

Министерство образования и науки Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
Национальный минерально-сырьевой университет «Горный»

Кафедра Общей и технической физики  
(лаборатория виртуальных экспериментов)

## **Цикл тепловой машины**

*Методические указания к виртуальной лабораторной работе  
для студентов всех специальностей*

САНКТ-ПЕТЕРБУРГ  
2015

УДК 531/534 (075.83)

**СТАТИСТИЧЕСКАЯ ФИЗИКА И ТЕРМОДИНАМИКА:**

Лабораторный практикум курса общей физики. Кожокарь М. Ю., Водкайло Е. Г. / Национальный минерально-сырьевой университет «Горный» С-Пб, 2015, 22 с.

Лабораторный практикум курса общей физики по статистической физике и термодинамике предназначен для студентов всех специальностей Национального минерально-сырьевого университета «Горный».

С помощью учебного пособия студент имеет возможность, в предварительном плане, ознакомиться с физическими явлениями, методикой выполнения лабораторного исследования и правилами оформления лабораторных работ.

Выполнение лабораторных работ практикума проводится студентом индивидуально по графику.

Табл. 6. Ил. 4. Библиогр.: 5 назв.

Научный редактор доц. *Н. Н. Смирнова*

© Национальный минерально-сырьевой  
университет «Горный», 2015

## **Введение**

Цель проведения лабораторного практикума, как и проведения дисциплины в целом – обеспечить приобретение знаний и умений по физике в соответствии с Федеральным государственным образовательным стандартом (ФГОС) по различным направлениям подготовки специалистов и бакалавров.

В соответствии с требованиями ФГОС к результатам освоения дисциплины лабораторный практикум направлен на формирование общих и профессиональных компетенций заключающихся в способностях:

- организовать свою работу для достижения поставленных целей;
- применять на практике приобретенные навыки при поведении и описании исследований, в том числе экспериментальных;
- работать самостоятельно;
- использовать инновационные идеи;
- принимать участие в научно-исследовательских разработках по профилю подготовки.

Виртуальный лабораторный практикум по физике в рамках дополнения натурального и модельного вариантов, при обеспечении требуемой точности, делает виртуальный эксперимент существенным элементом повышения качества обучения и усиления его мотивации. Кроме того, физические задачи, выраженные не только в текстовом виде, но и представленные в модельно объёмном лабораторном варианте, позволяют обучать принятию технических решений различных уровней. Это является весьма важным элементом инженерного образования.

В виртуальной лабораторной работе реальную установку имитирует системный блок компьютера. Пульт управления является клавиатура. Монитор совмещает функцию цифрового индикатора измерительных приборов и экрана для наблюдения за работой установки и изучаемыми процессами. Элементы виртуальной установки реагируют на действия пользователя, которые регламентируются методическими указаниями.

Для экспериментального изучения принципа работы тепловой машины и определения циклов её работы предлагается виртуальная представленная лабораторная работа. Программное обеспечение работы позволяет исследовать тепловую машину и производить измерения в прямом и обратном цикле. Студенты при выполнении базовых заданий на основе экспериментальных данных определяют такие параметры как объем  $V$ , давление  $p$ , температуру  $T$  и производят оценку работы  $A$  графически, построив график зависимости  $p = f(V)$  по результатам измерения параметров состояния газа в процессе сжатия.

Методика проведения измерений, обработки экспериментальных данных, оценки погрешностей прямых и косвенных измерений, а также процедура подготовки студентов к выполнению работы и защиты отчетов производится в таком же порядке, как и при выполнении работ реального физического практикума в соответствии требованиями кафедры Общей и технической физики.

# 1. ТЕПЛОВЫЕ МАШИНЫ

## 1.1 Цикл Карно. КПД тепловых двигателей

Впервые наиболее совершенный циклический процесс был предложен французским физиком и инженером Сади Карно в 1824 г. Карно прожил короткую жизнь – всего 36 лет, но оставил в науке яркий след и пример плодотворного взаимного влияния науки и техники. В своем труде "Размышления о движущей силе огня и о машинах, способных развивать эту силу" Сади Карно заложил основы теории тепловых машин.

