



**«МОСКОВСКИЙ АВТОМОБИЛЬНО-ДОРОЖНЫЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ (МАДИ)»
БРОННИЦКИЙ ФИЛИАЛ**

В. И. ЕРЕМИН

**МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ
ПО ВЫПОЛНЕНИЮ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ
ПО ДИСЦИПЛИНЕ
«ТЕРМОДИНАМИКА И ТЕПЛОПЕРЕДАЧА»**

Учебно-методическое пособие

БРОННИЦЫ 2020

**«МОСКОВСКИЙ АВТОМОБИЛЬНО-ДОРОЖНЫЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ (МАДИ)»
БРОННИЦКИЙ ФИЛИАЛ**

Кафедра общетехнических дисциплин

Утверждаю

Зав.кафедрой, д.т.н., доцент

_____ Р.Ш.Суфиянов

« ___ » _____ 2020г.

В. И. ЕРЕМИН

**МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ
ПО ВЫПОЛНЕНИЮ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ ПО
ДИСЦИПЛИНЕ «ТЕРМОДИНАМИКА И ТЕПЛОПЕРЕДАЧА»**

Учебно-методическое пособие
по выполнению самостоятельной работы студентов
специальности 23.05.01 «Наземные транспортно-технологические средства»

БРОННИЦЫ 2020

УДК 536.2/.7
ББК 31.311+31.312
E702

Еремин В.И.

E702 Методические указания по выполнению самостоятельной работы по дисциплине «Термодинамика и теплопередача»: Учебно-методическое пособие / В. И. Еремин. – Бронницы: БФ МАДИ, 2020. – 51 с.

В учебном пособии приведены индивидуальные задания для самостоятельной работы студентов изучающих дисциплину «Термодинамика и теплопередача» по специальности 23.05.01 «Наземные транспортно-технологические средства», подробно изложены сведения по основным теоретическим положениям для выполнения каждого задания, методология и примеры решения практических задач на темы, изучаемые в теоретическом курсе дисциплины.

Данное учебное пособие предназначено для студентов, изучающих дисциплину «Термодинамика и теплопередача».

© Бронницкий филиал МАДИ, 2020

1. ОСНОВНЫЕ ЗАДАЧИ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ.

Выполнение самостоятельной работы студентов имеет задачи:
закрепить и углубить знания, полученные в результате изучения теоретического и практического курса по Термодинамике и теплопередаче;
научить студентов применению этих знаний к решению практических задач расчета тепловых процессов в помещениях, устройствах, агрегатах и тепловых машинах.

Цель выполнения самостоятельной работы – закрепить теоретический материал курса «Термодинамика и теплопередача» и применить его для расчетов тепловых машин.

В процессе работы студенты должны проявить самостоятельность, творческий подход к решаемым задачам, научиться работать с теоретической и справочной литературой.

2. СОДЕРЖАНИЕ И СТРУКТУРА РАБОТЫ

Содержание самостоятельной работы определяется ее заданием, которое выдается преподавателем каждому обучаемому индивидуально, в соответствии с сформированными вариантами для каждой из практических задач.

Студент должен уяснить задание, подобрать и изучить рекомендованную литературу, материал лекций и практических занятий и в соответствии с приведенными примерами выполнить свою работу.

Самостоятельная работа состоит из решения следующих практических задания на темы, изучаемые в теоретическом курсе дисциплины:

1. Законы и уравнения для смесей идеальных газов и их характеристики.
2. Расчеты теплоемкости газов.
3. Определение внешних характеристик тепловых двигателей.
4. Определение характеристик одноступенчатого поршневого компрессора.
5. Расчет циклов поршневых двигателей внутреннего сгорания.
6. Расчет теплопроводности цилиндрической трубы.
7. Конвективный теплообмен и теплоотдача.

Самостоятельная работа выполняется на листах формата А4 с оформлением титульного листа установленной формы с указанием номера варианта.

При оформлении решений задач в обязательном порядке записывается текстовое условие задачи и подробное ее решение с пояснениями из теоретической части соответствующих разделов дисциплины. В используемых для решения формулах должны быть пояснения величин входящих в эту формулу.

Варианты заданий для решения выбираются в соответствии с порядковым номером записи студента в журнале группы. Для студентов под номером в журнале №26 и далее, выбираются номера вариантов начиная с №1.

Задание №5 выполняется **в соответствии с общим условием и порядком расчетов приведенным в примере** выполнения задания №5.

Текст пояснительной записки может быть выполнен разборчивым рукописным подчерком или с использованием компьютера и принтера через полтора интервала. Цвет шрифта должен быть черным, высота букв, цифр и других знаков – не менее 1,8 мм (кегель 14). Решение каждой задачи необходимо начинать с нового листа. Графики в задании №5 должны быть выполнены на отдельных листах в масштабе. Листы выполненной работы должны иметь порядковые номера в пределах всей работы. Оформление титульного листа должно соответствовать установленной в филиале форме (см. следующую страницу).



**«МОСКОВСКИЙ АВТОМОБИЛЬНО-ДОРОЖНЫЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ (МАДИ)»**

БРОННИЦКИЙ ФИЛИАЛ

Факультет: Автомобильный транспорт
Кафедра: Общетехнические дисциплины

Самостоятельная работа
по дисциплине «Термодинамика и теплопередача»
33 вариант

Выполнил: студент 3 курса,
группа АХ-00Д
Иванов И.И.

Проверил: доцент Петров В.И.

БРОННИЦЫ 2020

2. ВАРИАНТЫ ЗАДАНИЙ

Задание №1

Задан объемный состав газовой смеси: r_{H_2} , r_{NH_3} , r_{CO_2} . Определить массовый и мольный составы смеси, кажущуюся молекулярную массу, газовую постоянную, удельный объем и плотность смеси при давлении смеси p и температуре смеси t . Определить также массовую, объемную и мольную теплоемкость смеси.. При этом считать теплоемкость не зависящей от температуры, а мольные теплоемкости найти по справочным таблицам теплоемкостей .

Таблица 1.1

Исходные данные к заданию №1

Вариант	r_{H_2}	r_{NH_3}	r_{CO_2}	P , МПа	t , °C
1	2	3	4	5	6
1	0,10	0,60	0,30	0,10	0
2	0,15	0,50	0,35	0,15	10
3	0,20	0,40	0,40	0,20	20
4	0,25	0,50	0,25	0,25	30
5	0,30	0,60	0,10	0,30	40
6	0,35	0,50	0,15	0,35	50
7	0,40	0,40	0,20	0,40	60
8	0,45	0,30	0,25	0,35	70
9	0,50	0,20	0,30	0,30	80
10	0,55	0,10	0,35	0,25	90
11	0,60	0,10	0,30	0,20	100
12	0,65	0,20	0,15	0,15	90
13	0,65	0,25	0,10	0,10	80
14	0,60	0,20	0,20	0,15	70
15	0,50	0,10	0,40	0,20	60
16	0,50	0,20	0,30	0,25	50
17	0,40	0,30	0,30	0,30	40
18	0,40	0,40	0,20	0,35	30
19	0,30	0,30	0,40	0,40	20
20	0,30	0,40	0,30	0,45	10
21	0,55	0,10	0,35	0,25	20
22	0,40	0,40	0,20	0,40	30
23	0,60	0,20	0,20	0,35	40
24	0,25	0,50	0,25	0,25	50
25	0,65	0,25	0,10	0,10	60

Таблица 1.3

Молярные теплоемкости при температуре 20⁰С и давлении 1 атм

Вещество	C_V , кал/(моль·К)	C_P , кал/(моль·К)	C_P/C_V
Одноатомный газ			
He	2,98	4,97	1,67
Ar	2,98	4,97	1,67
Двухатомный газ			
H ₂	4,88	6,87	1,41
N ₂	4,96	6,95	1,40
Многоатомный газ			
CO ₂	6,80	8,83	1,30
NH ₃	6,65	8,80	1,31

Задание №2

К 1 кг заданного газа, находящегося в емкости при температуре t_1 и давлении p_1 подводиться q теплоты. Определить: конечную температуру и конечное давление газа после подвода теплоты, если зависимость истинной теплоемкости от температуры задана формулой (см. таблицу с вариантами); конечные температуру и давление в предположении постоянного значения теплоемкости равной ее значению при исходной температуре; величину расхождения в рассчитанных значениях в обоих случаях в процентах.

Таблица 2.1

Данные к заданию №2

Вариант	Газ	$t_1, ^\circ\text{C}$	$p_1, \text{бар}$	$q, \text{кДж}$	Уравнение зависимости $\mu_{sp}(t), \text{кДж}/(\text{кмоль К})$
1	N ₂ O	16	1.0	1200	40,186+0,00975t
2	CO ₂	18	1,2	1000	41,36+0,0145t
3	N ₂	20	1,1	900	28,537+0,00539t
4	O ₂	25	0,9	1500	29,58+0,00697t
5	He	23	1,4	1400	20,97+0,00184t
6	H ₂	27	1,3	1100	28,345+0,00315t
7	CO	30	1,0	800	28,739+0,00588t
8	H ₂ O	26	1,5	1000	32,837+0,01166t
9	CH ₄	19	1,2	1200	36,73+0,00587t
10	C ₂ H ₄	20	1,1	1400	42,78+0,0243t
11	Ne	22	0,9	1600	20,95+0,00474T
12	NH ₃	23	1,4	1500	36,70+0,00878t
13	NO	30	1,3	860	29,28+0,0156t
14	SO ₂	28	1,0	960	40,873+0,013204t
15	C ₃ H ₈	16	1,12	1100	72,9+0,0107t
16	C ₂ H ₂	18	1,15	1300	41,5+0,00976t
17	Ar	25	0,96	1250	20,79+0,00378t
18	H ₂ S	24	0,98	1450	34,88+0,00417t
19	воздух	27	1,0	1050	28,765+0,00572t
20	Cl	22	1,2	920	18,388+0,000525t
21	NO	30	1,3	860	29,28+0,0156t
22	C ₂ H ₄	20	1,1	1400	42,78+0,0243t
23	H ₂	27	1,3	1100	28,345+0,00315t
24	Ar	25	0,96	1250	20,79+0,00378t
25	N ₂	20	1,1	900	28,537+0,00539t

Задание №3

Определить литровую мощность и удельный индикаторный расход топлива четырехцилиндрового ($i = 4$) четырехтактного ($\tau = 4$) двигателя, если среднее индикаторное давление равно P_i , (Па). Диаметр цилиндра $D = 0.12$ м, ход поршня $S = 0.1$ м. угловая скорость вращения коленчатого вала ω (рад/с). механический к.п.д. η_m и удельный расход топлива $B = 0.008$ кг/с. Данные для расчета принять по табл. 3.1.

Таблица 3.1

Данные к заданию №3

Вариант	P_j , МПа	ω , рад/с	η_m
1	1,10	450	0,90
2	1,05	429	0,89
3	1,00	408	0,88
4	0,95	387	0,87
5	0,90	481	0,86
6	0,85	534	0,85
7	1,10	502	0,86
8	1,15	513	0,87
9	1,20	523	0,88
10	1,15	461	0,89
11	0,80	377	0,80
12	0,85	398	0,81
13	0,90	419	0,82
14	0,95	440	0,83
15	1,00	471	0,84
16	1,05	492	0,85
17	0,80	544	0,84
18	0,85	419	0,83
19	0,90	440	0,82
20	0,95	471	0,81
21	1,05	440	0,82
22	1,00	471	0,83
23	0,95	492	0,84
24	0,90	502	0,85
25	0,85	513	0,86

Задание №4

Одноцилиндровый одноступенчатый поршневой компрессор сжимает воздух от атмосферного давления $p_1 = 0.15$ МПа до требуемого давления p_2 . Определить эффективную мощность привода компрессора и необходимую мощность электродвигателя с запасом 10 % на перегрузку, если диаметр цилиндра D (м), ход поршня S (м), частота вращения вала N (об/с), относительный объем вредного пространства $\delta = 0.08$ показатель политропы расширения остающегося во вредном объеме газа m , коэффициент, учитывающий, уменьшение давления газа при всасывании. $\eta_p = 0.94$ и эффективный адиабатный КПД компрессора $\eta_{e ад.} = 0,75$. Данные для расчета принять по табл. 4.1.

