

М. Л. Хасанова, В. В. Руднев, М. С. Дмитриев

**РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ
ПРАКТИЧЕСКИХ РАБОТ ДИСЦИПЛИНЫ
«ТЕРМОДИНАМИКА И РАБОЧИЕ ПРОЦЕССЫ
ДВИГАТЕЛЕЙ»**

Учебно-методическое пособие

Челябинск
2021

Министерство просвещения Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Южно-Уральский государственный
гуманитарно-педагогический университет»

М. Л. Хасанова, В. В. Руднев, М. С. Дмитриев

**РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ
ПРАКТИЧЕСКИХ РАБОТ ДИСЦИПЛИНЫ
«ТЕРМОДИНАМИКА И РАБОЧИЕ ПРОЦЕССЫ
ДВИГАТЕЛЕЙ»**

Учебно-методическое пособие

Челябинск
2021

УДК 536.7(076)(021)

ББК 22.317.1я73

X 24

Хасанова, М.Л. Рекомендации по выполнению практических работ дисциплины «Термодинамика и рабочие процессы двигателей» / М.Л. Хасанова, В.В. Руднев, М.С. Дмитриев. – Челябинск: Изд-во Южно-Урал. гос. гуман.-пед. ун-та, 2021. – 66 с.

ISBN 978-5-907409-75-0

Учебно-методическое пособие предназначено для студентов факультета ППИ, обучающихся по программе бакалавриата направления подготовки 44.03.04 Профессиональное обучение (по отраслям), профиль «Транспорт».

Данный сборник поможет студентам углубить и закрепить теоретические положения лекционного материала, овладеть методами экспериментальных исследований, развить практические навыки научного анализа и обобщения полученных результатов.

В пособии содержатся описания установок и лабораторного оборудования, изложены методические указания по выполнению пяти экспериментальных практических работ. Длительность выполнения каждой работы составляет два часа. Подготовка к каждому занятию – один час.

Рецензенты: В. А. Белевитин, д-р. техн. наук, доцент

К. Н. Семендяев, канд. техн. наук, доцент

ISBN 978-5-907409-75-0

© Хасанова М.Л., Руднев В.В., Дмитриев М.С., 2021

© Издательство Южно-Уральского государственного гуманитарно-педагогического университета, 2021

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
1. Методические указания к выполнению практических работ .	6
1.1. Цель и порядок проведения практических занятий	6
1.2. Требования к оформлению отчетов	8
1.3. Меры и правила безопасности при работе на экспериментальных установках	11
2. Экспериментальная часть	13
<i>Практическая работа 1.</i> Исследование процесса теплообмена в автомобильном радиаторе	13
<i>Практическая работа 2.</i> Исследование сложного теплообмена	20
<i>Практическая работа 3.</i> Исследование впускного тракта двигателя внутреннего сгорания	26
<i>Практическая работа 4.</i> Исследование процесса сжатия в поршневом двигателе внутреннего сгорания	33
<i>Практическая работа 5.</i> Исследование рабочего процесса поршневого компрессора	38
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	42
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	43
ПРИЛОЖЕНИЕ	44

ВВЕДЕНИЕ

Дисциплина «Термодинамика и рабочие процессы двигателей» относится к вариативной части основной профессиональной образовательной программы по направлению подготовки 44.03.04 Профессиональное обучение (по отраслям), профиль «Транспорт».

Изучение дисциплины «Термодинамика и рабочие процессы двигателей» основано на знаниях, умениях и навыках, полученных при изучении обучающимися следующих дисциплин: «Автомобильные эксплуатационные материалы», «Устройство двигателей и систем автомобилей».

Цель изучения дисциплины – сформировать знания, умения и навыки у будущих педагогов профессионального обучения в области термодинамики и рабочих процессов автомобильных двигателей; получить представление о законах превращения энергии в различных процессах, сопровождаемых поглощением или выделением теплоты, о работе тепловых машин; получить навыки проведения тепловых расчетов, необходимых для последующего изучения специальных дисциплин.

Задачи дисциплины: 1) иметь представление об истории развития термодинамики и рабочих процессов автомобильных двигателей; 2) изучить основные положения технической термодинамики; классификацию, принципиальное устройство и принцип работы автомобильных двигателей; 3) получить навыки применения основных законов термодинамики при расчетах термодинамических процессов и рабочих процессов, протекающих в автомобильных двигателях; 4) уметь применять полученные теоретические знания и практические навыки в своей профессиональной деятельности, использовать научно-техническую и справочную литературу для решения конкретных задач по специальности; использовать в своей деятельности профессиональную лексику.

Термодинамика изучает законы превращения энергии в различных процессах, сопровождаемых поглощением или выделением теплоты, а также свойства тел, участвующих в этих преобразованиях.

Термодинамика является наукой, где практические эксперименты играют исключительно важную роль.

Это объясняется сложностью многих термодинамических явлений, которые приходится рассматривать и изучать при решении ряда важных инженерных проблем, в частности, происходящих в газовых тепловых машинах, двигателях, наиболее широко используемых на мобильной технике в качестве силовых установок.

Целью методических указаний по выполнению практических работ является закрепление студентами материала лекционного курса, развитие навыков самостоятельной работы с приборами при проведении теплотехнических экспериментов, обучение методам определения теплофизических свойств рабочего тела и проведению расчетов, а также умению делать выводы на основании полученных результатов.

1. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ВЫПОЛНЕНИЮ ПРАКТИЧЕСКИХ РАБОТ

1.1. Цель и порядок проведения практических занятий

Практические занятия по дисциплине «Термодинамика и рабочие процессы двигателей» проводятся с целью:

- закрепления и углубления знаний, полученных студентами на лекциях и в процессе самостоятельной работы;
- уяснения фундаментальных законов и расчетных методик, изложенных в лекциях;
- обучения студентов методам экспериментальных и научных исследований;
- привития студентам навыков научного анализа и обобщения полученных результатов;
- приобретения навыков работы с лабораторным оборудованием, контрольно-измерительными приборами и вычислительной техникой;
- развития творческой инициативы и самостоятельности студентов в проведении практических работ в лаборатории;
- привития чувства гордости за изучаемую профессию.

Выполнение каждой работы содержит несколько основных этапов:

- подготовительная часть;
- проведение экспериментального исследования;
- обработка результатов эксперимента;
- оформление и защита отчетов.

Подготовительная часть проводится под руководством преподавателя в период целевой самоподготовки накануне практического занятия.

- Во время самоподготовки каждый студент обязан:
- ознакомиться с целью и содержанием работы;

– проработать соответствующую тему теоретического курса;

– изучить устройство и принцип работы экспериментальной установки и используемых измерительных приборов;

– усвоить последовательность выполнения рабочих операций и порядок обработки измеряемых параметров;

– изучить меры безопасности, относящиеся к данной работе, лично расписаться в журнале инструктажей;

– подготовить форму отчета (указать название работы, на чертить схему установки и необходимые таблицы, выписать необходимые исходные данные и расчетные соотношения).

В результате проведения подготовительной части студент должен *знать*:

– объект и предмет исследования;

– состав и устройство экспериментальной установки;

– порядок выполнения работы;

– порядок обработки данных, полученных при измерении;

– меры безопасности при работе на установке, местах подачи и отключения питания, расположения средств защиты и пожаротушения, правила оказания первой помощи пострадавшим.

К проведению измерений допускаются студенты, прошедшие подготовительную часть и расписавшиеся в журнале учета инструктажей по правилам и мерам безопасности.

Перед началом занятия каждый студент при себе должен иметь:

– подготовленную форму отчета;

– микрокалькулятор;

– линейку, карандаш, ручку и ластик;

– конспект лекций по изучаемой теме;

– руководство для экспериментальных занятий;

– тетрадь для черновых записей и расчетов.

Во время работы в лаборатории *необходимо*:

- строго соблюдать меры безопасности и неукоснительно их выполнять на каждом рабочем месте;
- бережно относиться к измерительным приборам и лабораторным установкам;
- соблюдать тишину и порядок в аудитории.

Проведение эксперимента включает в себя:

- проверку исходного состояния установки;
- подготовку установки к работе;
- проведение эксперимента и измерений в опытах;
- приведение в исходное состояние экспериментальной установки.

Заключительным этапом проведения практического занятия является оформление отчета и его защита.

Прием отчетов проводится на последнем часе практического занятия. При приеме отчета преподаватель проверяет правильность его заполнения и обоснованность сделанных выводов. На основании уровня подготовки студентов по теме практического занятия и содержательности отчета выставляется оценка за работу.

1.2. Требования к оформлению отчетов

Оформление отчета начинается на подготовительной части занятия с заполнения стандартного бланка черными, фиолетовыми или синими чернилами (пастой). Схемы, таблицы, графики допускается выполнять простым карандашом. В верхней части бланка записываются воинское звание, фамилии и инициалы студента и преподавателя, дата выполнения работы, ее номер и полное (без сокращений) название. В конце названия точка не ставится. В общем случае отчет должен содержать следующие разделы:

1. Схему экспериментальной установки.

2. Измерительные приборы.
3. Расчетные формулы.
4. Исходные данные.
5. Результаты измерений и вычислений.
6. Выводы.

Схема экспериментальной установки выполняется аккуратно, с применением чертежных инструментов. Она должна отражать состав и взаимодействие основных частей установки. Студент имеет право составить схему самостоятельно, использовать приведенную в настоящем руководстве или на стенде в учебной аудитории.

Схема обязательно должна иметь номера позиций составных частей установки.

Условные обозначения должны соответствовать ЕСКД или иметь общепринятый смысл. Расшифровка иных обозначений и сокращений должна быть приведена в отчете.

В отчете указываются сведения об измерительных приборах:

- наименование и тип;
- номер позиции в схеме;
- предел измерения (в единицах измерения);
- цена деления или количество делений;
- класс точности прибора;
- заводской номер.

Например:

- 1) амперметр ТП-160 (4): 250 А; 1А/дел; 0,4; № 12345;
- 2) манометр МЗМ (2): 100 кг/см²; 50 дел; 1,0; № 1324.

Для сложных комплексных приборов (осциллографов, тензостанций, цифровых вольтметров и т.п.) достаточно указать:

- наименование и тип;
- номер позиции в схеме;
- заводской номер.

Например: тензостанция 8УНЧ-7М (12) № 234.

Расчетные формулы должны иметь краткий комментарий без слов «найти», «вычислить», «определить» и т. п., ссылочный номер и размерность.

Например:

Сила давления, Н:

$$P = p \cdot F,$$

где p – давление, Па; F – площадь, м².

Замеченные опiski и ошибки исправляются путем зачеркивания одной чертой и вписыванием правильного результата.

Исходные данные предоставляются преподавателем или содержатся в описаниях соответствующих работ. Они записываются в виде равенств без каких-либо комментариев, так как смысл всех обозначений должен быть раскрыт в предыдущем разделе.

Раздел «Вычисления и результаты измерений» занимает главное место в отчете и имеет наибольший объем.

Вычисления записываются без дополнительных пояснений и промежуточных результатов. Пишется расчетная формула, в нее подставляются значения соответствующих величин и проводятся математические вычисления.

Таблицы, представленные в каждой экспериментальной работе, имеют рекомендательный характер. Студент имеет право по своему усмотрению изменять форму таблиц, чтобы добиться максимальной наглядности представления материала.

Графики являются наиболее информативным средством представления результатов.

Выводы составляются в произвольной форме, однако они не должны сводиться к констатации фактов типа: «Мы выполнили лабораторную работу. Результаты теории и эксперимента совпали».

В выводах необходимо:

- указать объект и предмет исследования;
- кратко описать наблюдаемое явление или процесс;
- выразить суждение о совпадении теоретических и экспериментальных результатов и причинах их возможного расхождения.

В качестве дополнения, демонстрирующего понимание сути изучаемого явления, в выводах можно высказать предложения по совершенствованию экспериментальной установки, методики проведения занятия, выполнения эксперимента и обработки опытных данных.

Выводы пишутся каждым студентом самостоятельно.

1.3. Меры и правила безопасности при работе на экспериментальных установках

Инструктаж студентов по мерам и правилам безопасности проводится преподавателем перед началом работ с указанием особенностей на каждом занятии.