Рассмотрим цикл Карно подробнее. Пусть газ, занимающий объем  $V_1$  и имеющий температуру  $T_1$  (температура нагревателя), приводится в тепловой контакт с нагревателем и получает возможность изотермически расширяться и совершать работу. Газ получает при этом от нагревателя некоторое количество теплоты  $Q_1$ . Этот процесс представлен на рис. 1 а изотермой  $ab$ .

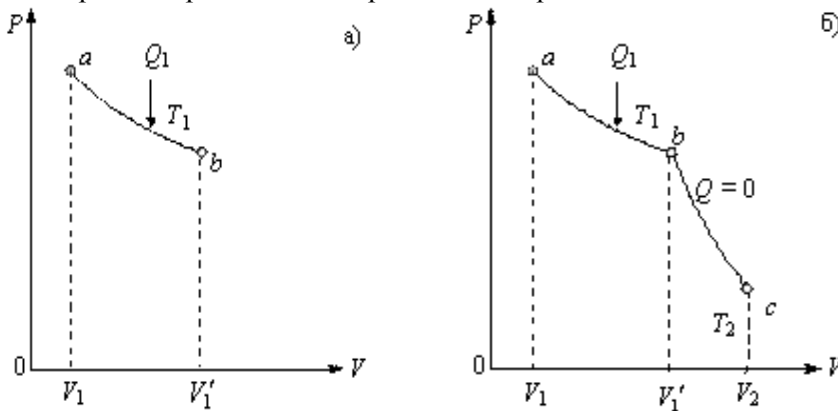


Рис. 1.

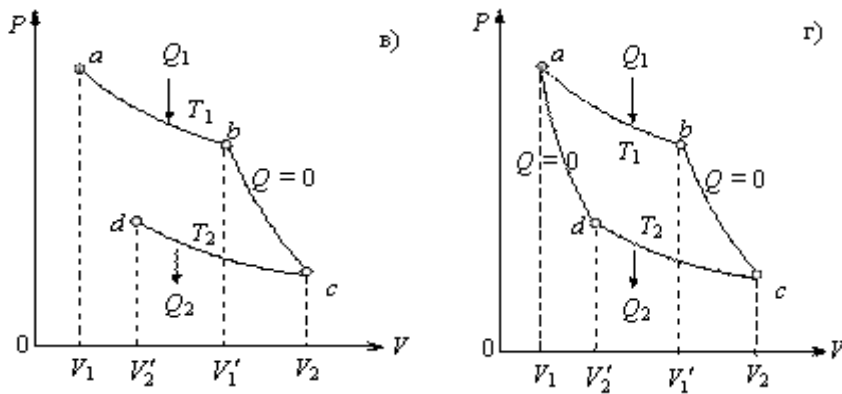


Рис. 1.

Далее газ должен быть сжат, но, как уже было отмечено, при более низкой температуре, то есть изотерма сжатия должна быть ниже изотермы расширения. Только в этом случае работа расширения будет больше работы сжатия. Но мы помним, что газ не следует охлаждать соприкосновением с более холодным телом, чтобы исключить теплопередачу без совершения работы.

Сади Карно писал: "В телах, употребляемых для развития движущей силы тепла, не должно быть ни одного изменения температуры, происходящего не от изменения объема". Другими словами, температура рабочего тела не должна изменяться без совершения работы. Значит, остается единственная возможность – охлаждать газ, предоставив ему возможность адиабатически расширяться. Поэтому изотермический процесс расширения не доводят до конца хода поршня в цилиндре. Когда объем газа становится равным  $V_1'$ , дно цилиндра изолируют от нагревателя; после этого газ адиабатно расширяется до объема  $V_2'$ , соответствующего максимальному ходу поршня в цилиндре (рис. 1 б, кривая  $bc$ ). При этом газ охлаждается до температуры  $T_2$ . Теперь охлажденный газ можно изотермически сжимать при температуре  $T_2$ . Для этого его нужно привести в контакт с телом, имеющим ту же температуру  $T_2$  (холодильник), и сжимать газ внешней силой. Однако в этом процессе газ никогда не вернется в начальное

состояние – температура его  $T_2$  будет все время ниже  $T_1$ . Поэтому изотермическое сжатие доводят до некоторого промежуточного объема (рис. 1 в, кривая  $cd$ ). В процессе изотермического сжатия газ отдает холодильнику некоторое количество теплоты  $Q_2$ , равное совершаемой над ним работе сжатия. После этого газ подвергают адиабатическому сжатию, в ходе которого его температура повышается до значения  $T_1$  (рис. 1 г, кривая  $da$ ). После завершения цикла газ вернулся в первоначальное состояние (объем  $V_1$ , температура  $T_1$ ) и цикл можно повторить.