Таблица 4.1

Данные к заданию №4

Вариант	P_i , МПа	D , м	S , м	N , об/с	m
1	0,95	0,10	0,10	10,00	1,35
2	1.00	0,13	0,13	8,83	1,30
3	0,95	0,15	0,15	9,17	1,35
4	0,90	0,18	0,18	9,67	1,33
5	0,85	0,20	0,20	12,00	1,37
6	0,80	0,17	0,17	11,67	1,34
7	0,80	0,15	0,15	11,33	1,37
8	0,85	0,12	0,12	10,83	1,34
9	0,90	0,10	0,10	10,00	1,35
10	0,80	0,12	0,12	10,33	1,30
11	0,75	0,15	0,15	11,33	1,35
12	0,70	0,17	0,17	11,67	1,33
13	0,65	0,15	0,15	12,00	1,37
14	0,60	0,12	0,12	12,50	1,34
15	0,75	0,10	0,10	12,00	1,35
16	0,50	0,10	0,10	6,61	1,30
17	0,55	0,12	0,12	7,00	1,31
18	0.60	0,15	0,15	7,50	1,33
19	0,65	0,17	0,17	7,92	1,32
20	0,70	0,20	0,20	8,33	1,33
21	0.60	0,12	0,15	10,33	1,35
22	0,65	0,15	0,17	11,33	1,36
23	0,70	0,17	0,20	11,67	1,37
24	0,75	0,15	0,17	12,00	1,30
25	0,80	0,12	0,15	12,50	1,31

Задание №5

Общее условие для расчета циклов ДВС

Определить параметры p (давление, бар), V (объем, м³/кг), T (температура, К), t (температура, °С) во всех характерных точках заданного цикла, во всех процессах цикла определить приведенные к 1 кг параметры q (теплота, кДж/кг); ΔU (изменение внутренней энергии, кДж/кг); Δh (изменение энтальпии, кДж/кг); l (работа, кДж/кг); ΔS (изменение энтропии, кДж/кг·К). Построить графики цикла в p - V координатах и в T - S координатах. Определить параметры цикла: термический КПД η_t , работу за цикл $l_{ц}$ (кДж/кг), среднее индикаторное давление цикла p_t (бар).

Варианты для расчета циклов двигателей.

1. В цилиндре ДВС воздух, начальные параметры которого $p_1 = 0,17$ МПа и $T_1 = 300$ К, адиабатно сжимается. Степень сжатия $\varepsilon = 10$. Затем в изохорном процессе к нему подводится 288 кДж/кг теплоты.

2. Цикл поршневого двигателя внутреннего сгорания имеет смешанный подвод теплоты. Начальное давление $p_1 = 0,12$ МПа, начальная температура $t_1 = 250^\circ\text{C}$, степень сжатия $\varepsilon = 18$, степень повышения давления 1,5, степень предварительного расширения 1,6 и показатель адиабаты $k=1,4$. Рабочее тело обладает свойствами воздуха.

3. В цикле поршневого двигателя внутреннего сгорания с подводом теплоты при $p=\text{const}$ начальное давление $p_1 = 0,12$ МПа, начальная температура $t_1 = 100^\circ\text{C}$, степень сжатия $\varepsilon = 12$, степень предварительного расширения 2,0 и показатель адиабаты $k=1,4$.

4. Процессы 1–2 и 3–4 для цикла ДВС — изохорические. В процессах 2–3 и 3–4 давление прямо пропорционально объёму. Рабочее тело — одноатомный идеальный газ (гелий). Известно, что $p_2/p_1 = V_4/V_2 = 6$, начальная температура $t_1 = 60^\circ\text{C}$, начальное давление $p_1 = 0,12$ МПа.

5. В термодинамическом цикле Дизеля степень сжатия равна 15, а степень предварительного расширения 1,5. Начальное давление $p_1 = 0,16$ МПа, начальная

температура $t_1 = 20^\circ \text{C}$. В качестве рабочего тела принять углекислый газ CO_2 . Молярная изобарная теплоёмкость углекислого газа $\mu c_{p\text{CO}_2} = 33,28 \text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$.

6. Цикл поршневого двигателя внутреннего сгорания с подводом теплоты при $v = \text{const}$. Количество отведенной теплоты $q_2 = 500 \text{ кДж}/\text{кг}$, степень сжатия $\varepsilon = 8$ и показатель адиабаты $k = 1,4$. Начальные условия соответствуют нормальным физическим условиям.

7. В цикле Отто начальные параметры $p_1 = 0,1 \text{ МПа}$, $t_1 = 15^\circ \text{C}$. Рабочее тело – воздух. К рабочему телу подводится теплота $q_1 = 1500 \text{ кДж}/\text{кг}$. Степень сжатия $\varepsilon = 12$.

8. В цикле Отто рабочему телу сообщается энергия в форме теплоты $250 \text{ кДж}/\text{кг}$. Температура начала процесса сжатия $t_1 = 27^\circ \text{C}$, давление $p_1 = 0,1 \text{ МПа}$, степень сжатия $\varepsilon = 10$. Рабочее тело – воздух. Молярная массовая теплоемкость воздуха $\mu c_p = 35,3 \text{ кДж}/(\text{кмоль К})$, а молярная масса $28,97 \text{ кг}/\text{моль}$.

9. В цикле Тринклера степень повышения давления $\lambda = 1,8$, степень предварительного расширения $\rho = 1,3$. Рабочее тело – воздух, начальные параметры которого $p_1 = 0,17 \text{ МПа}$ и $T_1 = 300 \text{ К}$, показатель адиабаты $k = 1,4$.

10. В цикле Дизеля температура в начале сжатия $t_1 = 27^\circ \text{C}$, степень сжатия $\varepsilon = 16$. Рабочее тело воздух с молярной теплоемкостью $\mu c_p = 35,3 \text{ кДж}/(\text{кмоль К})$ и молярной массой $28,97 \text{ кг}/\text{моль}$, показатель адиабаты $k = 1,4$. Объем рабочего тела в процессе подвода теплоты увеличивается в 2 раза. Максимальная температура цикла 1819 К .

11. В цикле Дизеля при степени предварительного расширения $\rho = 1,2$, термический КПД равен $0,5$. Начальное давление $p_1 = 0,12 \text{ МПа}$, начальная температура $t_1 = 250^\circ \text{C}$. Теплоёмкость рабочего тела $c_v = 0,718 \text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$, газовая постоянная $R = 287 \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$.

12. В цикле двигателя внутреннего сгорания с подводом теплоты при $V = \text{const}$ начальные параметры $p_1 = 1,04 \text{ бар}$, $t_1 = 25^\circ \text{C}$, степень сжатия $\varepsilon = 14$ и количество подведенной теплоты $2,7141 \cdot 10^6 \text{ Дж}$. Рабочее тело - воздух.

13. Цикл поршневого двигателя внутреннего сгорания со смешанным подводом теплоты. Начальное давление $p_1 = 0,12 \text{ МПа}$, начальная температура $t_1 = 25^\circ \text{C}$,

степень сжатия $\varepsilon = 18$, степень повышения давления $\lambda = 1,5$, степень предварительного расширения $\rho = 1,6$ и показатель адиабаты $k = 1,4$. Рабочее тело обладает свойствами воздуха.

14. В цикле идеального поршневого двигателя внутреннего сгорания с подводом теплоты при $p = \text{const}$ начальное давление $p_1 = 0,12$ МПа, начальная температура $t_1 = 10^\circ \text{C}$, степень сжатия $\varepsilon = 12$, степень предварительного расширения $\rho = 2,0$ и показатель адиабаты $k = 1,4$. Рабочее тело обладает свойствами воздуха.

15. В цикле Отто с подводом теплоты при $V = \text{const}$ начальные параметры $p_1 = 1,04$ бар, $t_1 = 25^\circ \text{C}$, а параметры точки 3 $p_3 = 226,95$ бар, $t_3 = 3905,1^\circ \text{C}$. Рабочее тело имеет свойства воздуха.

16. Тепловая машина работает по циклу Карно, состоящему из двух изотерм 1–2 и 3–4 и двух адиабат 2–3 и 4–1. Работа сжатия в изотермическом процессе 3–4 равна $A_{34} = 120$ кДж, а работа сжатия в адиабатическом процессе 4–1 равна $A_{41} = 250$ кДж. Давление $p_1 = 3$ МПа. Рабочее вещество – 10 молей идеального одноатомного газа (аргон). Изотермическое сжатие происходило при $T = 363$ К.

17. В цикле Карно при температуре 1800°C к 1 кг воздуха подводится 400 кДж теплоты. Термический КПД данного цикла равен 0,60. Начальное давление $p_1 = 0,15$ МПа. Рабочее тело – воздух.

18. В цикле Отто с подводом теплоты при $V = \text{const}$ начальные параметры $p_1 = 1,24$ бар, $t_1 = 35^\circ \text{C}$, а параметры точки 3 $p_3 = 286,25$ бар, $t_3 = 3815^\circ \text{C}$. Рабочее тело имеет свойства воздуха.

19. В цикле Тринклера начальные параметры $p_1 = 0,1$ МПа, $t_1 = 15^\circ \text{C}$. Рабочее тело – воздух. К рабочему телу подводится теплота $q_1 = 1500$ КДж/кг. Доля теплоты подводимой в изохорном процессе 0,7. Степень сжатия $\varepsilon = 17$. Термический к.п.д. цикла равен 0,675.

20. Рассчитать идеальный цикл ДВС со смешанным подводом теплоты. Начальные параметры рабочего тела $p_1 = 0,12$ МПа, $t_1 = 37^\circ \text{C}$, степень сжатия $\varepsilon = 12$, максимальная температура цикла $t_4 = 1700^\circ \text{C}$, температура после адиабатного расширения $t_5 = 600^\circ \text{C}$.

21. Для бескомпрессорного дизеля, работающего по циклу Тринклера с изохорно – изобарным подводом теплоты произвести расчеты цикла по заданным значениям начального давления $p_1 = 96$ кПа и температуре $t_1 = 17^\circ\text{C}$, степени сжатия $\varepsilon = 18$, степени повышения давления $\lambda = 1,5$ и степени предварительного расширения $\rho = 1,5$. Рабочим телом считать воздух, полагая теплоемкость его постоянной.

22. Рассчитать цикл ДВС с изохорным подводом теплоты (цикл Отто), если начальные параметры рабочего тела $p_1 = 0,1$ МПа, $t_1 = 20^\circ\text{C}$, степень сжатия $\varepsilon = 6,5$, а отведённое количество теплоты $q_2 = 320$ кДж/кг. Рабочее тело - воздух.

23. Тепловой двигатель по циклу ДВС с подводом тепла при постоянном объеме. При этом параметры рабочего тела последовательно изменяются в четырех процессах: 1-2 – адиабатное сжатия; 2-3 – изохорный подвод тепла; 3-4 – адиабатное расширения; 4-1 – изохорное охлаждения. Рабочее тело – воздух. Начальные параметры рабочего тела соответствуют нормальным техническим условиям. Степень сжатия $\varepsilon = 5$, количество тепла, подведенное к рабочему телу $q = 950$ кДж/кг.