При проведении занятий **обязательно** соблюдение следующих мер безопасности:

1. К выполнению экспериментальных занятий допускаются студенты, изучившие правила и меры безопасности и расписавшиеся в журнале инструктажа по мерам безопасности.
2. В каждом расчете для выполнения экспериментальной работы назначается старший, который организует работу расчета и отвечает за соблюдение установленного порядка и мер безопасности на рабочем месте.
3. Лабораторную установку можно включать только после разрешения лица, проводящего занятие.
4. Включение питания установки электрическим током производится только согласно потребляемому напряжению для

каждой установки. Для этого на розетках и вилках сделаны надписи с указанием питания данной установки.

5. После окончания работ нельзя оставлять установку под током.

6. **Категорически запрещается** проводить работы на неисправных установках. При появлении неисправности следует немедленно доложить руководителю занятий или инженеру лаборатории.

7. При работе со сжатыми газами не допускать их травления из магистралей через места соединений.

8. Запрещается проводить разборку газовых магистралей при наличии в них давления газа, а также устранять травление газа подтяжкой уплотнений при наличии в них давления.

9. При работе с электрооборудованием не прикасаться к оголенным электрическим проводам; следует помнить, что для поражения человека электрическим током достаточно его величины 0,025–0,1 А и напряжения 20 В.

10. Запрещается проводить лабораторную работу на установке, если произошло короткое замыкание в ее цепи.

11. При поражении электрическим током необходимо оказать **первую помощь** пострадавшему:

а) отключить питание от электросети;

б) оттащить пострадавшего от электрической установки за одежду, стоя на резиновом коврике (в диэлектрических ботах и перчатках);

в) если пострадавший потерял сознание, но его легкие и сердце работают нормально, нужно проветрить помещение и дать пострадавшему понюхать нашатырный спирт; если же сердечная деятельность прекратилась, то следует освободить пострадавшего от стесняющей одежды и сделать ему искусственное дыхание до прибытия врача.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Практическая работа 1

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ТЕПЛООБМЕНА В АВТОМОБИЛЬНОМ РАДИАТОРЕ

Цель работы – исследовать процесс теплообмена в радиаторе системы охлаждения двигателя ГАЗ-21 и определить коэффициент теплопередачи на различных режимах.

Краткие теоретические сведения

В работе требуется исследовать процесс теплообмена в радиаторе системы охлаждения двигателя ГАЗ-21. Радиатор относится к рекуперативному типу теплообменных аппаратов, у которых передача теплоты от одной среды (горячей жидкости) к другой (воздуху) происходит через разделяющую их твердую стенку. Такой теплообмен называется теплопередачей. Интенсивность теплопередачи характеризуется коэффициентом теплопередачи k .

Величина коэффициента теплопередачи показывает количество теплоты, проходящей через единицу площади в единицу времени от горячей к холодной среде при разности температур между ними в 1 градус.

Коэффициент теплопередачи является сложной функцией, теоретически его определить невозможно. Поэтому определяют коэффициент теплопередачи k опытным путем, используя уравнения теплового баланса и теплопередачи.

Уравнение теплового баланса для радиатора при отсутствии тепловых потерь имеет вид

где Q и Q_0 – тепловой поток, соответственно отданный жидкостью и воспринятый воздухом в единицу времени, Дж/с;

и — массовые расходы жидкости и воздуха, кг/с;
и — средние удельные массовые изобарные теплоемкости жидкости и воздуха в заданном интервале температур, Дж/(кг К); и — начальная и конечная температуры жидкости, °С; и — начальная и конечная температуры воздуха, °С.

Уравнение теплопередачи от жидкости к воздуху через стенку радиатора

$$\Phi = \Phi_{жс} = \Phi_{св} = \kappa S \Delta T, \text{ Вт}$$

где κ — коэффициент теплопередачи, Вт/(м² К); S — площадь теплопередающей поверхности радиатора, м²; ΔT — разность средних температур жидкости и воздуха, К.

Измерение расхода жидкости через радиатор ($Q_{v,ж}$) осуществляется с помощью дроссельного устройства, где используется принцип перепада давления. Наиболее простой конструкцией такого устройства является диафрагма (рис. 2.1).

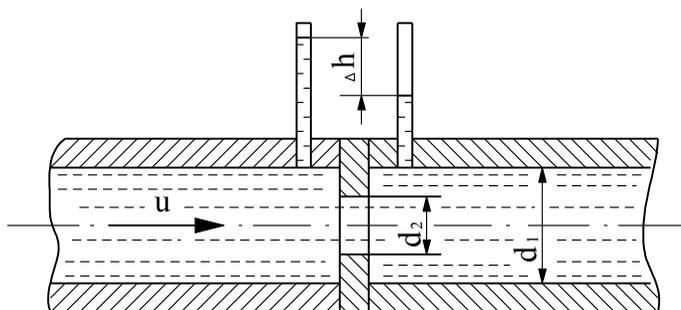


Рис. 2.1. Устройство для замера расхода жидкости

До диафрагмы и после нее устанавливаются пьезометры. Объемный расход жидкости ($Q_{v,1}$, м³/с) определяется по разности показаний пьезометров:

$$\underline{\hspace{2cm}},$$

где U – скорость движения жидкости, м/с; c – величина, постоянная для данного расходомера, определяется по формуле

$$c = \sqrt{\frac{d_1^2}{d_1^2 - d_2^2}}; g - \text{гравитационная постоянная}; \Delta h - \text{разность}$$

уровней в дифманометре, м.

Описание экспериментальной установки

Стенд представляет собой двигатель ГАЗ-21 с радиатором, пультом управления и приборами, установленный на раме (рис. 2.2).

Из двигателя удалены все подвижные детали кривошипно-шатунного механизма (поршни, шатуны, коленчатый вал), маховик и все детали распределительного механизма.

Для опыта используется система охлаждения. Перед радиатором 16 расположен кожух 15 с трубой 12 квадратного сечения из органического стекла размером 115×115 мм. На кожух могут устанавливаться заслонки с отверстиями различных размеров для изменения количества проходящего воздуха, которое имеет место при закрытии жалюзи радиатора или при изменении скорости движения машины.

Нагрев охлаждающей жидкости происходит так же, как и в реальном двигателе, от горячих стенок цилиндров. Их нагрев осуществляется нагревательными элементами 18, установленными по одному в каждом цилиндре.

Система измерения расхода воды состоит из нормальной расходомерной диафрагмы 6 и дифманометра 7. При прохождении жидкости через сужающее устройство (диафрагму) в узкой его части скорость движения увеличивается, а пьезометрический напор уменьшается, в результате чего возникает перепад давления. По величине этой разности можно определить расход воды. Перепад давления Δh определяется дифференциальным манометром (дифманометром).

Система измерения температур жидкости и воздуха состоит из датчиков (термосопротивлений), микроамперметра и переключателя по точкам замера. Для жидкости – микроамперметр 11 и переключатель 10, для воздуха – микроамперметр 9 и переключатель 8. Термосопротивления для измерения температуры жидкости установлены в верхнем и нижнем бачках радиатора. Для измерения температур воздушного потока количество датчиков увеличено до пяти: один устанавливается в воздушной трубе перед радиатором, остальные равномерно распределены по окружности за радиатором.

Порядок проведения эксперимента

1. Подготовить установку, включив систему нагрева (см. рис. 2.2).
2. Замерить температуру жидкости в верхнем и нижнем бачке радиатора $t_{ж,1}$ и $t_{ж,2}$ по микроамперметру 11.
3. Замерить температуру воздуха до радиатора $t_{в,1}$ и после радиатора $t'_{в,2}$, $t''_{в,2}$, $t'''_{в,2}$, $t''''_{в,2}$ по микроамперметру 9.
4. По дифманометру 7 измерить перепад давлений Δh при прохождении жидкости через диафрагму.
5. Все замеры провести для двух режимов: жалюзи «открыты» и «закрыты».
6. Результаты замеров занести в табл. 1.

Таблица 1

Режим работы	Температура жидкости, °С		Температура воздуха, °С					Δh , м
	$t_{ж,1}$	$t_{ж,2}$	$t_{в,1}$	$t'_{в,2}$	$t''_{в,2}$	$t'''_{в,2}$	$t''''_{в,2}$	
Жалюзи открыты								
Жалюзи закрыты								

Обработка опытных данных и оформление отчета

1. Определить:

а) среднюю температуру воздуха после радиатора

$$t_{B,2} = \frac{t'_{B,2} + t''_{B,2} + t'''_{B,2} + t''''_{B,2}}{4};$$

б) среднюю температуру воздуха до и после радиатора

$$t_B = \frac{t_{B,1} + t_{B,2}}{2};$$

в) среднюю температуру жидкости в радиаторе

$$t_{ж} = \frac{t_{ж,1} + t_{ж,2}}{2};$$

г) температурный перепад между жидкостью и воздухом

$$\Delta T = t_{ж} - t_B;$$

д) массовый расход жидкости в системе охлаждения:

$$Q_{m,1} = Q_{v,1} \rho, \text{ кг/с,}$$

$$Q_{v,1} = c S_1 \sqrt{2g\Delta h}, \text{ м}^3/\text{с,}$$

$$c = \sqrt{\frac{d_1^2}{d_1^2 - d_2^2}},$$

где S_1 – площадь сечения трубопровода, м^2 (диаметр трубы $d_1 = 25$ мм); d_2 – диаметр диафрагмы $d_2 = 16$ мм); Δh – перепад давлений в дифференциальном манометре, g – гравитационная постоянная, м/с^2 ; ρ – плотность жидкости ($\rho = 1000$ кг/м^3);

е) тепловой поток, отданный охлажденной жидкостью:

$$, \text{ Вт,}$$

где – удельная массовая теплоемкость жидкости при постоянном давлении, выбирается из таблицы для средней температуры ($+$)/2, Дж/(кг К); – разность температур жидкости на входе в радиатор и на выходе из него

ж) коэффициент теплопередачи (для ГАЗ-21 S=15 м²):

$$k = \frac{\Phi}{S \cdot \Delta T}, \text{ Вт}/(\text{м}^2 \text{ К}).$$

2. Результаты расчетов занести в табл. 2.

Таблица 2

Расчетные величины

Режим работы	$t_{в,2},$ °C	$t_{в},$ °C	$t_{ж},$ °C	°C	$\Delta t,$ °C	$Q_{m,ж}$ кг/с	$\Phi,$ Вт	$k,$ Вт/м ² К
Жалюзи открыты								
Жалюзи закрыты								

3. Проанализировать характер изменения коэффициента теплопередачи и сделать выводы по работе.

Контрольные вопросы

1. Что называется теплопередачей?
2. Что называют коэффициентом теплопередачи? Что влияет на его величину?
3. Как измеряют расход жидкости при испытании данного радиатора?
4. Какое практическое значение имеет данная работа?
5. Какие средства интенсификации теплообмена использованы в данном радиаторе?

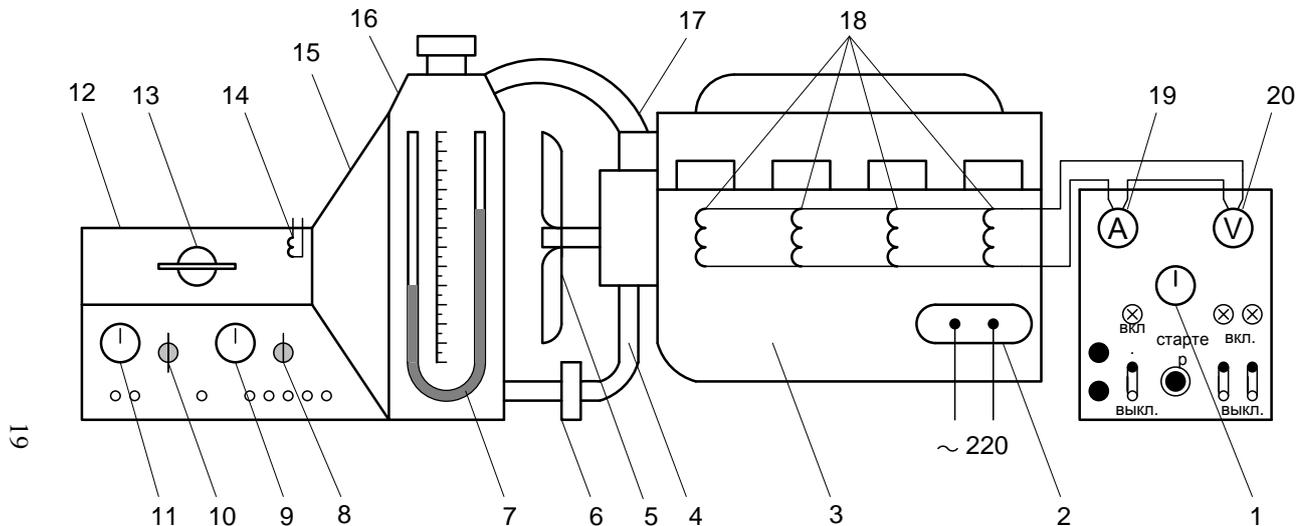


Рис. 2.2. Схема установки для анализа процесса теплообмена в автомобильном радиаторе:
 1 – тахометр; 2 – электродвигатель; 3 – двигатель; 4 – подводящий патрубков; 5 – вентилятор; 6 – расходомерная диафрагма; 7 – дифманометр; 8 – переключатель точек замера температуры воздуха; 9 – микроамперметр для определения температуры воздуха; 10 – переключатель точек замера температуры жидкости; 11 – микроамперметр для определения температуры жидкости; 12 – трубопровод воздушный; 13 – анемометр; 14 – термосопротивление; 15 – кожух радиатора; 16 – радиатор; 17 – отводящий патрубков; 18 – нагревательные элементы; 19 – амперметр; 20 – вольтметр

Практическая работа 2

ИССЛЕДОВАНИЕ СЛОЖНОГО ТЕПЛООБМЕНА

Цель работы – исследование сложного теплообмена в водяной рубашке блок-картера и головки блока при работе предпускового подогревателя. Определение опытным путем коэффициента теплоотдачи α .

