется следующим отношением:

$$\varepsilon = \frac{Q_2}{A}, \quad (1)$$

где  $Q_2$  – количество теплоты, переданное тепловым насосом в резервуар с температурой  $T_2$  за определенный промежуток времени и  $A$  – работа, затраченная на процесс передачи за тот же промежуток времени. Коэффициент полезного действия поршневого компрессора приметно равен 80%. Мы будем приближенно считать, что производимая компрессором работа  $A$  равна потребляемой им электрической энергии  $W$ .

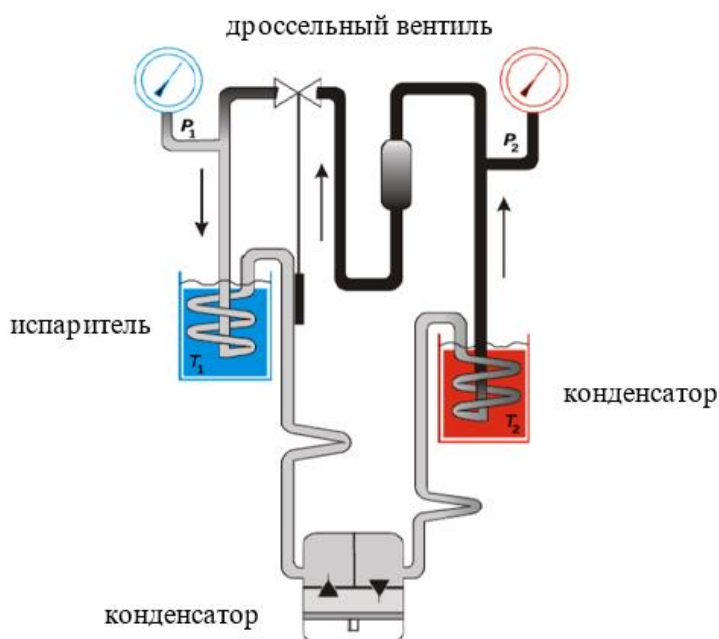


Рис.1 Схема теплового насоса

Эффективность теплового насоса может достигать значений больше единицы. На первый взгляд, это противоречит первому началу термодинамики. Но это не так, достаточно понять, что речь идет об использовании электрической энергии (работы) для переноса

тепловой энергии (теплоты), а не использование количества теплоты для производства работы, как в тепловых машинах. Запишем закон сохранения энергии для всего процесса (предполагается, что все величины положительные):

$$Q_2 = A + Q_1 - Q_{II}, \quad (2)$$

где  $Q_1$  - энергия, полученная из резервуара с температурой  $T_1$  и  $Q_{II}$  - потери энергии в процессе, характеризующиеся потерей теплоты в нагреваемом резервуаре, в трубопроводе теплового насоса и компрессоре. Таким образом, эффективность теплового насоса может быть больше единицы, если тепловая энергия, взятая теплоносителем из резервуара с температурой  $T_1$  больше энергии потерь  $Q_{II}$ :

$$\frac{Q_2}{A} = \frac{W + Q_1 - Q_{II}}{A} = 1 + \frac{Q_1 - Q_{II}}{A}, \quad (3)$$

Целью данного эксперимента является определение эффективности теплового насоса как функции разности температур между теплым и холодным резервуаром:  $\Delta T = T_2 - T_1$ . В данном эксперименте используется две емкости с водой, в качестве резервуаров 1 и 2. Холодная вода имеет температуру  $T_1$ , а теплая вода - температуру  $T_2$ . Эффективность нагрева тепловым насосом можно записать как:

$$\frac{Q_2}{\Delta t} = \frac{\Delta T_2}{\Delta t} \cdot c \cdot m, \quad (4)$$

где  $\Delta T_2$  - изменение температуры воды в нагреваемой емкости за малый промежуток времени  $\Delta t$ ,  $m$  - масса воды и  $c$  - удельная теплоемкость воды.

С учетом выражения (4), эффективность теплового насоса определяется соотношением:

$$\varepsilon = \frac{Q_2}{A} = \frac{Q_2}{W} = \frac{\Delta T_2 \cdot c \cdot m}{P \cdot \Delta t}. \quad (5)$$

Энергия  $Q_2$  рассчитывается по изменению температуры  $\Delta T_2$  за промежуток времени  $\Delta t$ .

Затрачиваемая компрессором мощность  $P = \frac{W}{\Delta t}$  измеряется ваттметром.