24. Провести расчеты для цикла поршневого двигателя внутреннего сгорания с подводом теплоты при $v = \text{const}$: $p_1 = 0,15$ МПа; $t_1 = 120^\circ\text{C}$; $\varepsilon = 7$; $\lambda = 1,2$; $k = 1,4$. Рабочее тело - воздух. Теплоемкость считать постоянной.

25. В двигателе внутреннего сгорания с подводом теплоты при постоянном объеме давление $p_1 = 0,2$ МПа, начальная температура $t_1 = 28^\circ\text{C}$, степень сжатия $\varepsilon = 5$, степень повышения давления $\lambda = 1,2$, газовая постоянная $R = 188,9$ кДж/кг \times К, коэффициент адиабаты $k = 1,29$, теплоемкость газа считать постоянной, количество газа 1 кг.

Таблица 5.1

Молярные теплоемкости c_p и c_v для некоторых газов

при температуре 298К и давлении 1атм.

Вещество	c_p , Дж/моль	c_v , Дж/моль
Идеальный одноатомный газ	$5/2 R$	$3/2 R$
Идеальный двухатомный газ	$7/2 R$	$5/2 R$
Благородные газы (He, Ne, Ar, Kr, Xe)	20,79	12,47
Азот N_2	29,12	20,74
Кислород O_2	29,36	20,95
Углекислый газ CO_2	37,11	28,46
Водород H_2	28,82	20,44
Водяные пары H_2O	75,29	

Задание №6

По трубопроводу диаметром d и длиной $L = 20\text{м}$ протекает газ или жидкость при температуре t_1 с расходом $V = 1,6 \text{ м}^3/\text{час}$. Определить толщину теплоизоляции из заданного материала, чтобы температура наружной поверхности изоляции была не выше $t_{\text{из.н.}} = 40^\circ \text{С}$, а тепловые потери на 1 погонный метр не превышали $Q_{\text{пот}}$. Определить температуру на границе изоляция-труба и падение температуры на длине трубопровода.

Таблица 6.1

Данные к задаче №6

Вариант	Газ, жидкость	t_1 , °С	p_1 , бар	Материал трубы	$q_{\text{пот}}$, Вт/м	Диаметр трубы, мм / мм	Материал изоляции
1	Перегрет.пар	350	1,5	Сталь угл.	232	100/90	Вата асб.
2	Горяч.вода	140	0,36	Сталь нерж.	320	90/80	Стекловата
3	Насыщ.пар	200	1,1	Алюминий	640	60/50	Совелит
4	Сухой пар	160	0,6	Сталь нерж.	120	220/200	Шнур асб.
5	Перегрет.пар	320	1,0	Медь	820	80/70	Минвата
6	Горяч.вода	160	0,62	Сталь угл.	246	110/100	Шнур асб.
7	Насыщ.пар	240	1,0	Сталь нерж.	340	90/80	Стекловата
8	Сухой пар	120	0,2	Алюминий	600	60/50	Минвата
9	Перегрет.пар	280	1,5	Сталь нерж.	126	220/200	Вата асб.
10	Горяч.вода	120	0,2	Медь	860	80/70	Совелит
11	Насыщ.пар	220	0,9	Сталь угл.	220	106/86	Вата асб.
12	Сухой пар	140	0,36	Сталь нерж.	330	90/80	Стекловата
13	Перегрет.пар	360	1,5	Алюминий	660	60/50	Совелит

14	Горяч.вода	180	1,0	Сталь нерж.	140	220/200	Шнур асб.
15	Насыщ.пар	280	6,4	Медь	800	80/70	Минвата
16	Сухой пар	180	1,00	Сталь угл.	200	102/92	Вата асб.
17	Перегрет.пар	320	1,00	Сталь нерж.	300	90/80	Стекловата
18	Горяч.вода	120	0,2	Алюминий	620	60/50	Совелит
19	Насыщ.пар	220	2,32	Сталь нерж.	120	220/200	Шнур асб.
20	Сухой пар	140	0,36	Медь	940	80/70	Минвата
21	Перегрет.пар	280	1,5	Сталь нерж.	126	220/200	Вата асб.
22	Горяч.вода	120	0,2	Медь	860	80/70	Совелит
23	Насыщ.пар	220	0,9	Сталь угл.	220	106/86	Вата асб.
24	Сухой пар	140	0,36	Сталь нерж.	330	90/80	Стекловата
25	Перегрет.пар	360	1,5	Алюминий	660	60/50	Совелит

Теплопроводность материалов

Материал	λ , Вт/(м·К)
Алюминий	204
Асбест распущенный (вата)	0,087
Асбест листовой	0,116
Асбестовый шнур	0,130
Асбозурит	0,213
Асбослюда	0,208
Бетон	1,280
Бронза	64
Вата минеральная	0,052
Вермикулит	0,328
Винипласт	0,165
Глина огнеупорная	1,04
Кирпич:	
диатомовый	0,250
динасовый	0,350
красный	0,760
силикатный	0,810
шамотный	1,140
Латунь	93,00
Лед	2,220
Медь	384,0
Накипь	1,750
Ньювель	0,110
Пенопласт	0,050
Пеношамот	0,290
Пористые отложения, пропитанные нефтепродуктами	0,100
Пробковые плиты	0,038
Резина	0,160
Ржавчина	1,150
Сажа	0,090
Снег уплотненный	0,460
Совелит	0,097
Сосна поперек волокон	0,151
Сталь нержавеющая	18,00
Сталь углеродистая	45,00
Стекло обыкновенное	0,745
Стекловата	0,057
Фарфор	1,040
Чугун	63,0
Шлаковата	0,160
Шлак котельный	0,29

Задание №7

Для отопления гаража используют трубу, по которой протекает горячая вода. Рассчитать конвективный коэффициент теплоотдачи и конвективный тепловой поток от трубы к воздуху в гараже, если наружный диаметр и длина трубы соответственно равны d_n и l . Температура поверхности трубы $t_{ст}$, при этом температура воздуха в гараже должна составлять $t_в$. Данные для расчета принять по табл. 7.1, а теплофизические свойства воздуха в табл. 7.2.

Таблица 7.1

Данные к заданию №7

Вариант	d_n , м	l , м	$t_{ст}$, °С	$t_в$, °С
1	0,10	10	70	15
2	0,15	9	75	16
3	0,20	8	80	17
4	0,15	7	85	18
5	0,10	6	90	19
6	0,12	7	85	20
7	0,14	8	80	19
8	0,16	9	75	18
9	0,18	10	70	17
10	0,20	9	75	16
11	0,18	8	80	15
12	0,16	7	85	14
13	0,14	6	90	15
14	0,12	7	85	16
15	0,10	8	80	17
16	0,12	9	75	18
17	0,14	10	70	19
18	0,16	9	75	20
19	0,18	8	80	21
20	0,20	7	85	22
21	0,18	8	80	20
22	0,15	10	75	19
23	0,14	9	90	18
24	0,15	8	85	17
25	0,10	7	80	16

Теплофизические свойства воздуха

$t, ^\circ\text{C}$	$\rho, \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$	$c_p, \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$	$\lambda \cdot 10^2, \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$	$a \cdot 10^{-6}, \frac{\text{м}^2}{\text{с}}$	$\mu \cdot 10^{-6}, \text{Па} \cdot \text{с}$	$\nu \cdot 10^{-6}, \frac{\text{м}^2}{\text{с}}$	Pr
-50	1,584	1,013	2,04	17,7	14,6	9,23	0,728
-40	1,515	1,013	2,12	13,8	15,2	10,04	0,728
-30	1,453	1,013	2,2	14,9	15,7	10,80	0,723
-20	1,395	1,009	2,28	16,2	16,2	12,79	0,716
-10	1,342	1,009	2,36	17,4	16,7	12,43	0,712
0	1,293	1,005	2,44	18,8	17,2	13,28	0,707
10	1,247	1,005	2,51	20,0	17,6	14,16	0,705
20	1,205	1,005	2,59	21,4	18,1	15,06	0,703
30	1,165	1,005	2,67	22,9	18,6	16,00	0,701
40	1,128	1,005	2,76	24,3	19,1	16,96	0,699
50	1,093	1,005	2,83	25,7	19,6	17,95	0,698
60	1,060	1,005	2,90	26,2	20,1	18,97	0,696
70	1,029	1,009	2,96	28,6	20,6	20,02	0,694
80	1,000	1,009	3,05	30,2	20,1	21,09	0,692
90	0,972	1,009	3,13	31,9	21,5	22,10	0,690
100	0,946	1,009	3,21	33,6	21,9	23,13	0,688
120	0,898	1,009	3,34	36,8	22,8	25,45	0,686
140	0,854	1,013	3,49	40,3	23,7	27,80	0,684
160	0,815	1,017	3,64	43,9	24,5	30,09	0,682
180	0,779	1,022	3,78	47,5	25,3	32,49	0,681
200	0,746	1,026	3,93	51,4	26,0	34,85	0,680
250	0,674	1,038	4,27	61,0	27,4	40,61	0,677
300	0,615	1,047	4,60	71,6	29,7	48,33	0,674
350	0,566	1,059	4,91	81,9	31,4	55,46	0,676
400	0,524	1,068	5,21	93,1	33,0	63,09	0,678
500	0,456	1,093	5,74	115,3	36,2	79,38	0,687

4. МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ К ВЫПОЛНЕНИЮ ЗАДАНИЙ

4.1 Методические рекомендации к выполнению задания №1

Состав смеси задается объемными r_i , массовыми g_i и мольными долями n_i , которые определяются соответственно по следующим формулам:

$$r_1 = V_1 / V_{см}; \quad r_2 = V_2 / V_{см}; \quad r_k = V_n / V_{см},$$

$$g_1 = M_1 / M_{см}; \quad g_2 = M_2 / M_{см}; \quad g_k = M_n / M_{см},$$

$$n_1 = N_1 / N_{см}; \quad n_2 = N_2 / N_{см}; \quad n_k = N_k / N_{см}$$

где $V_1; V_2; \dots V_k; V_{см}$ – объемы компонентов и смеси;

$M_1; M_2; \dots M_k; M_{см}$ – массы компонентов и смеси;

$N_1; N_2; \dots N_k; N_{см}$ – количество вещества (кмолей) компонентов и смеси.

k – число компонентов смеси.

Сумма всех долей компонент смеси равна единице:

$$\sum g_i = 1; \quad \sum r_i = 1; \quad \sum n_i = 1$$

Молекулярная масса компонентов:

$$\mu_i = \sum A_{ri} n_{ai}, \quad \text{кг/кмоль}$$

где A_{ri} – атомная относительная масса атома в молекуле (по таблице Менделеева табл.1.2);

n_{ai} – количество атомов в молекуле.

Кажущаяся молярная масса смеси:

$$\mu_{см} = \sum (\mu_i r_i), \quad \text{кг/кмоль}$$

Соотношения массовой доли компонентов смеси с объемной и мольной долями определяются из уравнений:

$$g_i = \frac{r_i \mu_i}{\sum (r_i \mu_i)} ; \quad r_i = n_i$$

Уравнения для газовой смеси и ее компонент имеют вид:

$$p_{см} V_{см} = M_{см} R_{см} T; \quad p_{см} V_{см} = 8314 N_{см} T;$$

$$p_i V_{см} = M_i R_i T; \quad p_i V_{см} = 8314 N_i T;$$

$$p_{см} V_i = M_i R_i T; \quad p_{см} V_i = 8314 N_i T$$

где $R_{\mu} = 8314$ Дж/(кмоль·К) универсальная газовая постоянная.