Краткие теоретические сведения

Теплообменом называется самопроизвольный процесс переноса энергии в форме теплоты в пространстве и передачи ее от одних тел к другим. Например, передача теплоты в двигателях внутреннего сгорания является случаем сложного теплообмена, включающего в себя конвективную теплоотдачу от газов к стенке, перенос этой теплоты за счет теплопроводности в самой стенке и, наконец, конвективную теплоотдачу от стенки в окружающую среду.

Теплообмен излучением в первом приближении не учитывается.

Конвективным теплообменом или теплоотдачей называется теплообмен между поверхностью твердого тела и жидкой или газообразной средой при их непосредственном соприкосновении. Этот процесс сопровождается конвекцией [перемещением массы среды, при котором частицы жидкости (газа) осуществляют перенос теплоты] и теплопроводностью. Для расчета конвективного теплообмена между твердым телом и средой используется формула Ньютона:

$$\Phi = \alpha S(T_1 - T_2), \quad (1)$$

где Φ – тепловой поток, Вт; α – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м² К); S – площадь поверхности твердого тела, м²; T_1 , T_2 – температуры соответственно твердого тела и окружающей среды, К.

К числу важнейших факторов, которыми определяется интенсивность теплоотдачи, относится скорость потока среды. Движение среды может быть свободным, вызванным разностью плотностей нагретых и холодных масс жидкости (газа), и вынужденным, происходящим под действием насоса, вентилятора и т. д. Соответственно этим условиям теплообмен осуществляется при естественной или при вынужденной конвекции. Чем выше скорость движения среды, тем выше значение коэффициента теплоотдачи.

Помимо характера движения коэффициент теплоотдачи зависит от свойств жидкости и твердого тела, температуры твердых тел и среды, поэтому очень сложно определить его теоретически.

На основе большого экспериментального материала найдены коэффициенты теплоотдачи для различных случаев конвективного теплообмена (табл. 3).

Таблица 3

Виды теплообмена	Коэффициент теплоотдачи α , Вт/(м ² К)
Свободная конвекция газов	5,8 – 84,7
Свободная конвекция воды	116 – 1160
Движение воды по трубам	575 – 11600

В данной работе опытным путем определяется коэффициент теплоотдачи от жидкости – внутренней поверхности блока и от наружной поверхности блока – окружающей среде.

При расчете коэффициента теплоотдачи используют формулу (1).

Описание опытной установки

Лабораторный стенд (рис. 2.3) представляет собой двигатель УМЗ-451, установленный на раме. Предпусковой подогреватель дает возможность подогрева системы охлаждения основного двигателя путем циркуляции жидкости через рубашку охлаждения.

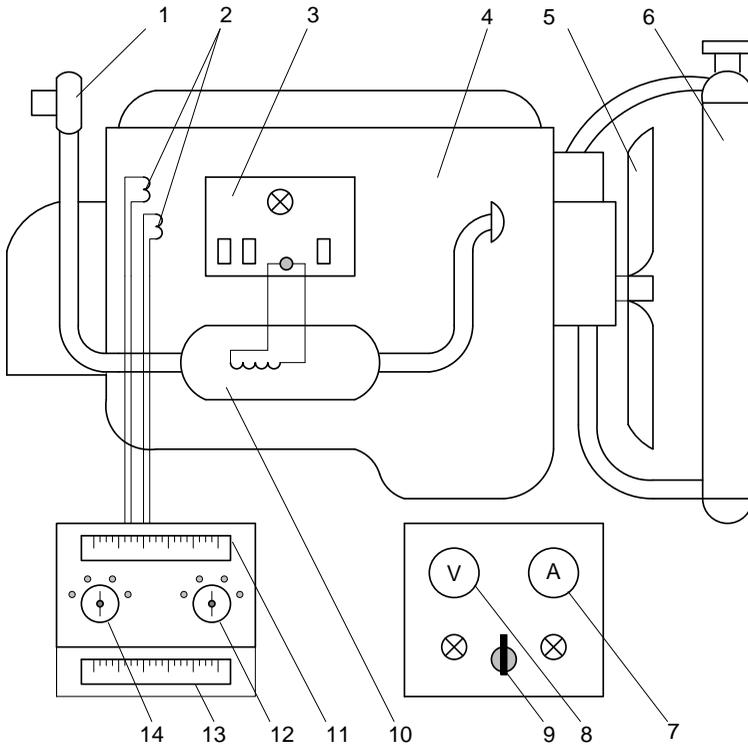


Рис. 2.3. Схема установки для исследования сложного теплообмена: 1 – вентилятор; 2 – термопары; 3 – пульт включения системы подогрева; 4 – блок двигателя; 5 – вентилятор; 6 – радиатор; 7 – амперметр; 8 – вольтметр; 9 – переключатель режимов работы; 10 – подогреватель; 11 – указатель температуры воздуха и жидкости; 12, 14 – переключатели; 13 – указатель температуры стенок

Нагрев воды в подогревателе осуществляется электронагревательными элементами, имитирующими сгорание топлива. Количество теплоты, выделяющееся нагревательными элементами, эквивалентно количеству теплоты, выделяющемуся при сгорании топлива в реальном подогревателе.

Из двигателя удалены все подвижные детали. Для опыта используется система охлаждения: водяная рубашка блок-картера и головки блока. Вода циркулирует в системе охлаждения термосифонно, т. е. под действием разности плотностей отдельных частей жидкости при нагревании за счет свободной конвекции.

Конвективный теплообмен происходит между жидкостью и внутренней поверхностью стенок блок-картера, а также между наружной поверхностью блок-картера и окружающей средой.

Перенос энергии в форме теплоты от внутренней поверхности блок-картера к наружной осуществляется теплопроводностью.

Таким образом, в системе охлаждения при подогреве жидкости предпусковым подогревателем происходит сложный теплообмен.

Для исследования сложного теплообмена необходимо определить температуру внутренней и наружной поверхности блока двигателя. Для определения этих температур используются термопары, установленные на внутренней и наружной поверхности блока. Для замера температуры жидкости и воздуха установлен милливольтметр, проградуированный в градусах.

Порядок проведения эксперимента

1. Подготовить лабораторную установку к работе, включив систему подогрева двигателя. Нагреть воду в системе охлаждения до 40–60 °С.

2. Определить температуру внутренней поверхности блока двигателя по указателю температуры 13 для четырех точек

поверхности t_1^{BH} , t_2^{BH} , t_3^{BH} , t_4^{BH} , вращая переключатель термомпар 12.

3. Замерить температуру наружной поверхности блока в четырех точках t_1^H , t_2^H , t_3^H , t_4^H , вращая переключатель термомпар 14.

4. Замерить температуру воды, циркулирующей в блоке $t_{ж}$, и температуру окружающего воздуха $t_{в}$ по указателю температуры 11.

5. Снять показания вольтметра (U) и показания амперметра (I) для определения количества теплоты, выделенной нагревателем при установившемся режиме.

6. Результаты замеров занести в табл. 4.

Таблица 4

Результаты эксперимента

I, A	U, B	$t_{ж}$, °C	$t_{в}$, °C	Температура наружной поверхности блока, °C				Температура внутренней поверхности блока, °C					
				t_1^H	t_2^H	t_3^H	t_4^H	t_1^{BH}	t_2^{BH}	t_3^{BH}	t_4^{BH}		

Обработка опытных данных и оформление отчета

1. Определить:

а) тепловой поток, переданный от нагревателя к жидкости:

$$\Phi = I \cdot U, \text{ Вт,}$$

где I – сила тока, A; U – напряжение B;

б) среднюю температуру внутренней и наружной поверхностей блока:

$$t^{BH} = \frac{t_1^{BH} + t_2^{BH} + t_3^{BH} + t_4^{BH}}{4};$$

$$t^H = \frac{t_1^H + t_2^H + t_3^H + t_4^H}{4};$$

в) коэффициенты теплоотдачи из уравнений теплоотдачи:

$$\alpha_1 = \frac{\Phi}{S_1 \cdot (t_{ж} - t^{BH})};$$

$$\alpha_2 = \frac{\Phi}{S_2 \cdot (t^H - t_B)},$$

где α_1, α_2 – коэффициенты теплоотдачи соответственно от нагревающей жидкости к стенке и от нагретой стенки к воздуху, Вт/(м² К); S_1, S_2 – площади внутренней и наружной поверхностей блока ($S_1 = 0,6 \text{ м}^2, S_2 = 0,9 \text{ м}^2$); $t_{ж}, t_B$ – температуры жидкости и воздуха, °С; t^H, t^{BH} – температуры наружной и внутренней стенок блока, °С;.

2. Результаты расчетов занести в табл. 5.

Таблица 5

Коэффициент теплоотдачи от жидкости к внутренней поверхности блока и от наружной поверхности блока к воздуху

Φ, Вт	$t^H, \text{°C}$	$t^{BH}, \text{°C}$	$\alpha_1, \text{Вт/м}^2 \text{ К}$	$\alpha_2, \text{Вт/м}^2 \text{ К}$

3. Проанализировать характер изменения коэффициента теплоотдачи и сделать вывод по работе.

Контрольные вопросы

1. Какие величины влияют на теплопроводность?
2. В чем сущность конвективного теплообмена?
3. Какие величины влияют на коэффициент теплоотдачи?
4. Что называют сложным теплообменом?
5. От каких факторов зависит интенсивность переноса теплоты от жидкости (воздуха) к твердому телу?

Практическая работа 3

ИССЛЕДОВАНИЕ ВПУСКНОГО ТРАКТА ПОРШНЕВОГО ДВИГАТЕЛЯ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ

Цель работы – экспериментально определить характер изменения давления на впуске в зависимости от сопротивления впускного тракта поршневого ДВС. Определить скорости и расход газового потока в характерных сечениях впускного тракта карбюраторного двигателя.

Краткие теоретические сведения

Потери давления при впуске $\Delta p_v = p_0 - p_a$ оказывают решающее влияние на наполнение цилиндров и зависят от гидравлического сопротивления на впуске. Чем меньше потери давления во впускной системе к моменту прихода поршня к ВМТ, тем больше количество свежего заряда, поступающего в цилиндр и, следовательно, больше мощность двигателя.

В работе предстоит исследовать движение воздуха во впускном тракте карбюраторного двигателя.

При движении поршня от ВМТ до НМТ в цилиндре двигателя создается разрежение и возникает разность давлений: атмосферного и в цилиндре двигателя. Под действием разности давлений во впускной тракт поступает воздух. При его движении по тракту соблюдается условие неразрывности потока, т. е. через любое живое сечение тракта в единицу времени протекает одно и то же количество воздуха Q_m , кг/с. Следовательно,

$$Q_m = S_1 \cdot U_1 \cdot \rho_1 = S_2 \cdot U_2 \cdot \rho_2 = \dots = S_n \cdot U_n \cdot \rho_n = \text{idem}, \quad (2)$$

где S_1, S_2, \dots, S_n – площади поперечных сечений впускного тракта, м²; U_1, U_2, \dots, U_n – скорости движения воздуха в рассматриваемых сечениях, м/с; $\rho_1, \rho_2, \dots, \rho_n$ – плотности воздуха в сечениях, кг/м³.