---

### **Цель работы**

- ✓ Определение эффективности теплового насоса в зависимости от разности температур тепловых резервуаров

---

### **Решаемые задачи**

- ✓ Понять принципы работы теплового насоса
- ✓ Определить эффективность теплового насоса

---

## Экспериментальная установка

### Приборы и принадлежности

- ✓ тепловой насос
- ✓ ваттметр
- ✓ цифровой вольтметр
- ✓ два датчика температуры (термопары)
- ✓ секундомер

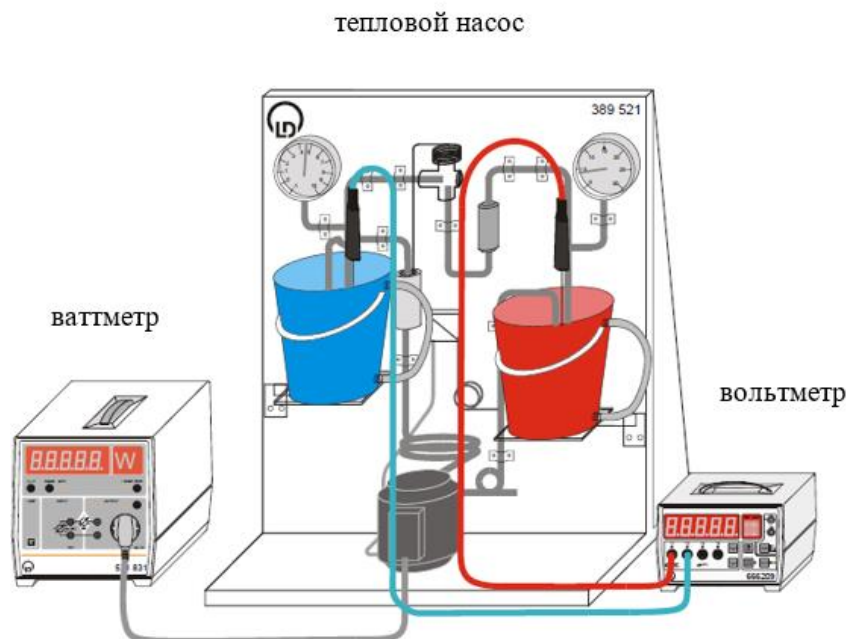


Рис.2 Схема экспериментальной установки

---

### Порядок выполнения работы

#### Подготовка установки к работе

1. Налить по 4 литра воды в ведра. Аккуратно установить ведра на подставки.
2. Зафиксировать термометры в держателях (поместите в соответствующие пазы), расположенных на медных трубках конденсатора и испарителя.
3. Включить ноутбук. Запустить на ноутбуке выполнение программы CASSYLab2. Загрузить настройки для работы: File-Open:D:\эксперименты\243.
4. В левой панели настроек в строке Temperature выбрать поле com4.
5. Включить ваттметр и вольтметр (тумблеры расположены на задней панели приборов).

#### Проведение измерений

1. Включить компрессор, поставив галочки в пунктах настроек (Window-Show Settings): Settings – CASSYs and other devices – Joule and Watt Meter – Active power  $P$  и Voltage  $U$  (115/220V).



2. Через 3 минуты запустить измерение температуры (клавиша F9).
3. В течение эксперимента необходимо медленно помешивать воду в резервуарах с холодной и теплой водой.
4. Пронаблюдать изменение температуры  $T_1$  и  $T_2$  от времени во вкладке Standart.
5. Во вкладке Efficiency представлена таблица и график зависимости эффективности теплового насоса  $\varepsilon$  от разности температур  $\Delta T = T_2 - T_1$  в резервуарах.
6. Через 15 минут (900 секунд) измерение температуры автоматически остановится.
7. Отключить компрессор, поставив галочку в пункте настроек (Window-Show Settings): Settings – CASSYs and other devices – Joule and Watt Meter – Voltage  $U$ .
8. В случае последующей обработки данных на компьютере выделить и сохранить результаты экспериментов нажатием F2: D:\Students\Номер группы\Фамилия.
9. Вернуть установку в исходное состояние.

---

#### *Обработка и представление результатов*

1. Представить графики зависимости температуры  $T_1$  и  $T_2$  от времени и эффективности теплового насоса  $\varepsilon$  от разности температур  $\Delta T = T_2 - T_1$  в отчете к работе. В случае ручной обработки графиков ограничится тридцатью экспериментальными точками, сохранив при этом весь диапазон значений измеренных величин.
- 2 Проанализировать зависимость эффективности теплового насоса  $\varepsilon$  от разности температур  $\Delta T$ .