Газовая постоянная заданной смеси равна:

$$R_{см} = \sum(R_i g_i) \quad \text{или} \quad R_{см} = \frac{8314}{\sum(\mu_i r_i)} = \frac{8314}{\mu_{см}}$$

Кажущаяся молярная масса смеси $\mu_{см}$:

$$\mu_{см} = \frac{8314}{\sum(R_i g_i)} ; \quad \mu_{см} = \frac{8314}{R_{см}}$$

Связь между удельными массовой, мольной и объемной теплоемкостями:

$$c = \mu c / \mu = c' / \rho_0, \quad \text{а также} \quad c'_{см} = \frac{\mu c_{см}}{22,4}$$

Удельные массовые, мольные и объемные теплоемкости газовой смеси (при $p = \text{const}$ и $v = \text{const}$) :

$$c_{см} = \sum(c_i g_i); \quad \mu c_{см} = \sum(\mu c_i r_i); \quad c'_{см} = \sum(c'_i r_i)$$

Между изобарными и изохорными теплоемкостями существует зависимость называемая уравнением Майера:

$$c_p - c_v = R,$$

$$\mu c_p - \mu c_v = 8314,$$

где R – индивидуальная газовая постоянная в Дж/(кмоль·К) .

4.2 Методические рекомендации к выполнению задания №2

Изобарная и изохорная теплоемкость связаны уравнением Майера:

$$c_p - c_v = R$$

$$\mu c_p - \mu c_v = 8,314,$$

где R – индивидуальная газовая постоянная в Дж/(моль·К) ;

$R_\mu = 8,314$ Дж/(моль·К) универсальная газовая постоянная.

Связь между удельными массовой и мольной теплоемкостями:

$$c_v = \mu c_v / \mu = (\mu c_p - 8,314) / \mu,$$

где μ - молекулярная масса заданного вещества (определяется при использовании таблицы Менделеева табл.1.2)

Аналитическое выражение для массовой истинной изохорной теплоемкости:

$$c_v = a + b T$$

Средняя изохорная массовая теплоемкость:

$$c_v \text{ ср} = a + b (T_1 + T_2)/2$$

Количество подводимой теплоты (при $v = \text{const}$):

$$q = c_v \text{ ср} (T_2 - T_1)$$

С учетом выражения для средней изохорной массовой теплоемкости:

$$q = (a + b (T_1 + T_2)/2) (T_2 - T_1)$$

Решение выражения (преобразовать в квадратное уравнение) позволяет определить температуру T_2 .

Для определения температуры T_2^* при условии $c = \text{const}$, необходимо определить $c_v = a + b T$ при исходной температуре T_1 и подставить c_v в выражение для количества подводимой теплоты:

$$q = c_v (T_2^* - T_1)$$

Давление в обоих случаях определяется по закону Шарля для идеального газа:

$$T_2 / T_1 = p_2 / p_1$$

Погрешность в определении значений температур и давлений в % равна:

$$\Delta_T = |T_2^* - T_2| / T_2^* \cdot 100 ; \quad \Delta_p = |p_2^* - p_2| / p_2^* \cdot 100$$

4.3 Методические рекомендации к выполнению задания №3

Рабочий объем цилиндра двигателя V_h определяется из выражения:

$$V_h = A \cdot S = \pi D^2 / 4 \cdot S,$$

где A – площадь сечения цилиндра, m^2 ;

D – диаметр цилиндра, m ;

S – ход поршня, m .

Частота вращения коленчатого вала двигателя в об/с:

$$n = \omega / 2\pi,$$

где ω – угловая скорость вращения коленчатого вала, $рад/с$

Индикаторная мощность двигателя в кВт определяется из выражения:

$$N_i = \frac{2P_i V_h n i}{10^3 \tau},$$

где P_i – среднее индикаторное давление двигателя, $Па$;

i – число цилиндров двигателя ($i = 4$)

τ – тактность двигателя (четырёхтактный $\tau = 4$)

Эффективная мощность двигателя в кВт:

$$N_e = N_i \cdot \eta_m$$

Литровая мощность двигателя в кВт/м³:

$$N_l = \frac{N_e}{i V_h}$$

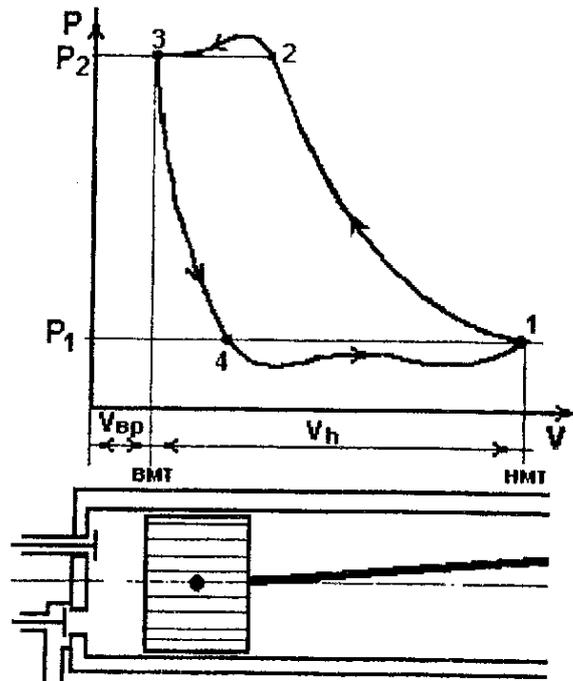
Удельный индикаторный расход топлива двигателя в кг/кВт·час:

$$g_i = \frac{3600 B}{N_i},$$

где B – удельный расход топлива двигателя, $кг/с$.

4.4 Методические рекомендации к выполнению задания №4

Примерный цикл реального компрессора приведен на рисунке 4.1.



НМТ – нижняя мертвая точка; ВМТ – верхняя мертвая точка;

V_h – рабочий объем; V_{вр} – вредный объем

Рисунок 4.1 – Цикл реального поршневого компрессора

Вредный объем компрессора обычно составляет $V_{вр} = (0,04-0,10) V_h$.

Относительный вредный объем компрессора $\delta = V_{вр} / V_h$

Степень повышения давления в компрессоре при сжатии газа:

$$\lambda = p_2 / p_1$$

С учетом обозначения относительного вредного объема компрессора δ выражение для объемного КПД компрессора имеет вид:

$$\eta_{об} = 1 - \delta (\lambda^{1/m} - 1),$$

где m – показатель политропы расширения 1 - 2.

Объемный КПД (коэффициент подачи) компрессора с учетом уменьшения реального давления при всасывании:

$$\eta_v = \eta_{об} \eta_p$$

Действительная объемная производительность (подача) компрессора:

$$V = i n V_h \eta_v,$$

где V_h – рабочий объем цилиндра компрессора, m^3 ;

i – число цилиндров (ступеней) компрессора;

n – частота вращения вала, s^{-1}

Теоретическая мощность привода компрессора соответствует удельной работе по сжатию газа, которая при адиабатном процессе сжатия равна:

$$N_{ад} = l_k = \frac{k}{k-1} RT_1 (\lambda^{\frac{k-1}{k}} - 1) = \frac{k}{k-1} p_1 V (\lambda^{\frac{k-1}{k}} - 1)$$

Эффективная мощность на валу компрессора с учетом потерь на трение находится по формуле:

$$N_e = N_{ад} / \eta_{е.ад}$$

Необходимая мощность электродвигателя для работы компрессора рассчитывается с учетом перегрузки на валу при включении в электросеть:

$$N_{эд} = b N_e ,$$

где b – коэффициент запаса мощности электродвигателя на перегрузку на валу компрессора.

4.5 Методические рекомендации к выполнению задания №5

4.5.1 Общие виды циклов тепловых машин

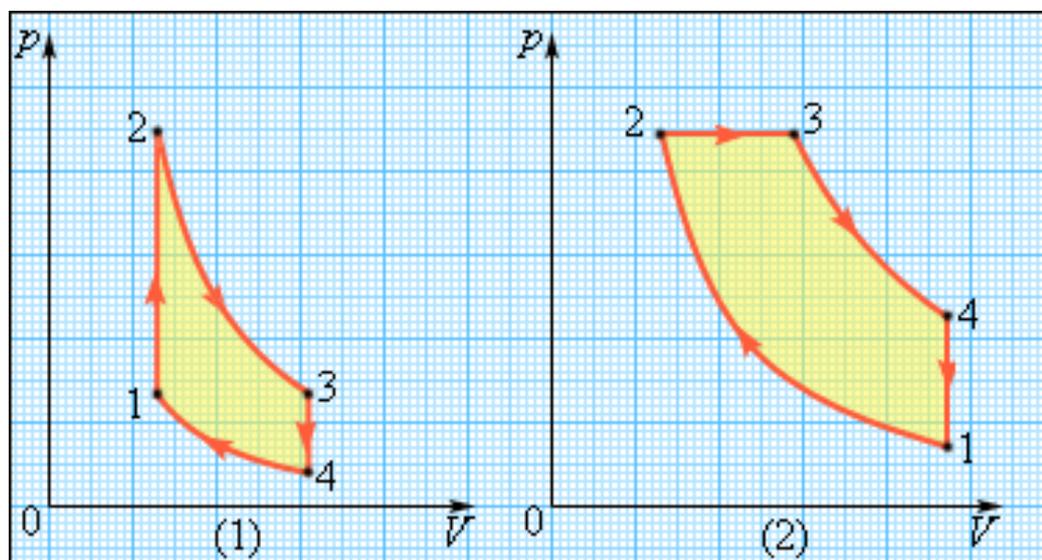
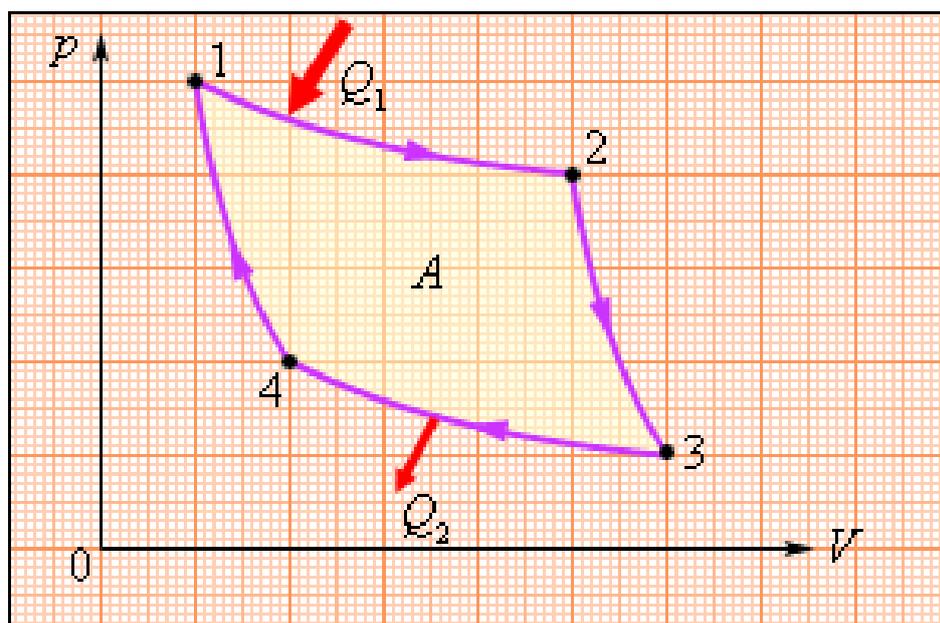


Рисунок 5.1 – Циклы работы тепловых машин:

1 - при изохорном подводе теплоты;

2 - при изобарном подводе теплоты.