Из уравнения (2) следует, что скорость воздушного потока в каждом сечении обратно пропорциональна его площади. В суживающемся канале диффузора происходят увеличение скорости движения воздуха и соответственно уменьшение давления, что необходимо для обеспечения истечения топлива из распылителя и образования горючей смеси. Однако уменьшение давления отрицательно влияет на наполнение цилиндров свежим зарядом. Чтобы этого не случилось, в диффузоре карбюратора предусмотрена расширяющаяся часть, в которой скорость потока падает, а давление возрастает и, следовательно, улучшается наполнение цилиндров.

Таким образом, конструктивно воздушный канал карбюратора и впускной тракт в целом представляют собой сложный трубопровод с рядом местных сопротивлений, преодоление которых в процессе движения воздуха и горючей смеси связано с затратами части энергии потока.

Давление в воздушном канале карбюратора и во впускном трубопроводе в целом по мере удаления от его начала постепенно снижается, что приводит к соответствующему изменению плотности воздуха в различных сечениях.

Использование переменных значений давлений и плотности воздушного потока при анализе процесса впуска представляет определенные трудности. Поэтому изменением плотности воздуха пренебрегают и принимают $\rho = \text{idem}$ для любого сечения впускного тракта, т. е. воздух считают несжимаемой жидкостью.

Описание экспериментальной установки

Схема установки для исследования движения воздуха во впускном тракте двигателя УМЗ-451 показана на рис. 2.4.

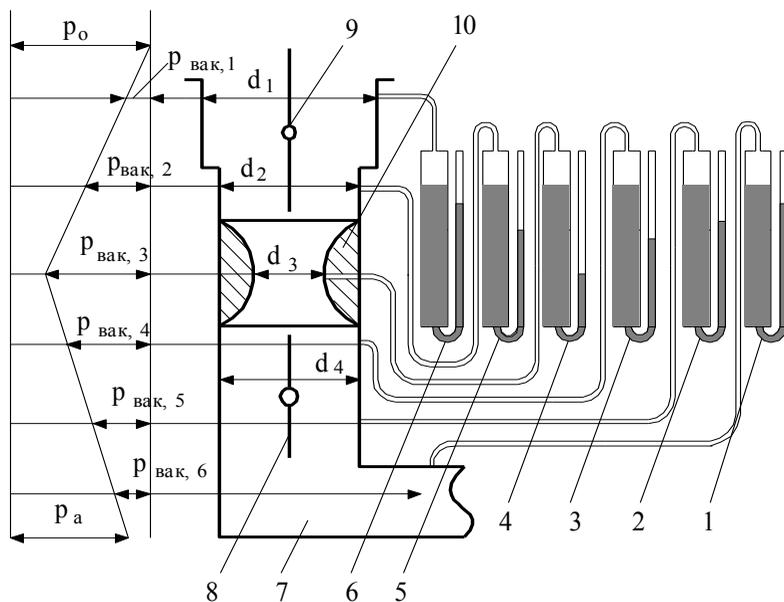


Рис. 2.4. Схема впускного тракта двигателя с жидкостными манометрами: 1, 2, 3, 4, 5, 6 – жидкостные манометры; 7 – впускной трубопровод; 8 – дроссельная заслонка; 9 – воздушная заслонка; 10 – диффузор; p_o – атмосферное давление; p_a – давление в цилиндре; разрежения: $p_{\text{вак, 1}}$ – после воздухоочистителя; $p_{\text{вак, 2}}$ – после воздушной заслонки; $p_{\text{вак, 3}}$ – в диффузоре; $p_{\text{вак, 4}}$ – перед дроссельной заслонкой; $p_{\text{вак, 5}}$ – после дроссельной заслонки; $p_{\text{вак, 6}}$ – во впускном коллекторе

В указанных на схеме сечениях установлены пьезометрические трубки, которые подключены к соответствующим жидкостным манометрам.

Схема жидкостного манометра показана на рис. 2.5. С помощью этого прибора измеряют разрежение в данном сечении воздушного тракта двигателя.

Прибор фиксирует положение лишь одного уровня жидкости (при достаточно большом диаметре сосуда, по сравнению с диаметром трубки, уровень жидкости в сосуде можно считать неизменным).

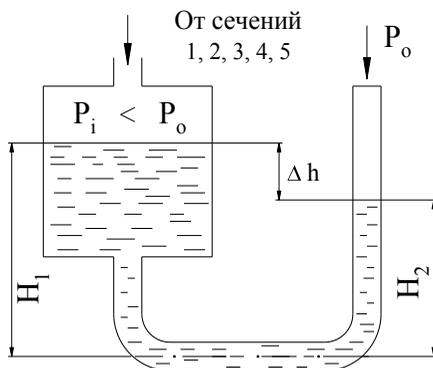


Рис. 2.5. Схема жидкостного манометра

Разность Δh определяет разрежение в данном сечении в миллиметрах водяного столба. Известно, что давление столба воды высотой 1 мм соответствует 9,8 Па.

На панель управления выведены рычаги для изменения положения воздушной и дроссельной заслонок («воздух» – для воздушной заслонки, «газ» – для дроссельной).

Порядок проведения эксперимента

1. Полностью открыть дроссельную и воздушную заслонки.
2. Пустить двигатель. Для пуска двигателя необходимо включить кнопку на панели.
3. Снять показания каждого жидкостного манометра для установившегося режима (Δh_i).
4. Повторить эксперимент с прикрытой воздушной заслонкой. Для этого выдвинуть рычаг управления «воздух» примерно на половину его хода.
5. Открыть воздушную и прикрыть дроссельную заслонку. Повторить эксперимент и снять показания жидкостных манометров.
6. По окончании эксперимента открыть дроссельную заслонку и выключить двигатель.

7. Результаты эксперимента занести в табл. 6.

Таблица 6

Результаты эксперимента

Режим работы	Разрежение	Номера сечений					
		1	2	3	4	5	6
Воздушная заслонка полностью открыта	Δh , мм вод.ст.						
	$p_{\text{вак}}$, Па						
Воздушная заслонка прикрыта (на 50 %)	Δh , мм вод.ст.						
	$p_{\text{вак}}$, Па						
Дроссельная заслонка прикрыта	Δh , мм вод.ст.						
	$p_{\text{вак}}$, Па						

Обработка опытных данных и оформление отчета

1. Определить:

а) площади поперечных сечений воздушной горловины, диффузора и смесительной камеры карбюратора по формуле

$$S_i = \frac{\pi d_i^2}{4}, \text{ м}^2.$$

(Диаметры поперечных сечений: воздушной горловины – $d_1=50$ мм; диффузора – $d_3=25$ мм; смесительной камеры карбюратора $d_4=64$ мм);

б) скорость воздуха в диффузоре

$$U_3 = \varphi \sqrt{\frac{2 \cdot p_{\text{вак},3}}{\rho}}, \text{ м/с},$$

где φ – коэффициент скорости ($\varphi = 0,9$); $p_{\text{вак},3}$ – разрежение в диффузоре, Па; ρ – плотность воздуха ($\rho = 1,29$ кг/м³);

в) объемный расход воздуха в диффузоре

$$Q_{V,3} = U_3 \cdot S_3, \text{ м}^3/\text{с};$$

г) объемный расход и скорости воздуха в воздушной горловине и смесительной камере, используя условия неразрывности потока ($Q_{v,1}$; $Q_{v,4}$; U_1 ; U_4).

2. Результаты расчета занести в табл. 7.

3. Вычислить абсолютные давления воздуха в каждом сечении и занести полученные значения в табл. 8.

4. Построить график изменения давлений во впускном тракте двигателя (для всех режимов).

5. Определить значения коэффициента наполнения при прикрытой дроссельной заслонке

$$\eta_v = \frac{T_0}{T_0 + \Delta T} \cdot \frac{p_a}{p_0} \cdot \left(1 - \frac{p_r}{\varepsilon \cdot p_a} \right) \cdot \frac{\varepsilon}{\varepsilon - 1},$$

где, $\Delta T = 5$ К (подогрев заряда); T_0 – температура окружающей среды; p_0 – давление окружающей среды; $p_r = 0,126$ МПа (давление остаточных газов); $\varepsilon = 6,7$ (степень сжатия); $p_a \approx p_6$.

Таблица 7

Скорости и расход воздуха во впускном тракте двигателя

Режим работы	Воздушная горловина			Диффузор			Смесительная камера		
	S_1 , м ²	U_1 , м/с	$Q_{v,1}$ м ³ /с	S_3 м ²	U_3 м/с	$Q_{v,3}$ м ³ /с	S_4 м ²	U_4 м/с	$Q_{v,4}$ м ³ /с
Воздушная заслонка открыта									
Воздушная заслонка прикрыта									
Дроссельн. заслонка прикрыта									

Таблица 8

Абсолютные давления воздуха во впускном тракте двигателя

Режим работы	p_1 , Па	p_2 , Па	p_3 , Па	p_4 , Па	p_5 , Па	p_6 , Па
Воздушная заслонка открыта						
Воздушная заслонка прикрыта						
Дроссельная заслонка прикрыта						

6. Дать краткий анализ результатов эксперимента, отразив положения, содержащиеся в контрольных вопросах.

Контрольные вопросы

1. Каково назначение впускного тракта?
2. Из каких приборов и деталей состоит впускной тракт ДВС?
3. Как изменяется давление в зависимости от скорости движения воздуха во впускном тракте двигателя?
4. Как влияет закрытие воздушной и дроссельной заслонок на характер давления во впускном тракте ДВС?
5. Как влияет величина давления во впускном тракте на качество процесса наполнения?

Практическая работа 4

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА СЖАТИЯ В ПОРШНЕВОМ ДВИГАТЕЛЕ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ

Цель работы – исследовать процесс сжатия в цилиндре поршневого двигателя внутреннего сгорания, определить показатель политропы сжатия.

Краткие теоретические сведения

Процесс сжатия рабочего тела в цилиндре поршневого двигателя внутреннего сгорания протекает с изменением всех термодинамических параметров при переменном теплообмене между рабочим телом и стенками цилиндра.

В начале хода сжатия (рис. 2.6) температура заряда ниже температуры стенок цилиндра. На этом участке сжатие сопровождается подогревом рабочего тела от стенок рабочей полости. По мере сжатия рабочего тела в некоторый момент температуры заряда и стенок выравниваются.

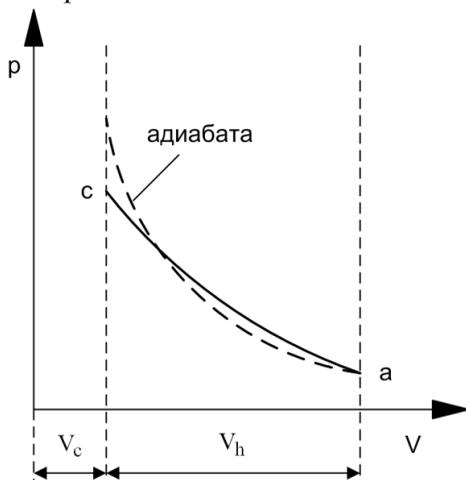


Рис. 2.6. Участок индикаторной диаграммы

При дальнейшем сжатии температура рабочего тела превышает температуру стенок, вследствие чего происходит отвод теплоты в стенки.

Таким образом, процесс сжатия рабочего тела в поршневом ДВС является произвольным термодинамическим процессом.

Чтобы определить параметры рабочего тела в конце такта сжатия, применяют метод, основанный на замене реального процесса сжатия политропным процессом с некоторым показателем n_1 .

Показатель политропы сжатия n_1 определяют экспериментально. Для современных двигателей он находится в пределах $n_1 = 1,34-1,39$, что свидетельствует о том, что в целом сжатие сопровождается отводом теплоты от рабочего тела к стенкам рабочей полости, но вместе с тем вследствие увеличения температуры заряда его внутренняя энергия повышается ($Q < 0$; $\Delta u > 0$).