Итак, на участке  $abc$  газ совершает работу ( $A > 0$ ), а на участке  $cda$  работа совершается над газом ( $A < 0$ ). На участках  $bc$  и  $da$  работа совершается только за счет изменения внутренней энергии газа. Так как  $\Delta U_{bc} = -\Delta U_{da}$ , то и  $A_{bc} = -A_{da}$ . Таким образом, полная работа за цикл определяется разностью работ на участках  $ab$  и  $cd$ . Численно эта работа равна площади фигуры, ограниченной кривой цикла  $abcd$ .

На участке  $ab$  газ получает от нагревателя количество теплоты  $Q_1$ , а на участке  $cd$  он непременно должен отдать холодильнику теплоту  $Q_2$ , следовательно, в полезную работу преобразуется только часть полученной газом теплоты, равная  $Q_1 - Q_2$ , и КПД цикла равен:

$$\eta = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = \frac{A}{Q_1} \quad (1).$$

Цикл Карно на всех стадиях процесса был проведен таким образом, что нигде не было соприкосновения тел с различной температурой. Это исключало возможность теплопередачи без совершения работы, то есть исключало переход беспорядочного движения молекул одного тела в беспорядочное движение молекул других тел. Именно по этой причине идеальный обратимый цикл Карно характеризуется наибольшим значением КПД в заданном интервале температур нагревателя и холодильника. По сути дела, КПД цикла Карно определяет теоретический предел возможных значений КПД тепловой машины для данного температурного интервала.

Как показал С. Карно, КПД предложенного им цикла может быть выражен через температуры нагревателя  $T_1$  и холодильника  $T_2$ . Он оказывается равным:

$$\eta = \frac{T_1 - T_2}{T_1} \quad (2).$$

В реальных двигателях не удается осуществить цикл, состоящий из идеальных изотерм и адиабат. Дело в том, что процессы в двигателях происходят быстро, и изотермичность процессов нарушается – понижение температуры в результате элементарного расширения "не успевает" скомпенсироваться повышением температуры за счет контакта с нагревателем. Кроме того, материалы, из которых изготавливаются стенки цилиндра и поршень, не являются идеальными изоляторами и по этой причине нарушается адиабатичность процессов. Поэтому КПД реальных циклов всегда ниже, чем КПД идеального цикла Карно.

Вместе с тем рассмотрение идеального цикла Карно имеет большое значение, поскольку указывает пути повышения КПД тепловых двигателей. Из формулы (2) видно, что КПД двигателей тем больше, чем выше температура нагревателя и чем ниже температура холодильника.

В современных двигателях КПД обычно увеличивают за счет повышения температуры нагревателя. В мощных паровых турбинах в настоящее время используется пар, температура которого достигает  $600^\circ \text{C}$ . В газовых турбинах температура газа достигает  $900^\circ \text{C}$ . Дальнейшее повышение температуры нагревателя ограничивается жаростойкостью используемых материалов.

### **1.2 Работа совершаемая тепловой машиной**

Любая тепловая машина работает по принципу кругового (*циклического*) процесса, т.е. возвращается в исходное состояние (рис. 1 г). Но чтобы при этом была совершена полезная работа, возврат должен быть произведен с наименьшими затратами.

Полезная работа равна разности работ расширения и сжатия, т.е. равна площади, ограниченной замкнутой кривой.



Обязательными частями тепловой машины являются нагреватель (источник энергии), холодильник, рабочее тело (газ, пар).

Зачем нужен холодильник? Так как в тепловой машине реализуется круговой процесс, то вернуться в исходное состояние можно с меньшими затратами, если отдать часть тепла. Или если охладить пар, то его легче сжать, следовательно работа сжатия будет меньше работы расширения. Поэтому в тепловых машинах используется холодильник.