4.5.2 Виды циклов работы двигателей внутреннего сгорания

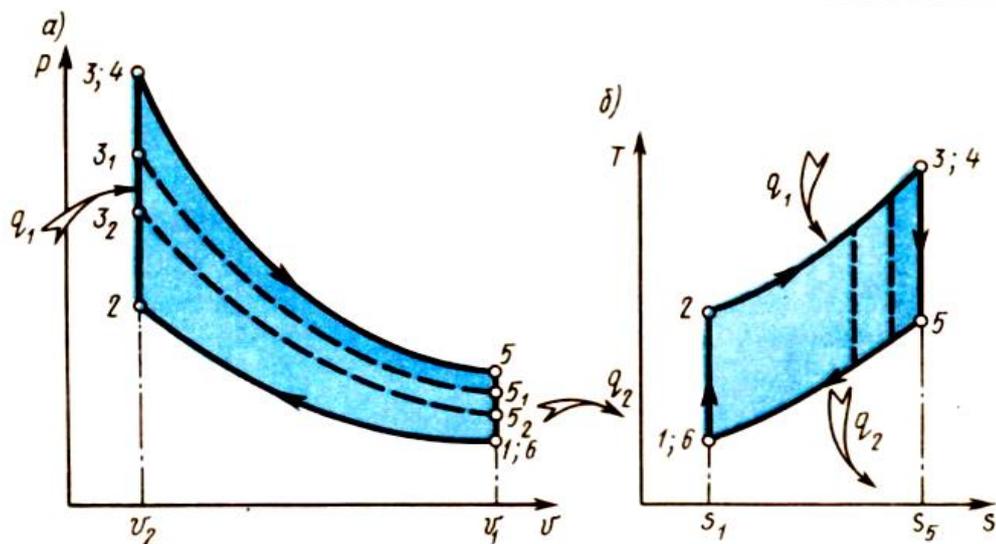


Рисунок 5.3 – Цикл Отто (при $V = \text{const}$)

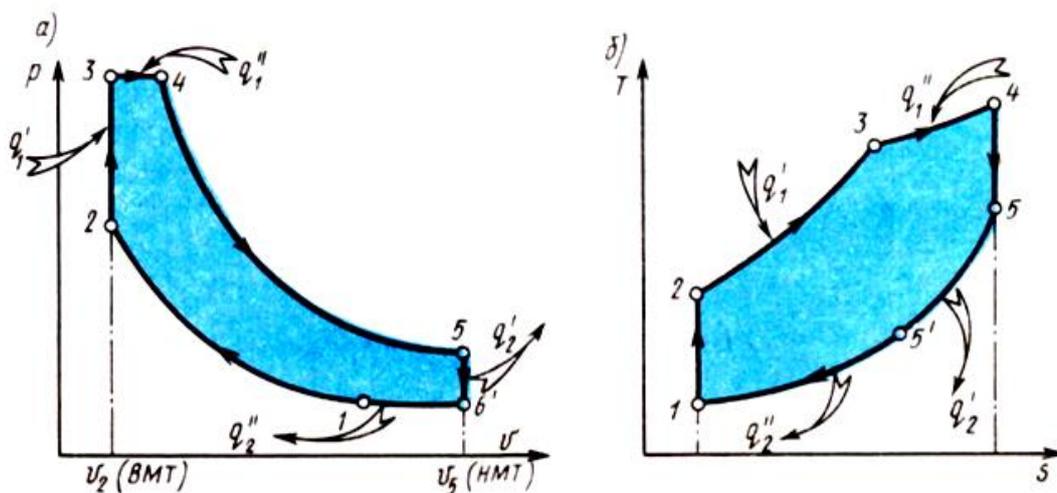


Рисунок 5.4 – Цикл Сабатэ-Тринклера

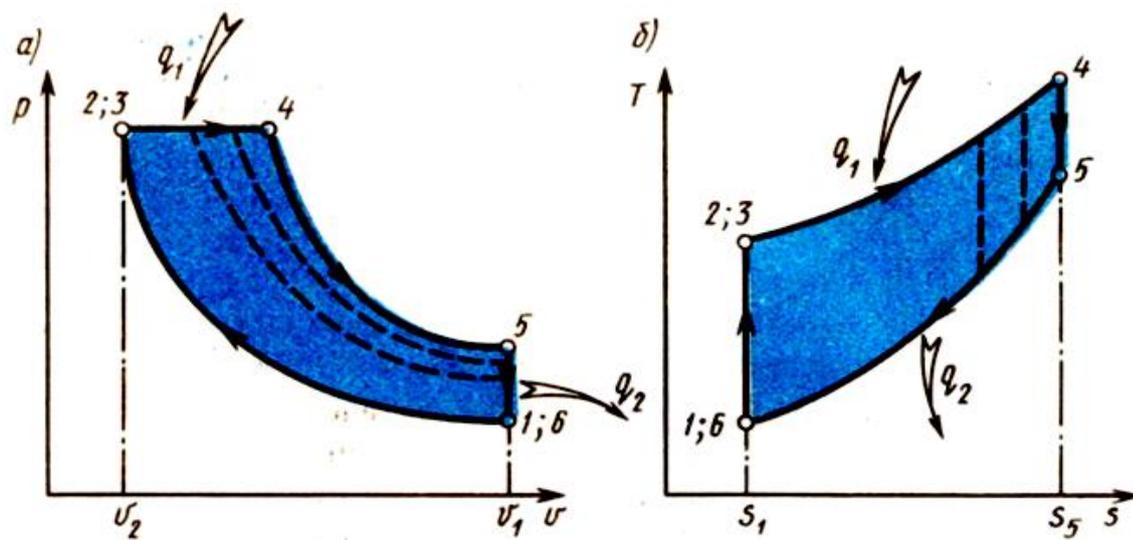


Рисунок 5.5 – Цикл Дизеля (при $p = \text{const}$)

4.5.3 Основные зависимости к выполнению задания №5

Основные характеристики любого цикла теплового двигателя (ДВС):

- *степень сжатия* (отношение удельных объемов рабочего тела в начале и конце сжатия)

$$\varepsilon = v_1 / v_2$$

- *степень повышения давления* (отношение давлений в конце и в начале изохорного процесса подвода теплоты)

$$\lambda = p_3 / p_2$$

- *степень предварительного расширения* или степень изобарного расширения (отношение удельных объемов в конце и в начале изохорного процесса подвода теплоты)

$$\rho = v_3 / v_2$$

Уравнение связи индивидуальной газовой постоянной **R** и универсальной газовой постоянной **R_μ** имеет вид:

$$R = \frac{R_{\mu}}{\mu} = \frac{8314}{\mu},$$

где **μ** – молярная (молекулярная) масса газа (определяется с использованием таблицы Менделеева табл.1.2), кг/кмоль;

R_μ – универсальная газовая постоянная, Дж/(кмоль·К).

Уравнение Клапейрона имеет вид:

$$\text{для 1 кг массы газа} \quad p v = RT,$$

$$\text{для M кг массы газа} \quad p v = RMT,$$

Связь между массовой **c** и молярной теплоемкостями **μc**:

$$c = \mu c / \mu$$

Изобарная и изохорная теплоемкости взаимосвязаны уравнением Майера:

$$c_p - c_v = R$$

$$\mu c_p - \mu c_v = 8314$$

Отношение теплоемкостей является показателем адиабаты $k = \frac{c_p}{c_v} = \frac{\mu c_p}{\mu c_v}$.

c_p и **c_v** определяются по справочным данным для заданного рабочего тела.

Основные зависимости для термодинамических процессов, составляющих циклы тепловых машин:

1) Изохорный процесс $V = \text{const}$

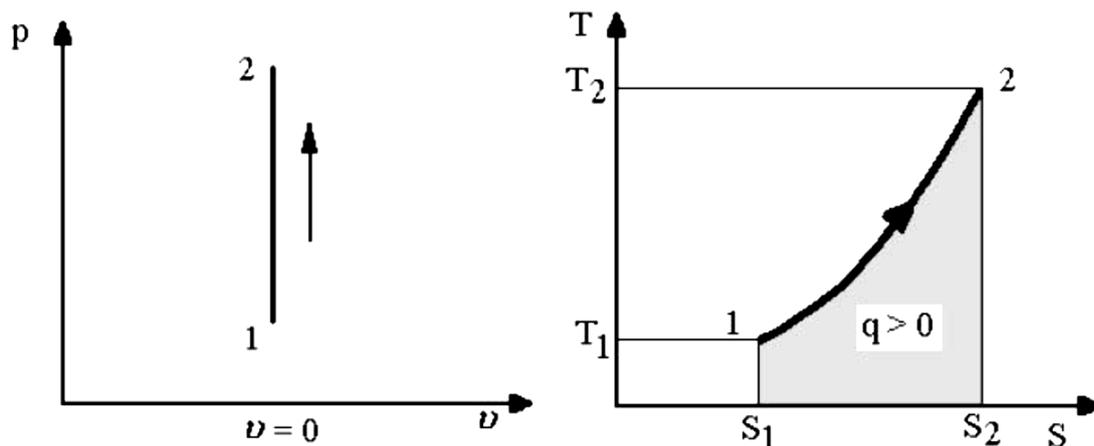


Рисунок 5.6 – Изохорный процесс в $p - V$ и $T - s$ диаграммах

Соотношение между основными параметрами состояния в начале и в конце процесса устанавливается с помощью *закона Шарля*:

$$\frac{p_2}{p_1} = \frac{T_2}{T_1}$$

Работа в изохорном процессе: $l = 0$

Количество теплоты, подведенное к рабочему телу:

$$q = c_v(T_2 - T_1) \text{ при } c_v = \text{const}$$

Первый закон термодинамики и изменение внутренней энергии:

$$q = u_2 - u_1 = \Delta u = c_v(T_2 - T_1)$$

Изменение энтальпии рабочего тела:

$$\Delta h = h_2 - h_1 = c_p(T_2 - T_1)$$

Изменение энтропии в термодинамическом процессе:

$$\Delta s_v = c_v \ln \frac{T_2}{T_1} = c_v \ln \frac{p_2}{p_1}$$

2) Изобарный процесс $p = \text{const}$

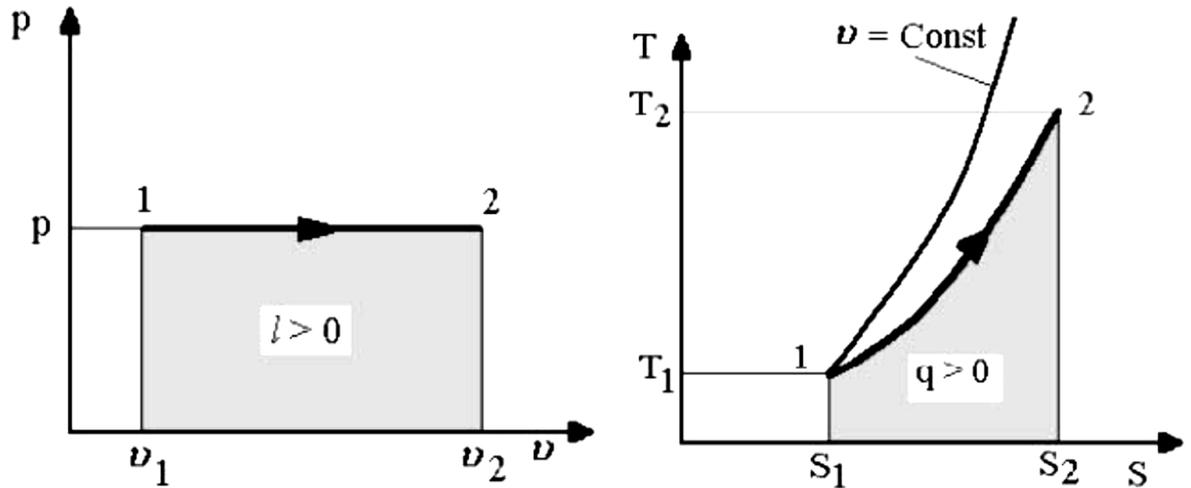


Рисунок 5.7 – Изобарный процесс в $p - V$ и $T - s$ диаграммах

Соотношение между основными параметрами состояния в начале и в конце процесса устанавливается с помощью *закона Гей-Люсака*:

$$\frac{v_2}{v_1} = \frac{T_2}{T_1}$$

Работа по изменению объема газа в изобарном процессе:

$$l = p(v_2 - v_1) = R(T_2 - T_1)$$

Первый закон термодинамики для изобарного процесса:

$$q = u_2 - u_1 + l = \Delta u + p(v_2 - v_1)$$

или через энтальпию:

$$q = h_2 - h_1$$

Подводимая теплота в процессе и изменение энтальпии равны:

$$q = h_2 - h_1 = c_p (T_2 - T_1)$$

Изменение внутренней энергии системы

$$\Delta u = u_2 - u_1 = c_v (T_2 - T_1)$$

Изменение энтропии:

$$\Delta s = s_2 - s_1 = c_p \ln(T_2 / T_1) = c_p \ln(v_2 / v_1)$$

3) Изотермический процесс $T = \text{const}$

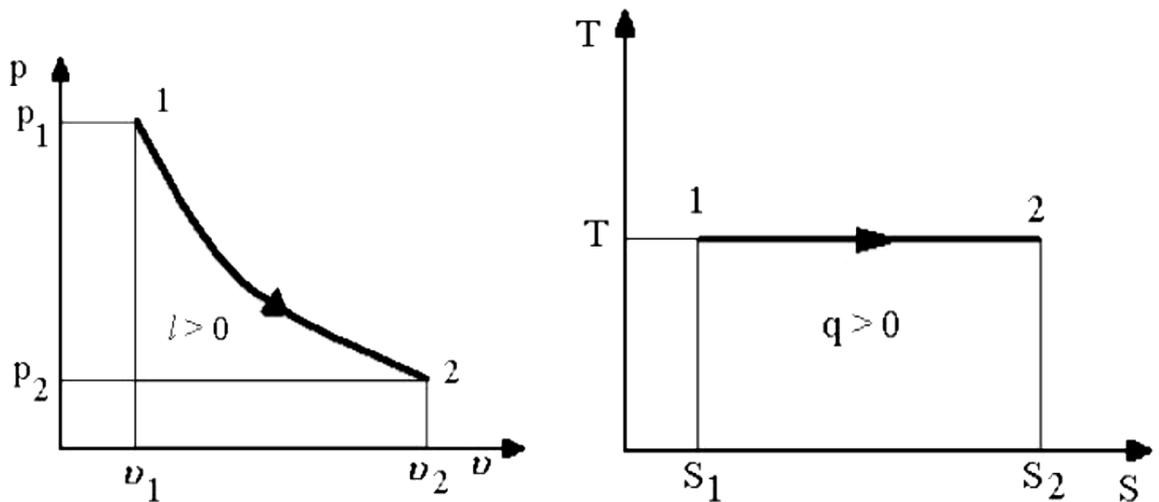


Рисунок 5.8 – Изотермический процесс в $p - V$ и $T - s$ диаграммах

Соотношение между основными параметрами состояния в начале и в конце процесса устанавливается с помощью *закона Бойля-Мариотта*:

$$p_1 v_1 = p_2 v_2$$

Работа в изотермическом процессе:

$$l = RT \ln \frac{v_2}{v_1} = RT \ln \frac{p_1}{p_2}$$

Изменение внутренней энергии:

$$\Delta u = u_2 - u_1 = c_v (T_2 - T_1) = 0$$

Первый закон термодинамики для изотермического процесса:

$$q = u_2 - u_1 + l = l = RT \ln \frac{v_2}{v_1}$$

Изменение энтропии:

$$\Delta s = s_2 - s_1 = R \ln(p_1/p_2) = R \ln(v_2/v_1)$$

Изменение энтальпии процесса:

$$h_2 - h_1 = c_p (T_2 - T_1) = 0$$

4) Адиабатный процесс, протекающий без теплообмена $q = 0$

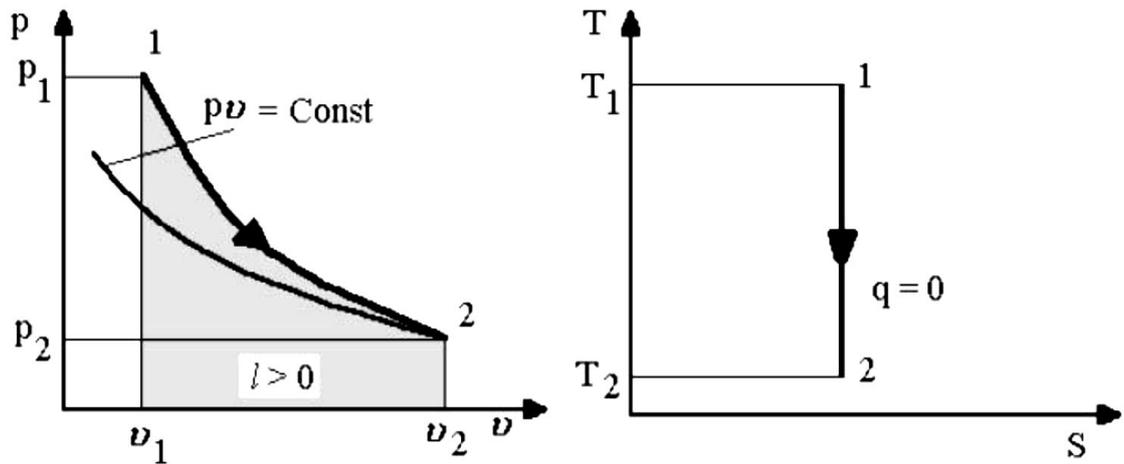


Рисунок 5.9 – Адиабатный процесс в $p - V$ и $T - s$ диаграммах

Соотношение между основными параметрами состояния в начале и в конце процесса устанавливается с помощью *уравнения Пуассона*:

$$p_1 v_1^k = p_2 v_2^k$$

Другие уравнения адиабатного процесса относительно T , p и v

$$T_2 / T_1 = (v_1 / v_2)^{k-1}$$

$$T_2 / T_1 = (p_2 / p_1)^{\frac{k-1}{k}}$$

Изменение энтропии равно:

$$\Delta s = \frac{\delta q}{T} = 0, \quad \text{а } s = \text{const}$$

Первый закон термодинамики для адиабатного процесса в закрытой системе выражается уравнением:

$$q = u_2 - u_1 + l = \Delta u + l = 0 \quad \text{или} \quad \Delta u = u_2 - u_1 = -l$$

Работа в адиабатном процессе:

$$l = u_1 - u_2 = c_v (T_1 - T_2)$$

или

$$l = (R/(k-1)) (T_1 - T_2)$$

Изменение энтальпии:

$$\Delta h = (h_1 - h_2) = c_p (T_1 - T_2)$$

Общие выражения для определения основных характеристик цикла двигателя внутреннего сгорания:

1) Термический КПД η_t

$$\eta_t = l_{ц} / q_1 = 1 - q_2 / q_1$$

2) Работа за цикл $l_{ц}$

$$l_{ц} = q_1 - q_2$$

3) Среднее индикаторное давление цикла p_t

$$p_t = l_{ц} / (V_{\max} - V_{\min}),$$

где V_{\max} и V_{\min} - в ДВС соответствуют положению поршня в цилиндре в НМТ (нижней мертвой точке) и ВМТ (верхней мертвой точке) соответственно.

4.5.4 Пример выполнения задания №5

Тепловая машина работает по циклу, приведенному на графике в p - V координатах. Рабочим телом в цилиндре тепловой машины является воздух массой 1 кг. Его теплоёмкость $c_p=1,005$ кДж/кг·К $c_v=0,718$ кДж/кг·К. Начальный объём рабочего тела $V_1=1,1$ м³/кг, начальная температура $t_1=80$ °С. Степень сжатия рабочего тела в цилиндре $\varepsilon = 14$. В процессе 2-3 рабочему телу сообщается 840 кДж/кг тепловой энергии. Рассчитать все параметры цикла согласно общему заданию к задаче №6.

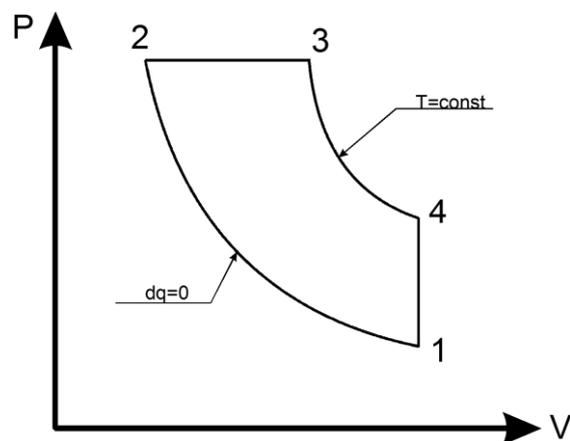


Рисунок 5.10 – Схема исходного цикла тепловой машины

Дано: $V_1=1,1$ м³/кг ; $t_1=80$ °С ; $\varepsilon =V_1/V_2=14$; $q_{2-3}=840$ кДж/кг.

Часть 1.

Состав цикла по характерным термодинамическим процессам и их уравнения:

Процесс 1-2: адиабатный $p_1 V_1^k = p_2 V_2^k$

Процесс 2-3: изобарный $V_2/V_3 = T_2/T_3$

Процесс 3-4: изотермический $V_3/V_4 = p_4/p_3$

Процесс 4-1: изохорный $p_4/p_1 = T_4/T_1$

Для рабочего тела – воздух: $c_p = 1,005$ кДж/кг·К; $c_v = 0,718$ кДж/кг·К;

$k = c_p/c_v = 1,4$; $\mu = 28,95$ кг/кмоль; $R = R_\mu/\mu = 8314/28,95 = 287,2$ кДж/кг·К

Из схемы заданного цикла: $V_1 = V_4$; $p_2 = p_3$; $T_3 = T_4$

Расчет основных термодинамических параметров в каждой точке цикла.

Из уравнения Клапейрона для точки 1:

$$p_1 V_1 = RT_1 \quad \rightarrow \quad p_1 = RT_1/V_1 = 287,2 \cdot 353 / 1,1 \cdot 10^5 = 0,92 \text{ бар};$$

Учитывая заданную степень сжатия рабочего тела, имеем

$$V_1/V_2 = 14 \quad \rightarrow \quad V_2 = V_1/14 = 1,1/14 = 0,0785 \text{ м}^3/\text{кг};$$

Из уравнения адиабатного процесса 1 – 2:

$$p_1 V_1^k = p_2 V_2^k \quad \rightarrow \quad p_2 = p_1 V_1^k / V_2^k = p_1 (V_1/V_2)^k = 0,92 (1,1/0,0785)^{1,4} = 37,061 \text{ бар}$$

Из уравнения Клапейрона для точки 2:

$$p_2 V_2 = RT_2 \quad \rightarrow \quad T_2 = p_2 V_2 / R = 37,061 \cdot 0,0785 \cdot 10^5 / 287,2 = 1012,98 \text{ К}$$

Из уравнения для определения количества теплоты сообщенного рабочему телу в процессе 2 – 3:

$$q_{2-3} = c_p (T_3 - T_2) \quad \rightarrow \quad q_{2-3} = c_p T_3 - c_p T_2 \quad \rightarrow \quad c_p T_3 = q_{2-3} + c_p T_2 \quad \rightarrow$$

$$T_3 = (q_{2-3} + c_p T_2) / c_p = (840 + 1,005 \cdot 1012,98) / 1,005 = 1848,8 \text{ К}$$

Из уравнения Клапейрона для точки 3:

$$p_3 V_3 = RT_3 \quad \rightarrow \quad V_3 = RT_3 / p_3 = 287,2 \cdot 1848,8 / 37,061 \cdot 10^5 = 0,14 \text{ м}^3/\text{кг}$$