Этим фактором объясняется отрицательное значение теплоемкости рабочего тела ($c_n < 0$) в процессе сжатия.

Расчет параметров процесса сжатия проводят с помощью формул термодинамики для политропных процессов.

Описание экспериментальной установки

Установка включает в себя двигатель ВАЗ 2106 и устройство для его пуска и прокручивания коленчатого вала.

Для определения давления заряда в конце процесса сжатия используется компрессометр.

Необходимые для обработки результатов технические данные двигателя ВАЗ 2106: степень сжатия $\varepsilon = 8,5$; диаметр цилиндра $D = 80$ мм; ход поршня $S = 79$ мм.

Порядок проведения эксперимента

1. Определить температуру и давление окружающей среды p_0 и T_0 . Данные занести в табл. 9.

Таблица 9

Исходные данные для расчетов

D, м	S, м	ε	p_0 , МПа	T_0 , К

2. Запустить и прогреть двигатель до нормального теплового состояния.

3. Закрыть кран подачи топлива и выключить зажигание.

4. Полностью открыть воздушную и дроссельную заслонки.

5. Измерить давление в конце процесса сжатия при частоте вращения коленчатого вала 500 мин^{-1} .

6. Повторить замер при частоте вращения коленчатого вала 1000 мин^{-1} .

7. Результаты эксперимента занести в табл. 10.

Таблица 10

Определение показателя политропы сжатия, затраченной работы, количества отведенной теплоты в процессе сжатия

Режим работы	p_a , МПа	p_c , МПа	m, кг	T_a , К	T_c , К	n_1	L, Дж	Q, Дж	ΔU , Дж
первый									
второй									

Обработка опытных данных и оформление отчета

1. Определить:

а) рабочий и полный объем цилиндра, объем камеры сгорания;

б) показатель политропы сжатия:

$$n_1 = \lg \frac{p_c}{p_a} / \lg \frac{V_a}{V_c},$$

где p_c – давление в конце процесса сжатия, МПа; p_a – давление в конце впуска ($p_a = 0,8 p_0$, МПа; p_0 – атмосферное давление, МПа); V_a – полный объем цилиндра, м³; V_c – объем камеры сгорания, м³;

в) температуру в конце процесса сжатия:

$$T_c, \text{ К},$$

где T_a – температура в начале процесса сжатия, К ($T_a = T_0 + \Delta T$, $\Delta T = 5 \div 10$ °С – подогрев рабочего тела от деталей двигателя);

г) количество воздуха, участвующего в процессе:

$$m = \frac{p_c \cdot V_c}{R_0 \cdot T_c}, \text{ кг};$$

д) работу, затраченную на сжатие заряда:

$$L = \frac{m \cdot R_0}{n_1 - 1} \cdot (T_a - T_c), \text{ Дж},$$

где R_0 – индивидуальная газовая постоянная воздуха, Дж/(кг К);

е) количество отведенной от рабочего тела теплоты:

$$Q = m \cdot c_n \cdot (T_c - T_a), \text{ Дж},$$

где $c_n = c_v \frac{n_1 - \kappa}{n_1 - 1}$ – удельная теплоемкость воздуха при политропном сжатии, Дж/(кг К); c_v – удельная теплоемкость воздуха при постоянном объеме, Дж/(кг К);

ж) изменение внутренней энергии рабочего тела:

$$\Delta U = m \cdot c_v \cdot (T_c - T_a), \text{ Дж}.$$

2. Проверить правильность расчетов работы, теплоты и внутренней энергии рабочего тела, используя уравнение первого закона термодинамики.

3. Результаты расчета занести в табл. 10.

4. Для одного из режимов рассчитать давления в цилиндре двигателя по выбранным пяти значениям объема по формуле

$$p_i = p_a \cdot \left(\frac{V_a}{V_i} \right)^{\kappa_1}, \text{ МПа.}$$

5. Результаты занести в табл. 11.

6. Построить график процесса сжатия в координатах p - V , используя данные табл. 11.

7. Проанализировать характер протекания исследуемого процесса сжатия с точки зрения характера его энергетического баланса и сделать вывод по работе.

Таблица 11

Данные для построения графика процесса

Параметры	$V_1=V_a$	V_2	V_3	V_4	$V_5=V_c$
$V, \text{ м}^3$					
$p, \text{ МПа}$					

Контрольные вопросы

1. Каково назначение процесса сжатия в поршневом ДВС?
2. Что называется степенью сжатия?
3. Какие термодинамические особенности реального процесса сжатия?
4. Как связаны между собой температура и давление в политропном процессе?
5. Чем объяснить отрицательное значение теплоемкости рабочего тела в процессе сжатия?

Практическая работа 5

ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА ПОРШНЕВОГО КОМПРЕССОРА

Цель работы – исследовать рабочий процесс поршневого компрессора и определить опытным путем показатель политропы сжатия n_1 .

Краткие теоретические сведения

Компрессоры – это машины, предназначенные для сжатия и перемещения газов.

Несмотря на различные принципы работы и большие конструктивные различия компрессоров, с термодинамической точки зрения, процессы, происходящие в них, одинаковы.

Основная тенденция развития всех компрессоров – уменьшение работы, затрачиваемой на сжатие газа.

Сжатие в компрессоре можно считать политропным процессом.

На рис. 2.7 в координатах $p-V$ в точке 1 совмещено для сравнения начало трех термодинамических процессов сжатия воздуха в одноступенчатом компрессоре: адиабатного 1-2', политропного 1-2 и изотермического 1-2'' (температура воздуха сохраняется неизменной вследствие интенсивного охлаждения стенок цилиндра компрессора охлаждающей жидкостью).

Из сравнения процессов, очевидно, что за счет повышения интенсивности охлаждения можно уменьшить работу, расходуемую на сжатие газа в компрессоре. Однако интенсификация охлаждения, в свою очередь, требует затрат энергии. Поэтому сжатие, как правило, является политропным процессом с показателем $k > n_1 > 1$.

Техническая работа одноступенчатого компрессора определяется по формуле

$$\text{-----} \quad \text{---} \quad \text{-----} .$$

Поскольку в большинстве случаев показатель политропы неизвестен, то его определяют опытным путем, используя соотношение параметров рабочего тела до и после сжатия:

$$\left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{n_1-1}{n_1}} = \frac{T_2}{T_1}. \quad (3)$$

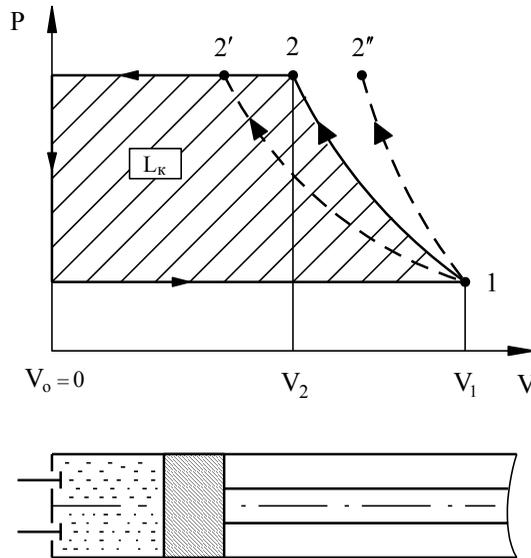


Рис. 2.7. Диаграмма цикла идеализированного одноступенчатого компрессора

Описание экспериментальной установки

На рис. 2.8 представлена схема установки для исследования рабочего процесса поршневого компрессора. Установка состоит из электродвигателя 1, поршневого компрессора 2. На панель выведены приборы для замера давлений (всасывания и нагнетания). Температуры (начальная и конечная) измеряются с помощью датчиков.

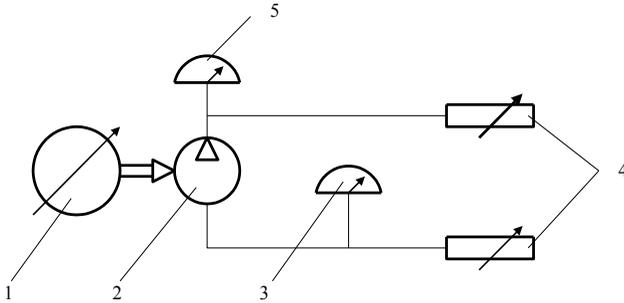


Рис. 2.8. Схема установки для исследования рабочего процесса компрессора: 1 – электродвигатель; 2 – поршневой компрессор; 3 – вакуумметр; 4 – датчики температуры; 5 – манометр

Порядок проведения эксперимента

1. Включить установку.
2. Измерить давление воздуха при всасывании и нагнетании.
3. Измерить начальную и конечную температуры (T_1 и T_2).
4. Данные замера занести в табл. 12.
5. Выключить установку.

Таблица 12

Определение показателя политропы сжатия, КПД компрессора

p_1		p_2		t_1	t_2	T_1	T_2	n_1	V_1	$V_{ц}$	N_k	η_k
мм рт. ст.	Па	мм рт. ст.	Па	°C	°C	К	К		м ³	м ³ /с	Вт	

Обработка опытных данных и оформление отчета

1. Определить:
 - а) показатель политропы сжатия из уравнения (3);
 - б) полный объем цилиндра (допуская, что мертвый объем отсутствует $V_o=0$)

$$\text{---}, \text{ м}^3,$$

где D – диаметр цилиндра, м ($D = 60$ мм); S – ход поршня, м ($S = 50$ мм);

в) цикловую подачу воздуха

$$V_{\text{ц}} = \frac{V_1 \cdot \omega}{60}, \text{ м}^3/\text{с},$$

где ω – частота вращения коленчатого вала компрессора, мин^{-1} ;

г) мощность компрессора

$$\text{---} \text{ ---}, \text{ Вт};$$

д) КПД компрессора

$$\eta = \frac{N_{\text{к}}}{0,95 \cdot N_{\text{дв}}},$$

где $N_{\text{дв}}$ – мощность двигателя, Вт ($N_{\text{дв}} = 1,1$ кВт).

2. Результаты расчета занести в табл. 12.

3. Построить график процесса сжатия в поршневом компрессоре в координатах p – V . Построить адиабатный процесс (для построения процессов использовать не менее пяти точек).

4. Сделать анализ термодинамических процессов сжатия [как увеличение (уменьшение) показателя политропы сжатия влияет на работу компрессора].

Контрольные вопросы

1. Для чего предназначен компрессор?
2. Какой термодинамический процесс реализуется для сжатия газа в компрессоре?
3. Как величина показателя политропы сжатия влияет на работу компрессора?
4. Какой термодинамический процесс, с точки зрения эффективности работы компрессора, является наиболее целесообразным?
5. Каковы тенденции развития всех компрессоров?

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Экспериментальный практикум – это потенциально наиболее значимый и результативный компонент естественнонаучной, общей профессиональной и специальной подготовки в области техники и технологий, предназначенный для приобретения навыков работы на реальном оборудовании, с аналогами которого будущему специалисту, возможно, придется иметь дело в своей практической деятельности.

Важность этого вида учебных занятий находит подтверждение в действующих государственных образовательных стандартах, регламентирующих перечни учебных дисциплин, изучение которых должно сопровождаться выполнением экспериментальных практикумов.

Данное руководство нацелено помочь студентам углубить и закрепить теоретические положения лекционного материала, овладеть методами экспериментальных исследований, развить практические навыки научного анализа и обобщения полученных результатов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кукис, В.С. Смесеобразование и системы питания дизелей: учебное пособие / В.С. Кукис, В.В. Руднев, М.Л. Хасанова. – Челябинск: Изд-во Челяб. гос. пед. ун-та, 2011. – 139 с. – ISBN 978-5-85716-868-4.
2. Хасанова, М.Л. Термодинамика и рабочие процессы двигателей: сб. лаб. работ / М.Л. Хасанова, В.В. Руднев. – Челябинск: Изд-во Челяб. гос. пед. ун-та, 2012. – 48 с. – ISBN 978-5-85716-919-3.
3. Хасанова, М.Л. Термодинамика и рабочие процессы двигателей: основные понятия, термины, определения, области применения: справочное пособие / М.Л. Хасанова, В.А. Белевитин, В.В. Руднев. – Челябинск: Изд-во ЮУрГГПУ, 2019. – 73 с. – ISBN 978-5-907210-44-8.
4. Хасанова, М.Л. Основы гидравлики: учебно-методическое пособие / М.Л. Хасанова, В.А. Белевитин, М.С. Дмитриев. – Челябинск: Изд-во Южно-Урал. гос. гуман.-пед. ун-та, 2020. – 110 с. – ISBN 978-5-907409-09-5.