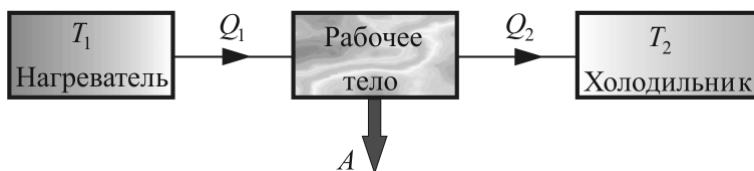


Рис. 2

Прямой цикл используется в *тепловом двигателе* – периодически действующей тепловой машине, совершающей работу за счет полученной извне теплоты. Рассмотрим схему теплового двигателя (рис. 2). От термостата с более высокой температурой  $T_1$ , называемого нагревателем, за цикл отнимается количество теплоты  $Q_1$ , а термостату с более низкой температурой  $T_2$ , называемому холодильником, за цикл передается количество теплоты  $Q_2$  и совершается работа  $A$ :

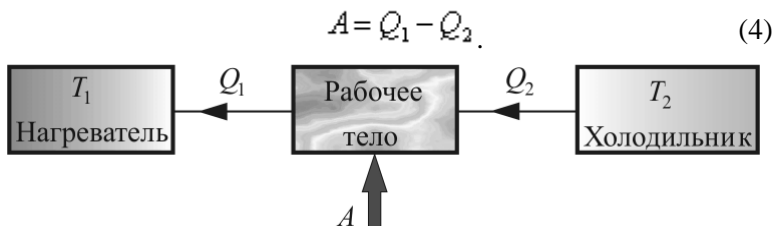


Рис. 3.

*Обратный цикл используется в холодильных машинах* – периодически действующих установках, в которых за счет работы внешних сил теплота переносится к телу с более высокой

*температурой.* Принцип действия холодильной машины представлен на рисунке 3. Системой за цикл поглощается при низкой температуре  $T_2$  количество теплоты  $Q_2$  и отдается при более высокой температуре  $T_1$  количество теплоты  $Q_1$  за счет работы внешних сил  $A$ .

## **2. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА. ЦИКЛ ТЕПЛОВОЙ МАШИНЫ**

**Цель работы:** исследование принципа работы простейшей тепловой машины в прямом и обратном цикле.

Будем называть тепловой машиной устройство, способное переносить тепло от менее нагретого тела к более нагретому. В случае если при этом процессе увеличивается температура теплоприемника за счет неограниченного запаса тепла в более холодном теле, цикл будем называть прямым, в случае уменьшения температуры более холодного тела за счет рассеяния тепла в более теплом теле, цикл будем называть обратным.

В промышленных тепловых машинах не применяется газ в качестве рабочего тела вследствие крайне низкого КПД, но для ознакомления с принципом работы тепловой машины газ в качестве рабочего тела удобен из-за простоты описания происходящих процессов. Рассмотрим основные этапы работы тепловой машины в прямом цикле. Предполагается, что в системе имеется неограниченный источник тепла, т.е. такой источник, который сохраняет свою температуру независимо от процессов теплообмена с ним. В качестве такого источника реально используется окружающая среда (уличный воздух, вода в больших водоемах). В качестве приемника тепла может выступать, например, воздух внутри помещения. За счет тепла источника газ в начале цикла сжатия приобретает температуру источника. В процессе сжатия температура газа повышается, избыточное тепло передается приемнику тепла. При этом часть тепла неизбежно теряется на нагрев частей установки и, в конечном итоге, возврат назад к источнику тепла. Поскольку масса газа в объеме цилиндра много меньше суммарной массы циркулирующей воды в теплоприемнике и деталей установки, теплом, потраченным на нагрев газа можно

пренебречь, тогда уравнение теплового баланса за цикл сжатия можно записать в следующем виде:

$$\delta T \cdot C_{Ж} = A - \delta T \cdot C_{УСТ} \quad (5)$$

где  $\delta T$  - изменение температуры системы за один ход поршня;

$C_{Ж}$  - теплоемкость теплоприемника (воды);

$C_{УСТ}$  - теплоемкость цилиндра и поршня;

$A$  - работа внешних сил по перемещению поршня.