Из уравнения Клапейрона для точки 4:

$$p_4 V_4 = RT_4 \quad \rightarrow \quad p_4 = RT_4 / V_4 = 287,2 \cdot 1848,8 / 1,1 \cdot 10^5 = 4,83 \text{ бар}$$

Сводная таблица расчетных значений термодинамических параметров цикла

№ точки	p, бар	V, м ³ /кг	T, К	t, °С
1	0,92	1,1	353	80
2	37,061	0,0785	1012,98	739,98
3	37,061	0,14	1848,8	1575,8
4	4,83	1,1	1848,8	1575,8

ЧАСТЬ 2Определение основных термодинамических функций процессов цикла*Процесс 1-2:*

$$\Delta U = c_v \cdot (T_2 - T_1) = 0,718 (1012,98 - 353) = 473,86 \text{ кДж/кг}$$

$$\Delta h = c_p \cdot (T_2 - T_1) = 1,005 \cdot (1012,98 - 353) = 663,28 \text{ кДж/кг}$$

$$l = (R \cdot T_1 / \kappa - 1) \cdot (1 - T_2 / T_1) = (287,2 \cdot 353 / 1,4 - 1) \cdot (1 - 1012,98 / 353) = -473,86 \text{ кДж/кг}$$

Процесс 2-3:

$$q = c_p \cdot (T_3 - T_2) = 1,005 \cdot (1848,8 - 1012,98) = 840 \text{ кДж/кг}$$

$$\Delta U = c_v \cdot (T_3 - T_2) = 0,718 \cdot (1848,8 - 1012,98) = 600,12 \text{ кДж/кг}$$

$$\Delta h = 840 \text{ кДж/кг}$$

$$l = p_2 \cdot (V_3 - V_2) = 37,061 \cdot 10^5 \cdot (0,14 - 0,0785) = 228,06 \text{ кДж/кг}$$

$$\Delta S = c_p \cdot \ln T_3 / T_2 = 1,005 \cdot \ln 1848,8 / 1012,98 = 0,61 \text{ кДж/ кг} \cdot \text{К}$$

Процесс 3-4:

$$q = p_3 \cdot V_3 \cdot \ln V_4 / V_3 = 1069,62 \text{ кДж/кг}$$

$$l = q$$

$$\Delta S = q / T_3 = 1069,62 / 1848,8 = 0,58 \text{ кДж/ кг} \cdot \text{К}$$

Процесс 4-1:

$$q = c_v \cdot (T_1 - T_4) = -1073,98 \text{ кДж/кг}$$

$$\Delta U = q$$

$$\Delta h = c_p \cdot (T_1 - T_4) = -1503,31 \text{ кДж/кг}$$

$$\Delta S = c_v \cdot \ln T_1 / T_4 = -1,19 \text{ кДж/кг} \cdot \text{К}$$

Таблица 5.2

Сводная таблица расчетных значений термодинамических функций цикла

Процесс	q, кДж/кг	ΔU , кДж/кг	Δh , кДж/кг	l, кДж/кг	ΔS , кДж/кг·К
1-2	0	473,86	663,28	-473,8	0
2-3	840	600,12	840	228,06	0,61
3-4	1069,62	0	0	1069,62	0,58
4-1	-1073,98	-1073,98	-1503,31	0	-1,19
Σ	835,64	0	-0,03	823,88	0

ЧАСТЬ 3

Построение графика цикла в P-V координатах.

Расчет промежуточных точек для построения графика цикла (не менее 2-3).

Процесс 1-2:

$$P_1 V_1^k = P_2 V_2^k$$

$$P_1 V_1^k = P_x V_x^k$$

$$P_x = P_1 \cdot V_1^k / V_x^k$$

$$P_x = 1,051 / V_x^k$$

при $V_x = 0,5 \text{ м}^3/\text{кг}$ $P_x = 2,77 \text{ бар}$

при $V_x = 0,1 \text{ м}^3/\text{кг}$ $P_x = 26,41 \text{ бар}$

при $V_x = 0,2 \text{ м}^3/\text{кг}$ $P_x = 10 \text{ бар}$

Процесс 3-4:

$$P_3 V_3^k = P_4 V_4^k$$

$$P_3 V_3^k = P_x V_x^k$$

$$P_x = P_3 \cdot V_3^k / V_x^k$$

$$P_x = 2,36 / V_x^k$$

при $V_x = 0,5 \text{ м}^3/\text{кг}$ $P_x = 6,22 \text{ бар}$

при $V_x = 1,1 \text{ м}^3/\text{кг}$ $P_x = 2,06 \text{ бар}$

при $V_x = 0,2 \text{ м}^3/\text{кг}$ $P_x = 22,52 \text{ бар}$

Производится построение графика в p - V координатах по расчетным данным в выбранном масштабе координатных осей на отдельном листе А4. Пример приведен на рис. 5.11.

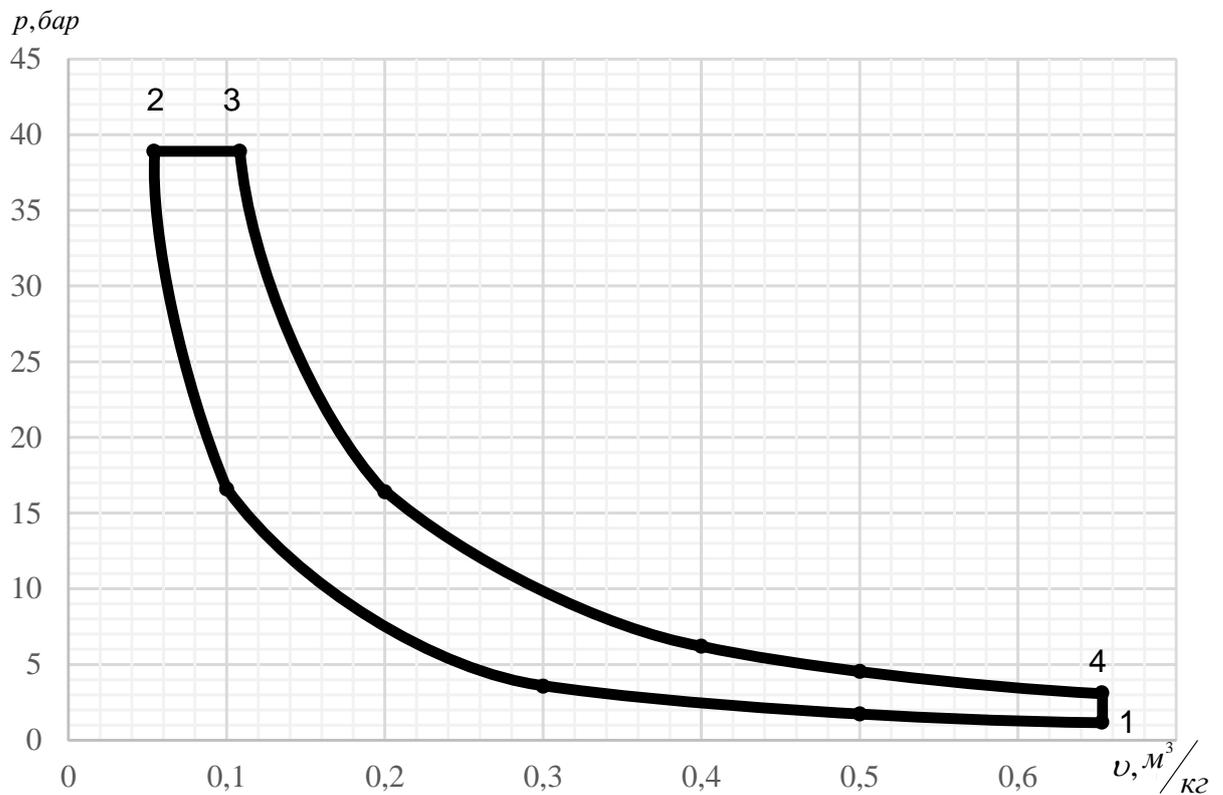


Рисунок 5.11 – Пример построения графика цикла в p – V координатах.

ЧАСТЬ 4

Построение графика цикла в T-S координатах.

Расчет промежуточных точек для построения графика цикла (не менее 2-3).

Процесс 2-3:

$$\Delta S_{2x} = c_p \cdot \ln T_x / T_3$$

$$\text{при } T_x = 1200 \text{ К} \quad \Delta S_{2x} = 0,17 \text{ кДж/кг} \cdot \text{К}$$

$$\text{при } T_x = 1400 \text{ К} \quad \Delta S_{2x} = 0,32 \text{ кДж/кг} \cdot \text{К}$$

$$\text{при } T_x = 1600 \text{ К} \quad \Delta S_{2x} = 0,45 \text{ кДж/кг} \cdot \text{К}$$

Процесс 4-1:

$$\Delta S_{4x} = c_v \cdot \ln T_x / T_4$$

$$\text{при } T_x = 1800 \text{ К} \quad \Delta S_{4x} = 1,17 \text{ кДж/кг} \cdot \text{К}$$

$$\text{при } T_x = 400 \text{ К} \quad \Delta S_{4x} = 0,51 \text{ кДж/кг} \cdot \text{К}$$

Далее проводится расчет S_1 (точка цикла 1) для нормальных физических условий. Пример расчета для воздушной смеси:

$$S_1 = c_p \ln(T_1/T_0) - R \ln(p_1/p_0),$$

где T_0 и p_0 - нормальная температура и давление,

для воздушной смеси 273К и $1.013 \cdot 10^5$ Па

В случае получения минимального отрицательного числа энтропии S_1 полученное расчетное число округляется до нуля.

По расчетным значениям изменения энтропии производится расчет значений энтропии как в основных точках, так и в промежуточных точках по выражениям:

$$S_2 = S_1 + \Delta S_{1-2}; \quad S_3 = S_2 + \Delta S_{2-3} \text{ и так далее для каждой точки цикла}$$

$$S_{2x} = S_2 + \Delta S_{2x} \text{ для промежуточных точек процесса 2-3}$$

$$S_{4x} = S_4 + \Delta S_{4x} \text{ для промежуточных точек процесса 4-1}$$

Производится построение графика в T-S координатах по расчетным данным в выбранном масштабе координатных осей. Пример построения приведен на рис. 5.12.