ПРИЛОЖЕНИЕ

1. Единицы и размерности физических величин.

Системы единиц физических величин

1. Единицей [А] физической величины А называется условно выбранная величина, имеющая тот же физический смысл, что и величина А. Единицы, которые удается воспроизвести в виде определенных тел, образов или устройств, называются мерами. Например, килограммовая гиря является мерой массы, метровая линейка – мерой длины и т. д.

Меры, выполненные с наивысшей достижимой на современном уровне развития измерительной техники точностью, называются, эталонами. Например, в качестве эталона массы принимается определенный цилиндр, изготовленный из платиноиридиевого сплава; эталоном электрического сопротивления является определенная электрическая цепь, состоящая из нескольких проводящих катушек и измерительного устройства, показания которого снимаются при строго определенной температуре, и т. д.

2. Системой единиц называется совокупность определенным образом установленных единиц физических величин. При построении системы единиц всегда выбирают несколько независимых друг от друга основных единиц, а затем, используя закономерные связи между физическими величинами, на их базе устанавливают производные единицы. Совокупность выбранных основных и образованных с их помощью производных единиц называется системой единиц. В качестве основных выбирают такие единицы, которые можно воспроизвести с наибольшей

точностью. Количество основных единиц должно быть достаточным для выражения любых других физических величин.

До 1963 г. использовалось несколько систем единиц (например, абсолютная физическая система единиц СГСЭ в электростатике, системы МКС, МКГСС и др.) В настоящее время принята Международная система единиц (System International; сокращенное обозначение – SI или СИ в русской транскрипции).

Основными единицами называются независимо установленные единицы для нескольких произвольно выбранных независимых физических величин. В системе СИ в качестве основных выбраны семь единиц: метр (длина), килограмм (масса), секунда (время), ампер (сила электрического тока), кельвин (термодинамическая температура), кандела (сила света), моль (количество вещества).

Международная система включает две дополнительные единицы: для плоского угла – радиан, для телесного – стерadian. Из семи основных и двух дополнительных единиц выводят производные единицы для измерений физических величин во всех областях науки и техники. Например, ватт – единица механической мощности (равно джоулю в секунду) – равняется мощности, выделяемой электрическим током силой в 1 ампер при напряжении 1 вольт. В СИ коэффициенты пропорциональности в физических уравнениях, определяющих производные единицы, являются безразмерной единицей. Единицы Международной системы приведены в таблице.

Производными единицами называются единицы, устанавливаемые через основные единицы данной системы на основании физических законов или определений, выражающих взаимосвязь между рассматриваемыми физическими величинами, единицы которых приняты в качестве основных.

Таблица 13

Единицы Международной системы

Наименование величины	Единица			
	Наименование	Обозначение		Определение
		международное	русское	
Основные единицы				
Длина	метр	m	м	Метр равен расстоянию, проходимому в вакууме плоской электромагнитной волной за $1/299792458$ долей секунды
Масса	килограмм	kg	кг	Килограмм равен массе международного прототипа килограмма
Время	секунда	s	с	Секунда равна 9192631770 периодам излучения, соответствующего переходу между сверхтонкими уровнями основного состояния атома цезия-133
Сила электрического тока	ампер	A	A	Ампер равен силе тока неизменяющегося тока, который при прохождении по двум параллельным прямолинейным проводникам бесконечной длины и ничтожно малой площади круглого поперечного сечения, расположенным в вакууме на расстоянии 1 м один от другого, вызвал бы на каждом участке проводника длиной в 1 м силу взаимодействия, равную $2 \cdot 10^{-7}$ Н

Продолжение табл. 13

Наименование величины	Единица			Определение
	Наименование	Обозначение		
		международное	русское	
Термодинамическая температура	кельвин	К	К	Кельвин равен $1/273,16$ части термодинамической температуры тройной точки воды
Количество вещества	моль	mol	моль	Моль равен количеству вещества системы, содержащей столько же структурных элементов, сколько содержится атомов в углероде-12 массой $0,012$ кг. При применении моля структурные элементы должны быть специфицированы группами частиц
Сила света	кандела	cd	кл	Кандела равна силе света в заданном направлении источника, испускающего монохроматическое излучение частотой $540 \cdot 10^{12}$ Гц, энергетическая сила света которого в этом направлении составляет $1/683$ Вт/ср
Дополнительные единицы				
Плоский угол	радиан	rad	рад	Радий равен углу между двумя радиусами окружности, длина дуги между которыми равна радиусу

Продолжение табл. 13

Наименование величины	Единица			Определение
	Наименование	Обозначение		
		международное	русское	
Телесный угол	стерадиан	sr	ср	Стерadian равен телесному углу с вершиной в центре сферы, площадь, равную площади квадрата со стороной, равной радиусу сферы
Производные единицы пространства и времени				
Площадь	Квадратный метр	м ²	м ²	Квадратный метр равен площади квадрата со сторонами, длины которых равны 1 м
Объем	кубический метр	м ³	м ³	Кубический метр равен объему куба с ребрами, длины которых равны 1 м
Скорость	метр в секунду	м/с	м/с	Метр в секунду равен скорости прямолинейно и равномерно движущейся точки, при которой точка за время 1 с перемещается на расстояние в 1 м
Ускорение	метр на секунду в квадрате	м/с ²	м/с ²	Метр на секунду в квадрате равен ускорению прямолинейно и равноускоренно движущейся точки, при котором за время 1 с скорость точки возрастает на 1 м/с

Продолжение табл. 13

Наименование величины	Единица			Определение
	Наименование	Обозначение		
		международное	русское	
Угловая скорость	радиан в секунду	rad/s	рад/с	Радиан в секунду равен угловой скорости равномерно вращающегося тела, при которой за время 1 с совершается поворот тела относительно оси вращения на угол 1 рад
Частота периодического процесса	герц	Hz	Гц	Герц равен частоте периодического процесса, при которой за время 1 с происходит один цикл периодического процесса
Производные единицы механических величин				
Плотность	Килограмм на кубический метр	kg/m ³	кг/м ³	Килограмм на кубический метр равен плотности однородного вещества, масса которого при объеме 1 м ³ равна 1 кг
Импульс	килограмм-метр в секунду	kg*m/s	кг*м/с	Килограмм-метр в секунду равен импульсу (количеству движения) тела массой 1 кг, движущегося со скоростью 1 м/с
Сила	Ньютон	N	Н	Ньютон равен силе, сообщающей телу массой 1 кг ускорение 1 м/с ² в направлении действия силы

Продолжение табл. 13

Наименование величины	Единица			Определение
	Наименование	Обозначение		
		международное	русское	
Момент силы	Ньютон-метр	$N \cdot m$	$H \cdot m$	Ньютон-метр равен моменту силы, создаваемому силой 1 Н относительно точки, расположенной на расстоянии 1 м от линии действия силы
Импульс силы	Ньютон-секунда	$N \cdot s$	$H \cdot c$	Ньютон-секунда равна импульсу силы, создаваемому силой 1 Н, действующей в течение 1 с
Давление	Паскаль	Pa	Па	Паскаль равен давлению, вызываемому силой 1 Н, равномерно распределенной по нормальной к ней поверхности площадью 1 м^2
Работа, энергия	Джоуль	J	Дж	Джоуль равен работе, совершаемой при перемещении точки приложения силы 1 Н на расстояние 1 м в направлении действия силы
Мощность	Ватт	W	Вт	Ватт равен мощности, при которой совершается работа 1 Дж за время 1 с
Производные единицы тепловых величин				
Температура Цельсия	градус Цельсия	С	С	По размеру градус Цельсия равен кельвину

Продолжение табл. 13

Наименование величины	Единица			Определение
	Наименование	Обозначение		
		международное	русское	
Количество теплоты	Джоуль	Дж	Дж	Единица измерения количеств энергии, переданной в форме теплоты
Теплоемкость	Джоуль на кельвин	Дж/К	Дж/К	Отношение количества энергии, переданной в форме теплоты, в количестве 1 Дж к изменению температуры в данной системе на 1 К
Удельная массовая теплоемкость	Джоуль на килограмм-кельвин	Дж/(кг*К)	Дж/(кг*К)	Соотношение между переданной 1 кг массы вещества теплоты к произошедшему изменению его температуры
Производные единицы величин молекулярной физики				
Молярная масса	Килограмм на моль	кг/mol	кг/моль	Килограмм на моль равен молярной массе вещества, имеющего при количестве вещества 1 моль массу 1 кг
Производные единицы электрических и магнитных величин				
Количество электричества, электрический заряд	кулон	С	Кл	Кулон равен количеству электричества, проходящего через поперечное сечение при токе силой 1 А за время 1 с

Продолжение табл. 13

Наименование величины	Единица			Определение
	Наименование	Обозначение		
		международное	русское	
Напряженность электрического поля	вольт на метр	V/m	В/м	Вольт на метр равен напряженности однородного электрического поля, при которой между двумя точками, находящимися на линии напряженности поля на расстоянии 1 м, создается разность потенциалов 1 В
Электрическое напряжение, электрический потенциал	вольт	V	В	Вольт равен электрическому напряжению на участке электрической цепи, при котором в участке происходит постоянный ток силой 1 А и затрачивается мощность 1 Вт
Электрическая емкость	фарад	F	Ф	Фарад равен электрической емкости конденсатора, при которой заряд 1 Кл создает на конденсаторе напряжение 1 В
Магнитная индукция	тесла	T	Тл	Тесла равен магнитной индукции, при которой магнитный поток сквозь поперечное сечение площадью 1 м ² равен 1 Вб

Продолжение табл. 13

Наименование величины	Единица			Определение
	Наименование	Обозначение		
		международное	русское	
Магнитный поток	вебер	Wb	Вб	Вебер равен магнитному потоку, при убывании которого до нуля в сцепленной с ним электрической цепи сопротивлением 1 Ом через поперечное сечение проводника проходит количество электричества 1 Кл
Индуктивность	генри	Н	Гн	Генри равен индуктивности электрической цепи, с которой при силе постоянного тока в ней 1 А сцепляется магнитный поток 1 Вб
Электрическое сопротивление	ом	Ω	Ом	Ом равен электрическому сопротивлению участка электрической цепи, при котором постоянный ток силой 1 А вызывает падение напряжения 1 В
Удельное электрическое сопротивление	Омметр	$\Omega \cdot \text{m}$	Ом*м	Омметр равен удельному электрическому сопротивлению вещества, при котором участок, выполненный из этого вещества электрической цепи длиной 1 м и площадью поперечного сечения 1 м^2 имеет сопротивление 1 Ом

Наименование величины	Единица			Определение
	Наименование	Обозначение		
		международное	русское	
Производные единицы световых величин				
Энергия излучения	джоуль	J	Дж	Единица измерения энергии излучения
Поток излучения	ватт	W	Вт	Ватт равен потоку излучения, эквивалентному механической мощности 1 Вт
Световой поток	люмен	lm	лм	Люмен равен световому потоку, испускаемому точечным источником в телесном угле 1 ср при силе света 1 кд
Световая энергия	люмен-секунда	lm*s	лм*с	Люмен-секунда равна световой энергии, соответствующей световому потоку 1 лм, излучаемому или воспринимаемому в течение 1 с
Яркость	кандела на квадратный метр	cd/m ²	кд/м ²	Кандела на квадратный метр равна яркости светящейся поверхности площадью 1 м ² при слепоте 1 кд
Светимость	люмен на квадратный метр	lm/m ²	лм/м ²	Люмен на квадратной метр равен светимости поверхности площадью 1 м ² , испускающей световой поток 1 лм
Освещенность	люкс	lx	лк	Люкс равен освещенности поверхности площадью 1 м ² при световом потоке падающего на него излучения, равного 1 лм

2. Приставки Международной системы единиц для обозначения десятичных и дольных единиц

Таблица 14

Приставки международной системы единиц

Наименование	Обозначение приставки		Множитель
	русское	международное	
Экса	Э	E	10^{18}
Пета	П	P	10^{15}
Тера	Т	T	10^{12}
Гига	Г	G	10^9
Мега	М	M	10^6
Кило	к	k	10^3
Гекто	г	h	10^2
Дека	да	da	10^1
Деци	д	d	10^{-1}
Санتي	с	c	10^{-2}
Милли	м	m	10^{-3}
Микро	мк	μ	10^{-6}
Нано	н	N	10^{-9}
Пико	п	p	10^{-12}
Фемто	ф	F	10^{-15}
Атто	а	a	10^{-18}