Оценить работу  $A$  можно графически, построив график зависимости  $p = f(V)$  по результатам измерения параметров состояния газа в процессе сжатия.

### Экспериментальная установка

Схема установки изображена на рисунке ниже:

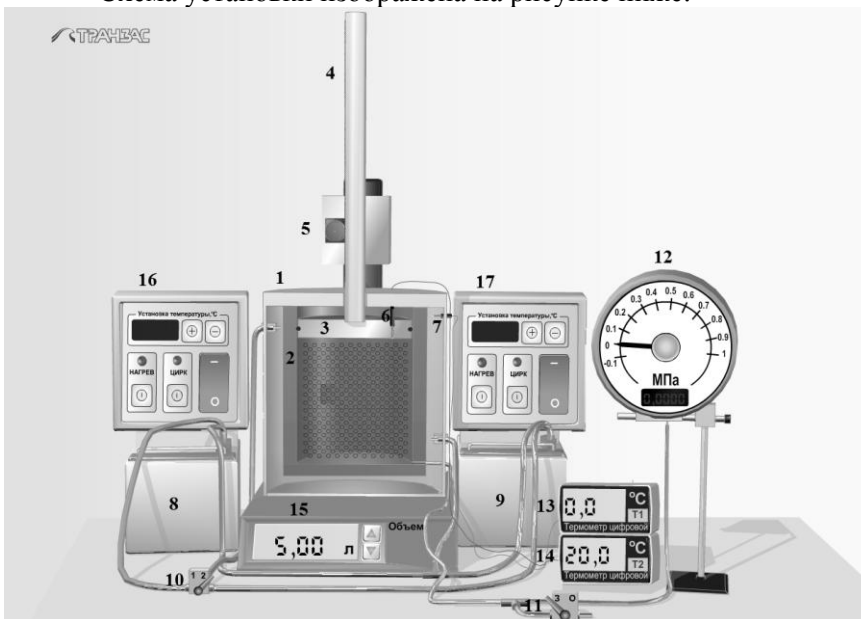


Рис. 4. Общий вид виртуальной экспериментальной установки

**Назначение и характеристика основных элементов установки:**

а) **Термостатированный резервуар** (1), с заключенным в нем цилиндром (2) с поршнем (3). Посредством штока (4) и реверсивного шагового привода (5) поршень может перемещаться в цилиндре. Управляется шаговый привод пультом (15), отображающим текущий объем под поршнем.

Параметры:

- объем под поршнем (геометрический):  $V_{\min} = 0,5 \text{ л}$ ,  $V_{\max} = 5 \text{ л}$ ;
- теплоемкость резервуара:  $C_s = 400 \text{ Дж/}^\circ\text{С}$ .

б) **Термостаты.** Термостатирование объема осуществляется прокачиваемой водой, температура которой поддерживается термостатами (8) и (9), настроенными на поддержание низкой и высокой температуры. Выбор термостата, вода из которого в данный момент подается в объем (1), осуществляется краном (10). Каждый термостат имеет собственный пульт управления: (16) и (17). Термостаты расположены ниже уровня цилиндра и при отключении циркуляционного насоса вода из рубашки цилиндра стекает в соответствующий термостат. Термостат может находиться в трех состояниях:

1) "ВЫКЛ" - переключатели [нагрев] и [цирк.] в положении [выключено], если в этом состоянии термостат подключен к системе краном (12), то в него стекает вода из рубашки цилиндра;

2) "ВКЛ" - переключатели [нагрев] и [цирк.] в положении [включено], при этом на выходе термостата температура равна заданной регулятором [Уст. Т] независимо от величины температуры на входе;

3) "ЦИРК." - переключатель [нагрев] в положении [выключено], переключатель [цирк.] в положении [включено], при этом температура на выходе термостата равна температуре на входе. Допускается любое состояние термостата при любом положении крана (10).

Параметры:

- диапазон задаваемых температур:  $t_{\min} = 10 \text{ }^\circ\text{С}$ ,  $t_{\max} = 98 \text{ }^\circ\text{С}$ ;
- объем циркулирующей воды: 1 л.