---

#### *Список дополнительной литературы*

Гелясин А.Е. Тепловой насос — холодильник наоборот // Фізика: проблеми викладання. – 2009. – № 2. – С. 44-50. <http://www.alsak.ru/item/335-7.html>

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

### №231 «Определение скрытой теплоты фазовых переходов»

2.3.1.1 Определение удельной теплоты парообразования воды

2.3.1.2 Определение удельной теплоты плавления льда

- 1) Физический смысл скрытой теплоты испарения, плавления.
- 2) Фазовая диаграмма состояния вещества. Какая точка диаграммы называется тройной, какая критической?
- 3) Рассмотрите процессы кипения, конденсации и кристаллизации.
- 4) Что такое перегретая жидкость, перенасыщенный пар?
- 5) Фазовые переходы I и II рода.
- 6) Уравнения Клайперона-Клаузиуса.

### №232 «Наблюдение фазового перехода жидкость-газ в критической точке»

- 1) Физический смысл скрытой теплоты испарения, плавления.
- 2) Фазовая диаграмма состояния вещества. Какая точка диаграммы называется тройной, какая критической?
- 3) Рассмотрите процессы кипения, конденсации и кристаллизации.
- 4) Что такое перегретая жидкость, перенасыщенный пар?
- 5) Фазовые переходы I и II рода.
- 6) Уравнения Клайперона-Клаузиуса.

### №233 «Исследование кривой упругости водяного пара»

- 1) Физический смысл скрытой теплоты испарения, плавления.
- 2) Фазовая диаграмма состояния вещества. Какая точка диаграммы называется тройной, какая критической?
- 3) Рассмотрите процессы кипения, конденсации и кристаллизации.
- 4) Что такое перегретая жидкость, перенасыщенный пар?
- 5) Фазовые переходы I и II рода.
- 6) Уравнения Клайперона-Клаузиуса.

### №234 «Повышение точки кипения воды»

- 1) Насыщенные и ненасыщенные растворы.
- 2) Единицы концентрации растворов и их соотношение.
- 3) Законы Генри.
- 4) Закон Вант Гоффа.
- 5) Криоскопическая и эбулиоскопическая постоянные жидкости.
- 6) Осмос, осмотическое давление.

### №235 «Понижение точки замерзания воды»

- 1) Насыщенные и ненасыщенные растворы.
- 2) Единицы концентрации растворов и их соотношение.
- 3) Законы Генри.
- 4) Закон Вант Гоффа.
- 5) Криоскопическая и эбулиоскопическая постоянные жидкости.
- 6) Осмос, осмотическое давление.

### **№236 «Давление насыщенного пара»**

1. Что представляет собой фазовая диаграмма состояния вещества?
2. Какая точка фазовой диаграммы называется тройной, а какая критической?
3. При каких условиях газ нельзя перевести в жидкое состояние путем сжатия?
4. Какие состояния вещества называются метастабильными и при каких условиях они возникают?
5. Для кипения, конденсации и кристаллизации необходимы центры-зародыши новой фазы. За счет чего они возникают? Будет ли создавать разряжение водоструйный насос, если вместо воды через него пропускать сжатый воздух?
6. Чем ограничен уровень вакуума, достигаемый с помощью водоструйного насоса? Зависит ли он от типа пропускаемой жидкости и ее температуры?

### **№241 «Преобразование различных видов энергии в тепло»**

2.4.1.1 Превращение механической энергии в теплоту - Регистрация и анализ данных с помощью CASSY

2.4.1.2 Превращение электрической энергии в теплоту - измерения с CASSY

- 1) Первое начало термодинамики
- 2) Второе начало термодинамики
- 3) Циклические процессы.
- 4) Тепловые, холодильные машины.
- 5) Коэффициент полезного действия.
- 6) Первая, вторая теоремы Карно

### **№242 «Исследование режимов работы двигателя на нагретом воздухе»**

2.4.2.1 Фрикционные потери в двигателе на нагретом воздухе (тепловые измерения)

2.4.2.2 Определение эффективности двигателя на нагретом воздухе как теплового двигателя

2.4.2.3 Определение эффективности двигателя на нагретом воздухе как холодильника

2.4.2.4 pV диаграмма двигателя на нагретом воздухе - Запись и анализ с помощью CASSY

- 1) Циклы. Тепловые машины.
- 2) Второе начало термодинамики. Формулировки второго начала термодинамики Клаузиуса, Кельвина.
- 3) Первая, вторая теоремы Карно.
- 4) Как использовать экспериментальную установку в качестве нагревателя, в качестве холодильника? Объясните принцип работы.
- 5) Корректно ли использовать формулу Карно для расчета КПД машины Стирлинга?

### **№243 «Исследование режимов работы теплового насоса»**

2.4.3.1 Определение зависимости эффективности теплового насоса от разности температур

2.4.3.2 Изучение функции расширительного клапана теплового насоса

2.4.3.3 Анализ циклических процессов в тепловом