3. Некоторые физические постоянные

Таблица 15

Физические постоянные

Постоянная	Обозначение	Величина
Ускорение свободного падения на уровне моря и широте 45 градусов	g	9.80665 м/с^2
Гравитационная постоянная		$6,6732 \cdot 10^{-11} \text{ Н} \cdot \text{м}^2 / \text{кг}^2$
Нормальное атмосферное давление	p_0	$1,013 \cdot 10^5 \text{ Н/м}^2$

Постоянная	Обозначение	Величина
Число Авогадро	N	$6,023 \cdot 10^{26}$ кмоль ⁻¹
Точка плавления льда		273,15 К
Постоянная Больцмана	k	$1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К
Универсальная газовая постоянная	R	8,317 кДж/(кмоль*К)
Постоянная Фарадея	F	$9,648 \cdot 10^7$ Кл/кмоль
Постоянная Стефана-Больцмана	σ_0	$5,67 \cdot 10^{-8}$ Дж/(м ² К ⁴ с)
Постоянная Вина	b	$2,9 \cdot 10^{-3}$ м*К
Масса покоя протона	m_p	$1,67265 \cdot 10^{-27}$ кг
Масса покоя нейтрона	m_n	$1,67495 \cdot 10^{-27}$ кг
Масса покоя электрона	m_e	$9,1095 \cdot 10^{-31}$ кг
Скорость света в вакууме	c	$2,997925 \cdot 10^8$ м/с ²
Заряд электрона	e	$1,602 \cdot 10^{-19}$ Кл
Постоянная Планка	h	$6,62618 \cdot 10^{-34}$ Дж*с

4. Теплофизические свойства некоторых веществ

Таблица 16

Теплофизические свойства некоторых веществ

Наименование вещества	Плотность, кг/м ³	Температура испытания, °С	Коэффициент теплопроводности, Вт/м °С	Удельная массовая теплоемкость, кДж/(кг К)	Коэффициент температуропроводности, $\alpha \cdot 10^8$ м ² /с
1	2	3	4	5	6
Серебро	10500	0	458	0,234	18600
Медь	8800	0	383	0,381	11450
Латунь	8600	0	85,5	0,367	2640
Бронза	8000	20	64	0,38	20827
Алюминий	2670	0	203,5	0,96	9110
Сталь	7900	20	45,5	0,46	1250
Чугун	7220	20	62,8	0,502	1735

Окончание табл. 16

1	2	3	4	5	6
Нихром	8400	20	11,6	0,45	-
Ртуть	13600	5	7,9	0,138	425
Асбест листовый	770	30	0,116	0,814	198
Бетон	2300	20	1,28	1,13	49,2
Глина огне- упорная	1845	-	1,035	1,09	51,5
Земля влажная	1700	450	0,657	2,00	14,25
Песок сухой	1500	20	0,325	0,8	273,5
Песок влажный	1650	20	1,13	2,10	49,2
Копоть ламповая	190	40	0,0314	-	-
Накипь котельная	2500	55	1,31-3,14	-	-
Дерево (дуб):					
• поперек волокон	800	20	0,207	1,76	14,7
• вдоль волокон	800	20	0,362	-	-
Стекло	2500	20	0,745	0,67	44,5
Стекланная вата	2000	0	0,0372	0,67	27,8
Каменный уголь	1400	20	0,186	1,3	10,25
Лёд	920	0	2,25	2,26	108
Снег	560	-20	0,465	2,09	39,8
Парафин	920	20	0,267	3,24	-
Бензин	900	0	0,145	1,8	89,7
Нефтяное масло	890	200	0,153	2,43	48
Вода	998	20	59,9	4,183	14,3

5. Теплофизические свойства металлов и сплавов

Таблица 17

Теплофизические свойства металлов и сплавов

Наименование вещества	$t, ^\circ\text{C}$	$\lambda, \text{Вт/мК}$	$\rho, \text{кг/м}^3$	$c, \text{кДж/кг К}$	$\alpha \cdot 10^6, \text{м}^2/\text{с}$
Алюминий	0	209,3	2700	0,896	86,7
Окись алюминия	100	30,2	3700	0,925	8,82
Бронза (95% Cu, 5% Al)	20	83,2	8660	0,410	23,3
Дюралюминий (94-96% Al, 3-5% Cu)	20	164,4	2800	0,883	66,7
Железо	0	74,4	7880	0,440	21,5
Латунь (70% Cu, 30% Sn)	20	110,7	8520	0,385	33,8
Медь	0	389,6	8930	0,388	112,5
Натрий жидкий	100	86,1	928	1,384	66,9
Никель	0	67,4	8900	0,427	17,8
Олово	0	66,3	7300	0,222	41,1
Ртуть	0	8,2	13600	0,139	4,3
Серебро	0	418,7	10500	0,234	170,0
Сталь углеродистая (C = 0,5%)	20	53,6	7830	0,465	14,7
Сталь нержавеющая 1X18H19T	20	16,0	7900	0,502	4,04
Титан	0	15,1	4540	0,532	6,2
Двуокись циркония	100	167	5200	0,586	54,8
Чугун (C = 4%)	20	57,9	7270	0,419	17,0

**6. Плотность и удельный объем воды
при различных температурах (при $p = 1,01 \cdot 10^5$ Па)**

Таблица 18

Теплофизические свойства металлов и сплавов

Температура, °С	Плотность, г/см ³	Удельный объем, см ³ /г	Температура, °С	Плотность, г/см ³	Удельный объем, см ³ /г	Температура, °С	Плотность, г/см ³	Удельный объем, см ³ /г
0	0,9998	1,0001	18	0,9986	1,0013	35	0,9941	1,0060
2	0,9999	1,000	19	0,9984	1,0016	40	0,9922	1,0078
4	1,0000	1,000	20	0,9982	1,0018	45	0,9903	1,0099
6	0,9999	1,000	21	0,9980	1,0020	50	0,9881	1,0121
8	0,9998	1,001	22	0,9978	1,0022	55	0,9857	1,0145
10	0,9997	1,003	23	0,9976	1,0024	60	0,9832	1,0171
11	0,9996	1,004	24	0,9974	1,0027	65	0,9806	1,0198
12	0,9995	1,005	25	0,9970	1,0029	70	0,9778	1,0227
13	0,9994	1,006	26	0,9968	1,0032	75	0,9749	1,0258
14	0,9993	1,007	27	0,9965	1,0035	80	0,9718	1,0289
15	0,9991	1,009	28	0,9963	1,0037	90	0,9653	1,0360
16	0,9989	1,0010	29	0,9960	1,0041	100	0,9584	1,0434
17	0,9988	1,0012	30	0,9957	1,0044			

7. Удельные теплоемкости некоторых веществ

Таблица 19

Удельная массовая теплоемкость воды (при $p = 1,01 \cdot 10^5$ Па)

t, °С	C_p	C_v	$C_p - C_v$
	кДж/(кг К)	кДж/(кг К)	кДж/(кг К)
0	4,220	4,220	=0
10	4,191	4,187	0,004
20	4,183	4,153	0,030
30	4,178	4,120	0,058
40	4,178	4,078	0,100
50	4,183	4,032	0,151
60	4,183	3,982	0,201
70	4,191	3,931	0,260
80	4,195	3,877	0,318
90	4,204	3,823	0,381
100	4,216	3,768	0,448

Таблица 20

Удельная молярная теплоемкость некоторых газов
при постоянном давлении [μср, кДж/(кмоль*К)]

t, °C	O ₂ (μ = 32)	N ₂ (μ = 28)	CO (μ = 28)	CO ₂ (μ = 44)	H ₂ O (μ = 18)	SO ₂ (μ = 64)	Воздух (μ = 28)
0	29,274	29,019	29,123	35,86	33,499	38,85	29,073
100	29,538	29,048	29,178	38,112	33,741	40,65	29,152
200	29,931	29,132	29,303	40,059	34,118	42,33	29,299
300	30,4	29,287	29,517	41,755	34,575	43,88	29,521
400	30,878	29,5	29,789	43,25	35,09	45,22	29,789
500	31,334	29,764	30,099	44,573	35,63	46,39	30,095
600	31,761	30,044	30,425	45,753	36,195	47,35	30,405
700	32,15	30,341	30,752	46,813	36,789	48,23	30,723
800	32,502	30,635	31,07	47,763	37,392	48,94	31,028
900	32,825	30,924	31,376	48,617	38,228	49,61	31,321
1000	33,118	31,196	31,665	49,392	38,619	50,16	31,598
1100	33,386	31,455	31,937	50,099	39,226	50,66	31,862
1200	33,633	31,832	32,192	50,74	39,825	51,08	32,109
1300	33,863	31,941	32,427	51,322	40,407	–	32,343
1400	33,076	32,163	32,653	51,858	40,976	–	32,565
1500	34282	32,302	32,858	52,348	41,525	–	32,774
1600	34,474	32,565	33,051	52,8	42,056	–	32,967
1700	34,658	32,749	33,231	53,218	42,576	–	33,151
1800	64,834	32,917	33,402	53,604	43,07	–	33,319
1900	35,006	33,08	33,561	53,959	43,539	–	33,482
2000	35,169	33,231	33,708	54,29	43,995	–	33,641

Таблица 21

Удельная массовая теплоемкость газов по С.Л. Ривкину

t, °C	c _p	c _γ	K = c _p /c _γ	t, °C	C _p	C _γ	K = c _p /c _γ
	кДж/(кг*К)				кДж/(кг*К)		
Воздух (μ = 28,970)				Азот N ₂ (μ = 28,013)			
-50	1,0019	0,7147	1,402	-50	0,0387	0,7419	1,4
-25	1,0023	0,7151	1,401	-25	1,0387	0,7419	1,4
0	1,0032	0,7159	1,401	0	1,0387	0,7419	1,4
25	1,004	0,7168	1,4	25	1,0392	0,7423	1,4
50	1,0057	0,7184	1,399	50	1,04	0,7432	1,399
75	1,0073	0,7201	1,398	75	1,0408	0,744	1,399

Продолжение табл. 21

t, °C	c _p	c _γ	K = c _p /c _γ	t, °C	C _p	C _γ	K = c _p /c _γ
	кДж/(кг*К)				кДж/(кг*К)		
Воздух (μ = 28,970)				Азот N ₂ (μ = 28,013)			
100	1,0098	0,7226	1,397	100	1,0421	0,7444	1,399
125	1,0128	0,7256	1,395	125	1,0438	0,7465	1,398
150	1,0157	0,7285	1,394	150	1,0459	0,749	1,396
175	1,0199	0,7327	1,392	175	1,0484	0,7515	1,395
200	1,0241	0,736	1,389	200	1,0517	0,7549	1,393
250	1,0337	0,7465	1,384	250	1,0597	0,7628	1,389
300	1,0446	0,7574	1,379	300	1,0693	0,7725	1,384
350	1,0563	0,7691	1,373	350	1,0798	0,7829	1,379
400	1,068	0,7808	1,368	400	1,0911	0,7942	1,374
450	1,0798	0,7926	1,362	450	1,1036	0,8068	1,368
500	1,0919	0,8047	1,357	500	1,1158	0,8189	1,362
550	1,1036	0,8164	1,352	550	1,1279	0,8311	1,357
600	1,1149	0,8277	1,347	600	1,1396	0,8428	1,352
650	1,1258	0,8399	1,342	650	1,151	0,8541	1,348
700	1,1355	0,8487	1,338	700	1,1618	0,8633	1,344
750	1,1455	0,8583	1,334	750	1,1723	0,8754	1,339
800	1,1547	0,8675	1,331	800	1,1824	0,8855	1,335
850	1,1631	0,8759	1,327	850	1,1916	0,8947	1,332
900	1,1706	0,8834	1,325	900	1,1999	0,9031	1,329
950	1,1777	0,8905	1,322	950	1,2079	0,911	1,326
1000	1,1844	0,8972	1,32	1000	1,2154	0,9186	1,323
1050	1,1911	0,9039	1,317	1050	1,2225	0,9257	1,32
1100	1,197	0,9098	1,315	1100	1,2292	0,9324	1,318
1150	1,2024	0,9152	1,314	1150	1,2355	0,9387	1,316
1200	1,2079	0,9207	1,312	1200	1,2414	0,9445	1,314
1250	1,2129	0,9257	1,31	1250	1,2468	0,95	1,312
1300	1,2179	0,9307	1,308	1300	1,2518	0,955	1,311
1350	1,2225	0,9353	1,307	1350	1,2569	0,96	1,309
1400	1,227	0,9395	1,305	1400	1,2615	0,9646	1,308
1450	1,2309	0,9437	1,304	1450	1,2657	0,9688	1,307
1500	1,2347	0,9475	1,303	1500	1,2694	0,9726	1,306
Кислород O (μ = 31,996)				Двуокись углерода CO ₂ (μ = 44,0079)			
-50	0,9102	0,6502	1,4	-50	0,7612	0,5723	1,33
-25	0,9115	0,6515	1,399	-25	0,7896	0,6008	1,314