в) **Система заполнения цилиндра.** Для заполнения или вентиляции объема цилиндра служит кран (11) - соединяет внутренний объем цилиндра с атмосферой.

г) **Контроль давления.** Для контроля давления служит мановакуумметр (12). Прибор постоянно подключен к внутреннему объему цилиндра. Показания прибора - относительно атмосферного давления.

Параметры:

- шкала мановакуумметра:  $-0,1 \div 0 \div 1,2$  МПа.

д) **Измерение температуры** внутри цилиндра осуществляется термопарой (6), индикация температуры - цифровой термометр (13). Для измерения температуры воды используется термопара (7), индикация температуры - цифровой термометр (14).

Параметры:

- шкала термометра:  $0 \div 200$  °С;

### ЗАДАНИЕ

1. Запустите лабораторную работу. Отметьте в лабораторном журнале указанный преподавателем цикл тепловой машины и температуру источника (приемника) тепла.
2. При открытом кране 11 переведите поршень в верхнее положение, закройте кран 11.
3. Считаем левый термостат источником тепла (приемником). Установите на левом термостате заданную начальную температуру (можно оставить 20°С), переведите термостат в режим НАГРЕВ (режим НАГРЕВ на левом термостате будет включен постоянно).
4. Если исследуется прямой цикл тепловой машины, то подключите к цилиндру краном 10 правый термостат, переведите его в состояние ЦИРК. Запишите параметры состояния ( $p, V, T$ ) газа при верхнем положении поршня. Опускайте поршень вниз, записывая значения параметров ( $p, V, T$ ) через каждые 0,5 л, дожидаясь установления температуры в цилиндре. Далее, выключите режим ЦИРК правого термостата, дождитесь стекания воды из рубашки термостата. Подключите к цилиндру краном 10 левый термостат,

переведите его в состояние ЦИРК. Поднимите поршень в крайнее верхнее положение, дождитесь установления температуры в цилиндре, выключите режим ЦИРК левого термостата, дождитесь стекания воды из рубашки термостата. На этом один цикл работы тепловой машины завершен.

5. Если исследуется обращенный цикл, то подключите к цилиндру краном 10 левый термостат, переведите его в состояние ЦИРК. Опустите поршень вниз до отметки 0,5 л. Дождитесь установления температуры. Выключите режим ЦИРК левого термостата, дождитесь стекания воды из рубашки термостата. Подключите краном 10 к цилиндру правый термостат, включите режим ЦИРК. Запишите параметры состояния ( $p, V, T$ ) газа при нижнем положении поршня. Поднимайте поршень вверх, записывая значения параметров ( $p, V, T$ ) через каждые 0,5 л, дожидаясь установления температуры в цилиндре. Далее, выключите режим ЦИРК правого термостата, дождитесь стекания воды из рубашки термостата. На этом один цикл работы тепловой машины завершен.

6. Используя данные о теплоемкости системы и результаты измерения температуры при рабочем движении поршня, оцените совершенную работу  $A$ . Постройте график рабочего процесса и по нему определите совершенную работу  $A_0$ . Сравните полученные результаты.

7. Повторите действия п.4 (или п.5)  $10 \div 15$  ( $n$ ) раз. Оцените затраченную работу по общему изменению температуры и сравните ее значение с величиной  $n \cdot A_0$ .

Объясните полученное расхождение.

#### Обработка результатов измерений

1. Занесите результаты измерений в таблицы:

Таблица 1.

Физические величины	Номер опыта	1	...	n
	Единицы Измерений			
$T$	К			
$P$	Па			
$V$	л			

Таблица 2.

Физические величины	Номер опыта	1	...	n
	Единицы измерений			
$\Delta T$	К			
A	Дж			

2. На координатных осях указать откладываемые физические величины и обозначить единицы величин.
3. Указать масштаб на осях координат (при очень больших или очень малых величинах, показательную часть в записи величины указать рядом с единицами измерений на оси).
4. Нанести полученные экспериментальные данные на координатную плоскость, обозначив их крестиком, кружочком или жирной точкой.
5. Провести через экспериментальные точки плавную линию, в соответствии с выбранным законом аппроксимации экспериментальных данных.
6. Определить абсолютные погрешности прямых измерений.
7. Вывести формулы для оценки максимальной абсолютной и относительной погрешности косвенных измерений.