Продолжение табл. 21

t, °C	c _p	c _γ	K = c _p /c _γ	t, °C	C _p	C _γ	K = c _p /c _γ
	кДж/(кг*К)				кДж/(кг*К)		
Кислород O (μ = 31,996)				Двуокись углерода CO ₂ (μ= 44,0079)			
0	0,9136	0,6536	1,398	0	0,8173	0,6284	1,301
25	0,9169	0,6569	1,395	25	0,8436	0,6548	1,28
50	0,9215	0,6615	1,393	50	0,8688	0,6799	1,278
75	0,9265	0,6665	1,39	75	0,8926	0,7038	1,268
100	0,9328	0,6728	1,386	100	0,9156	0,7268	1,26
125	0,9399	0,6799	1,382	125	0,9374	0,7486	1,252
150	0,9473	0,6873	1,378	150	0,9575	0,7687	1,243
175	0,955	0,695	1,374	175	0,9764	0,7875	1,24
200	0,963	0,703	1,37	200	0,9948	0,806	1,235
250	0,978	0,7189	1,361	250	1,0291	0,8403	1,225
300	0,9948	0,7348	1,354	300	1,0601	0,8713	1,217
350	1,0098	0,7498	1,346	350	1,0881	0,8993	1,21
400	0,0237	0,7637	1,34	400	1,1137	0,9249	1,204
450	1,0362	0,7762	1,335	450	1,1371	0,9483	1,199
500	1,048	0,788	1,33	500	1,1585	0,9697	1,194
550	1,0588	0,7988	1,325	550	1,1782	0,9893	1,191
600	1,0689	0,8089	1,321	600	1,1962	1,0073	1,188
650	1,0781	0,8181	1,318	650	1,2125	1,0237	1,184
700	1,086	0,826	1,314	700	1,2276	1,0387	1,182
750	1,0932	0,8332	1,312	750	1,2414	1,0526	1,18
800	1,0999	0,8399	1,309	800	1,2544	1,0655	1,177
850	1,1062	0,8462	1,307	850	1,2661	1,0773	1,175
900	1,112	0,852	1,304	900	1,2766	1,0877	1,174
950	1,1174	0,8574	1,303	950	1,2866	1,0978	1,172
1000	1,1225	0,8625	1,303	1000	1,2958	1,107	1,171
1050	1,1271	0,8671	1,3	1050	1,3046	1,1158	1,169
1100	1,1317	0,8717	1,298	1100	1,3126	1,1237	1,168
1150	1,1359	0,8759	1,296	1150	1,3197	1,1308	1,167
1200	1,1401	0,8801	1,295	1200	1,3264	1,1376	1,166
1250	1,1438	0,8838	1,294	1250	1,3331	1,1442	1,165
1300	1,1476	0,8876	1,293	1300	1,3389	1,1501	1,164
1350	1,1514	0,8914	1,291	1350	1,3444	1,1556	1,164
1400	1,1551	0,8954	1,29	1400	1,3494	1,1606	1,163
1450	1,589	0,8989	1,289	1450	1,3544	1,1656	1,162
1500	1,1627	0,9027	1,288	1500	1,359	1,1702	1,161

Продолжение табл. 21

t, °C	c _p	c _γ	K = c _p /c _γ	t, °C	C _p	C _γ	K = c _p /c _γ
	кДж/(кг*К)				кДж/(кг*К)		
Водяной пар H ₂ O (μ = 18,014)				Оксид углерода CO (μ = 28,009)			
0	1,8606	1,3992	1,33	-50	1,0387	0,7419	1,4
25	1,8648	1,4034	1,33	-25	1,0392	0,7423	1,4
50	1,8711	1,4097	1,327	0	1,0392	0,7423	1,4
75	1,8794	1,4181	1,326	25	1,04	0,7432	1,399
100	1,8899	1,4285	1,323	50	1,0408	0,744	1,399
125	1,9012	1,4398	1,321	75	1,0425	0,7457	1,398
150	1,9129	1,4515	1,318	100	1,0442	0,7473	1,397
175	1,9255	1,4641	1,315	125	1,0467	0,7498	1,396
200	1,9393	1,4779	1,312	150	1,0505	0,7536	1,394
250	1,969	1,5076	1,306	175	1,0542	0,7574	1,392
300	2	1,5386	1,3	200	1,0584	0,7616	1,39
350	2,0323	1,5709	1,294	250	1,0689	0,772	1,384
400	0,0649	1,6035	1,287	300	1,0802	0,7834	1,379
450	2,0984	1,637	1,281	350	1,0932	0,7963	1,373
500	20,1328	1,6714	1,276	400	1,1062	0,8093	1,367
550	2,1675	1,7061	1,271	450	1,1191	0,8223	1,361
600	2,2027	1,7413	1,265	500	1,1321	0,8353	1,355
650	2,2378	1,7764	1,26	550	1,1451	0,8482	1,35
700	2,2734	1,812	1,255	600	1,1572	0,8604	1,345
750	2,309	1,8476	1,25	650	1,1685	0,8717	1,341
800	2,3442	1,8828	1,245	700	1,1794	0,8826	1,336
850	2,3789	1,9175	1,241	750	1,1895	0,8926	1,32
900	2,4133	1,9519	1,236	800	1,1991	0,9022	1,329
950	2,4468	1,9854	1,232	850	1,2079	0,911	1,326
1000	2,4794	2,018	1,229	900	1,2163	0,9194	1,323
1050	2,5112	2,0498	1,225	950	1,2238	0,927	1,32
1100	2,5418	2,0804	1,222	1000	1,2309	0,9341	1,318
1150	2,5715	2,1101	1,219	1050	1,2372	0,9404	1,316
1200	2,6	2,1386	1,216	1100	1,2435	0,9466	1,314
1250	2,6276	2,1662	1,213	1150	1,2493	0,9525	1,312
1300	2,654	2,1926	1,211	1200	1,2548	0,9579	1,31
1350	2,6791	2,2177	1,208	1250	1,2598	0,963	1,308
1400	2,7038	2,2424	1,206	1300	1,2644	0,9676	1,307
1450	2,7269	2,2655	1,204	1350	1,2686	0,9718	1,305
1500	2,7495	2,2881	1,202	1400	1,2728	0,9759	1,304

Окончание табл. 21

t, °C	c _p	c _γ	K = c _p /c _γ	t, °C	C _p	C _γ	K = c _p /c _γ
	кДж/(кг*К)				кДж/(кг*К)		
Водяной пар H ₂ O (μ = 18,014)				Оксид углерода CO (μ = 28,009)			
				1450	1,2766	0,9797	1,303
				1500	1,2803	0,9835	1,302
Водород (μ = 2,0159)							
-50	13,808	9,684	1,425	600	14,779	10,655	1,387
-25	14,03	9,906	1,416	650	14,855	10,731	1,384
0	14,189	10,065	1,41	700	14,938	10,814	1,381
25	14,298	10,174	1,405	750	15,026	10,902	1,378
50	14,365	10,241	1,403	800	15,118	10,994	1,375
75	14,107	10,283	1,401	850	15,219	11,095	1,372
100	14,436	10,312	1,4	900	15,32	11,196	1,369
125	14,457	10,333	1,399	950	15,42	11,296	1,365
150	14,474	10,35	1,398	1000	15,525	11,401	1,362
175	14,486	10,362	1,398	1050	15,629	11,505	1,358
200	14,499	10,375	1,398	1100	15,734	11,61	1,355
250	14,516	10,392	1,397	1150	15,843	11,719	1,352
300	14,532	10,408	1,396	1200	15,952	11,828	1,349
350	14,553	10,429	1,395	1250	16,06	11,936	1,346
400	14,578	10,454	1,394	1300	16,165	12,041	1,342
450	14,616	10,492	1,393	1350	16,274	12,15	1,339
500	14,658	10,534	1,392	1400	16,374	12,25	1,337
550	14,712	10,588	1,39	1450	16,479	12,355	1,334
				1500	16,58	12,456	1,331

Таблица 22

Зависимость удельной массовой изобарной теплоемкости воды от давления при температуре 20 °C

p, МПа	c _p , кДж/(кг*К)	p, МПа	c _p , кДж/(кг*К)	p, МПа	c _p , кДж/(кг*К)
0,1	4,183	40	4,074	80	4,007
20	4,128	60	4,04	100	3,973

8. Характеристики фазовых переходов некоторых веществ

Таблица 23

Характеристики фазовых переходов

Наименование вещества	Температура плавления, °С	Удельная теплота плавления, кДж/кг	Температура кипения, °С	Удельная теплота парообразования, кДж/кг
Алюминий	660	1060	2500	12000
Вода	0	334	100	2256
Водород	-259	59	-253	454
Железо	1535	277	2735	6340
Золото	1063	66	2700	1650
Кремний	1415	2760	3250	16000
Магний	650	1090	1095	6000
Медь	1083	205	2590	4790
Никель	1453	303	2800	6480
Олово	232	60	2430	2450
Плутоний	640	125	3350	1430
Ртуть	-39	12	357	285
Свинец	327	23	1750	8600
Титан	1670	1500	3300	10000
Уран	1130	200	1200	2250
Цинк	420	111	907	1755
Этиловый спирт	-115	108	78	840

9. Соотношение между различными температурными шкалами

Таблица 24

Наименование шкал	МПТШ t, °С	Шкала Ренкина, T, °Ra	Шкала Фаренгейта, t, °Ф	Шкала Реомюра, t, °R
МПТШ, t, °С	–	$5/9T^{\circ}\text{Ra} - 273,15$	$(t^{\circ}\text{Ф} - 32)/1,8$	$1,25 t^{\circ}\text{R}$
Шкала Ренкина, T, °Ra	$1,8(t^{\circ}\text{C} + 273,15)$	–	$t^{\circ}\text{Ф} + 459,67$	$1,8(1,25 t^{\circ}\text{R} + 273,15)$
Шкала Фаренгейта, t, °Ф	$1,8 t^{\circ}\text{C} + 32$	$T^{\circ}\text{Ra} - 459,67$	–	$9/4 t^{\circ}\text{R} + 32$
Шкала Реомюра, t, °R	$0,8 t^{\circ}\text{C}$	$0,8(5/9 T^{\circ}\text{Ra} - 51,372)$	$4/9(t^{\circ}\text{Ф} - 32)$	–

Учебное издание

**Хасанова Марина Леонидовна
Руднев Валерий Валентинович
Дмитриев Михаил Сергеевич**

**РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ
ПРАКТИЧЕСКИХ РАБОТ ДИСЦИПЛИНЫ
«ТЕРМОДИНАМИКА И РАБОЧИЕ ПРОЦЕССЫ
ДВИГАТЕЛЕЙ»**

Учебно-методическое пособие

ISBN 978-5-907409-75-0

Работа рекомендована РИС университета
Протокол № 22 от 2021 г.

Издательство ЮУрГГПУ
454080, г. Челябинск, пр. Ленина, 69

Редактор О.В. Куныгина
Компьютерный набор М.Л. Хасанова
Технический редактор Т.Н. Никитенко

Подписано в печать 28.06.2021 г.
Формат 60×84 1/16. Объем 1,7 уч.-изд. л. (3,8 усл. печ. л.)
Бумага типографская. Тираж 100 экз. Заказ №

Отпечатано с готового оригинал-макета в типографии ЮУрГГПУ
454080, г. Челябинск, пр. Ленина, 69