### **3. ТРЕБОВАНИЯ К ВЫПОЛНЕНИЮ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ**

1. Выполнение лабораторных работ проводится в аудиториях и учебных лабораториях кафедры ОТФ (по 2 учебных часа на 1 работу) в соответствии с графиком работ по учебным лабораториям механики, электромагнетизма, оптики, физики твердого тела и виртуальных экспериментов. В случае пропуска прошлого занятия по уважительной причине на очередном занятии делается следующая по графику работа.
2. Студенты допускаются к занятиям в лаборатории при подготовке на аудиторном занятии теоретической базы новой работы, наличии заготовки к ней и защиты предыдущей работы.
3. Полученные в результате работы данные заносятся в таблицу и после ее завершения подписываются преподавателем или инженером - лаборантом.

### **4. ТРЕБОВАНИЯ К СОДЕРЖАНИЮ ОТЧЕТА ПО ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ**

Отчет оформляется в печатном виде на листах формата А4 в соответствии с требованиями, предъявляемыми кафедрой ОТФ, в котором помимо стандартного титульного листа должны быть раскрыты следующие пункты:

I. Цель работы.

II. Краткое теоретическое содержание:

1. явления, изучаемые в работе;
2. определение основных физических понятий, объектов, процессов и величин;
3. законы и соотношения (использованные при выводе расчетной формулы);
4. пояснения к физическим величинам, входящим в формулы, и единицы их измерений.

III. Схема установки.

IV. Основные расчетные формулы.

V. Формулы погрешности косвенных измерений.



VI. Таблицы с результатами измерений и вычислений. Таблицы должны иметь номер и название. Единицы измерения физических величин должны быть указаны в отдельной строке.

VII. Пример вычислений (для одного опыта):

1. исходные данные;
2. погрешности прямых измерений;
3. вычисления: [*величина = формула = подстановка чисел = результат вычисления, единицы измерений*].
4. вычисление погрешностей косвенных измерений.

VIII. Графический материал:

1. аналитическое выражение функциональной зависимости, которую необходимо построить;
2. на осях координат указать масштаб, наименование физической величины и единицы измерения;
3. на координатной плоскости должны быть нанесены экспериментальные точки;
4. по результатам эксперимента, представленным на координатной плоскости, провести плавную линию – аппроксимирующую функциональную теоретическую зависимость в соответствии с методом наименьших квадратов.

IX. Окончательный результат с указанием погрешности косвенных измерений.

X. Анализ полученного результата. Выводы.

## **5. РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ЗАЩИТЕ ОТЧЕТА**

К защите допускаются студенты, подготовившие отчет в соответствии с требованиями к его содержанию в установленные сроки. После проверки преподавателем содержания отчета, при наличии ошибок и недочетов, работа возвращается студенту на доработку.

При правильном выполнении лабораторной работы, соблюдении всех требований к содержанию и оформлению отчета, студент допускается к защите.

Для успешной защиты отчета необходимо изучить теоретический материал по теме работы, а также освоить

математический аппарат, необходимый для вывода расчетных формул работы.

При подготовке к защите, помимо данного методического указания, необходимо использовать учебники и другие учебные пособия, рекомендованные к учебному процессу кафедрой ОТФ и Министерства образования и науки.

Во время защиты студент должен уметь ответить на вопросы преподавателя в полном объеме теоретического и методического содержания данной лабораторной работы, уметь самостоятельно вывести необходимые расчетные формулы, выполнить анализ полученных зависимостей и прокомментировать полученные результаты.

## 6. ПРИЛОЖЕНИЕ

Таблица 3 – Множители и приставки для образования десятичных и кратных единиц

Множитель	Приставка		Множитель	Приставка	
	Наименование	Обозначение		Наименование	Обозначение
$10^3$	кило	к	$10^{-3}$	милли	м
$10^6$	мега	М	$10^{-6}$	микро	мк
$10^9$	гига	Г	$10^{-9}$	нано	н
$10^{12}$	тера	Т	$10^{-12}$	пико	п

Таблица 4 – Основные физические постоянные

Физическая величина	Численное значение
Атомная единица массы (унифицированная)	$1 \text{ а.е.м.} = 1,660531(11) \cdot 10^{-27} \text{ кг}$ $= 931,481(52) \text{ МэВ}$
Число Авогадро	$6,022169(40) \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}$
Давление атмосферное нормальное	$1,01325 \cdot 10^5 \text{ Па}$
Молярная газовая постоянная	$8,3144(26) \text{ Дж/К} \cdot \text{моль}$
Объем идеального газа при нормальных условиях	$22,4136 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{моль}$
Постоянная Больцмана	$1,380622(59) \cdot 10^{-23} \text{ Дж/К}$

Таблица 5 – Пересчет температуры между основными шкалами

Шкала условное обозначение	Из цельсия ( $^{\circ}\text{C}$ )	В Цельсий ( $^{\circ}\text{C}$ )
Фаренгейт ( $^{\circ}\text{F}$ )	$[^{\circ}\text{F}] = [^{\circ}\text{C}] \times 9/5 + 32$	$[^{\circ}\text{C}] = ([^{\circ}\text{F}] - 32) \times 5/9$

Кельвин (К)	$[K] = [^{\circ}C] + 273.15$	$[^{\circ}C] = [K] - 273.15$
Rankin(Ренкин) ( $^{\circ}R$ )	$[^{\circ}R] = ([^{\circ}C] + 273.15) \times 9/5$	$[^{\circ}C] = ([^{\circ}R] - 491.67) \times 5/9$

Таблица 6 – Сравнение температурных шкал

Описание	Кельвин	Цельсий	Фаренгейт	Ранкин
Абсолютный нуль	0	-273,15	-459,67	0
Температура таяния смеси Фаренгейта (соль и лёд в равных количествах)	255,37	-17,78	0	459,67
Температура замерзания воды (Нормальные условия)	273,15	0	32	491,67
Средняя температура человеческого тела	309,75	36,6	98,2	557,9
Температура кипения воды (Нормальные условия)	373,15	100	212	671,67
Солнце	5800	5526	9980	10440

## **7. БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК** **УЧЕБНОЙ ЛИТЕРАТУРЫ**

1. *Калашиников Н.П.* Основы физики. М.: Дрофа, 2004. Т. 1
2. *Савельев И.В.* Курс физики. М.: Наука, 1998. Т. 2.
3. *Детлаф А.А., Яворский Б.М.* Курс физики. М.: Высшая школа, 2000.
4. *Иродов И.Е.* Электромагнетизм. М.: Бинوم, 2006.
5. *Яворский Б.М., Детлаф А.А.* Справочник по физике. М.: Наука, 1998.

### ***Базы данных, информационно-справочные и поисковые системы.***

6. Информационная система «Единое окно доступа к образовательным ресурсам» (<http://window.edu.ru/>).
7. Научная электронная библиотека <http://elibrary.ru/>.
8. Электронные версии учебников, пособий, методических разработок, указаний и рекомендаций по всем видам учебной работы, предусмотренных вузовской рабочей программой, находящиеся в свободном доступе для студентов, обучающихся в вузе, на внутри сетевом сервере <http://www.spmi.ru/>.

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>Введение .....</b>	<b>3</b>
<b>1. ТЕПЛОВЫЕ МАШИНЫ.....</b>	<b>5</b>
<b>1.1 Цикл Карно. КПД тепловых двигателей.....</b>	<b>5</b>
<b>1.2 Работа совершаемая тепловой машиной.....</b>	<b>8</b>
<b>2. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА. ЦИКЛ ТЕПЛОВОЙ МАШИНЫ.....</b>	<b>10</b>
<b>3. ТРЕБОВАНИЯ К ВЫПОЛНЕНИЮ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ.....</b>	<b>16</b>
<b>4. ТРЕБОВАНИЯ К СОДЕРЖАНИЮ ОТЧЕТА ПО ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ.....</b>	<b>16</b>
<b>5. РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ЗАЩИТЕ ОТЧЕТА.....</b>	<b>17</b>
<b>6. ПРИЛОЖЕНИЕ.....</b>	<b>19</b>
<b>7. БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК УЧЕБНОЙ ЛИТЕРАТУРЫ.....</b>	<b>21</b>