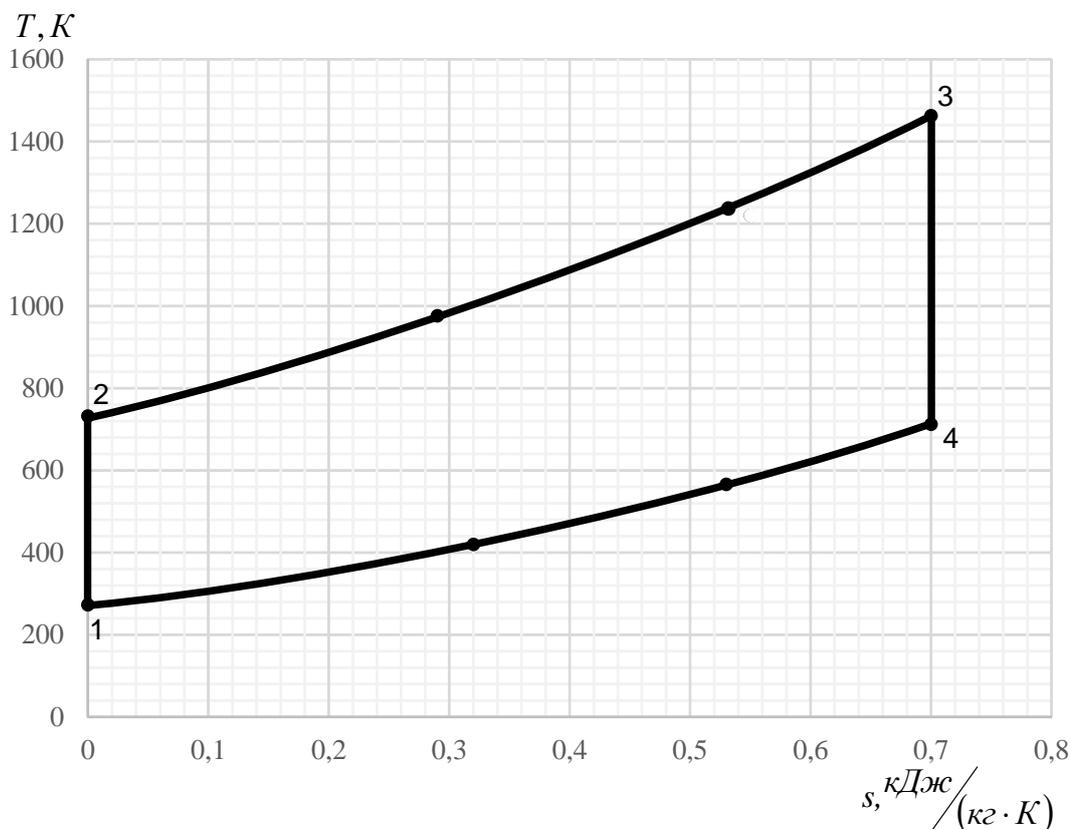


Рисунок 5.12 – Пример построения графика цикла в T – S координатах.

ЧАСТЬ 5

Определение основных характеристик цикла.

1. Термический КПД (η_t)

$$\eta_t = l_{ц} / q_1 = 1 - q_2 / (q_1 + q_3) = 1 - q_{4-1} / (q_{2-3} + q_{3-4}) = 0,608 = 60,8\%$$

2. Работа за цикл $l_{ц}$ (кДж/кг)

$$l_{ц} = q_1 + q_3 - q_2 = q_{2-3} + q_{3-4} - q_{4-1} = 835,64 \text{ кДж/кг}$$

3. Среднее индикаторное давление цикла P_t

$$p_t = l_{ц} / (V_{\max} - V_{\min}) = 835,64 / (1,1 - 0,0785) = 818,05 \text{ кДж кг/кг м}^3 = \\ = 818050 \text{ Дж/м}^3 = 818050 \text{ кг} \cdot \text{м}^2 / \text{с}^2 \cdot \text{м}^3 = 818050 \text{ кг/с}^2 \cdot \text{м} = 818050 \text{ Па} = 8,18 \text{ бар}$$

4.6 Методические рекомендации к выполнению задания № 6

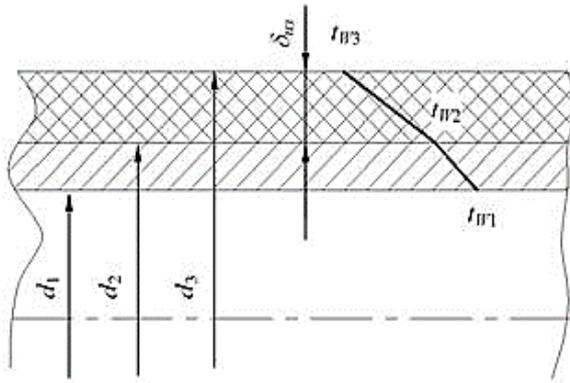


Рисунок 6.1 – Цилиндрическая труба с наружной изоляцией

Выражение для определения изменения температуры между границами наружного и внутреннего слоев цилиндрической стенки (труба со слоем изоляции рис.6.1) находится исходя из решения уравнения теплопроводности:

$$t_{w1} - t_{w3} = \frac{Q}{2\pi l} \left(\frac{1}{\lambda_1} \ln \frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{\lambda_2} \ln \frac{d_3}{d_2} \right)$$

Величина теплового потока через многослойный (трехслойный) цилиндр определяется выражением:

$$Q = \frac{2\pi l(t_{w1} - t_{w3})}{\frac{1}{\lambda_1} \ln \frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{\lambda_2} \ln \frac{d_3}{d_2}} = \frac{2\pi l(t_{w1} - t_{w3})}{R},$$

где λ - коэффициент теплопроводности трубы и изоляции, Вт/(м·К)

d_i - диаметры внутренних и наружных поверхностей слоев, м

l - длина цилиндра(трубы), м

R - термическое сопротивление, м²К/Вт.

Тепловые потери на 1 пог.метр трубопровода: $q_l = Q / l$

Диаметр наружной поверхности слоя изоляции:

$$d_3 = d_2 + 2\delta_{из}$$

Откуда

$$\delta_{из} = (d_3 - d_2) / 2$$

То есть, задача определения толщины изоляции сводиться к определению наружного диаметра поверхности слоя изоляции d_3 .

Изменение температуры между внутренней и наружной стенкой трубы находится исходя из решения уравнения теплопроводности для толщины трубы:

$$t_{w2} - t_{w1} = -\frac{q_l}{2\pi \lambda_1} \ln \frac{d_2}{d_1}$$

Температура на поверхности раздела изоляция-труба определится как температура внешней стенки цилиндрической трубы:

$$t_{w2} = t_{w1} - \frac{q_l}{2\pi \lambda_1} \ln \frac{d_2}{d_1}$$

Падение температуры при течении теплоносителя (вода или газ) по трубе определится из выражения:

$$Q_{\text{пот}} = G c \Delta t ,$$

где $G = V \rho$ – массовый расход теплоносителя при движении по трубе, кг/с;

V – объемный расход теплоносителя при движении по трубе, м³/с;

ρ – плотность теплоносителя, кг/м³;

c – удельная теплоемкость теплоносителя, Дж/кг град;

$Q_{\text{пот}} = q_l L$ – общие тепловые потери на всей длине трубопровода, Дж.

С учетом последнего выражения падение температуры на заданной длине трубопровода составляет:

$$\Delta t = q_l L / V \rho c$$

Толщина изоляции трубы для снижения тепловых потерь до требуемого значения определится из выражения:

$$\delta_{\text{из}} = (d_3 - d_2) / 2 .$$

4.7 Методические рекомендации и пример выполнения задания №7

Цель задания - практическое закрепление теоретического материала по разделу конвективный теплообмен.

Конвекция - это перенос теплоты при перемещении и перемешивании всей массы неравномерно нагретых жидкости или газа, то есть частицы какой-нибудь среды изменяют свое положение в пространстве и при этом передают теплоту от более нагретых объемов к менее нагретым.

Это явление имеет место в жидкостях и газах и всегда сопровождается теплопроводностью. Одновременный перенос теплоты конвекцией и теплопроводностью называется конвективным теплообменом.

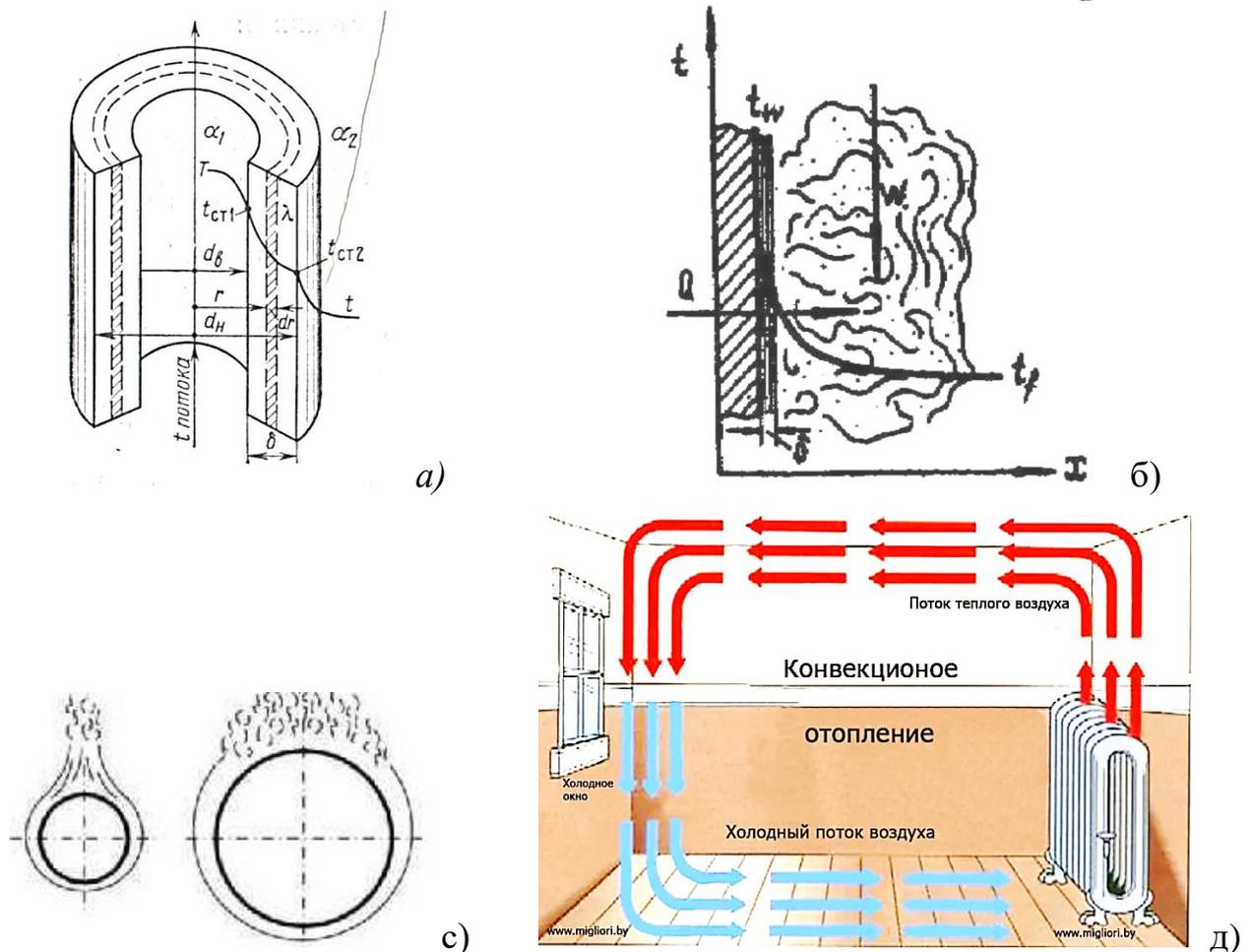


Рисунок 7.1 – Схема конвективного теплообмена от цилиндрической трубы
а – теплопередача от цилиндрической трубы; б – схема передачи тепла к окружающей среде; в – схема распространения тепла от горизонтальной трубы;
г – схема конвективного теплообмена в помещении.

Теплота от трубы отопления гаража (по условию задачи), имеющей более высокую температуру, передается окружающему воздуху.

Тепловой поток на наружной поверхности трубы Q (Вт), передаваемый к воздуху, определяется по закону Ньютона — Рихмана, как:

$$Q = \alpha (t_{ст} - t_{в}) F, \quad (7.1)$$

где α - коэффициент теплоотдачи при свободном движении воздуха около трубы Вт/(м²•К) ;

$t_{ст}$ - температура поверхности трубы;

$t_{в}$ - температура воздуха в гараже;

F- площадь наружной поверхности трубы, м².

Коэффициент теплоотдачи α величина определяемая, которая входит в формулу для расчета критерия Нуссельта Nu :

$$Nu = \frac{\alpha n}{\lambda}, \quad (7.2)$$

где n - характерный линейный размер, например длина l , диаметр трубы

d , или для канала не круглого сечения эквивалентный диаметр $d_{э} = \frac{4A}{\Pi}$

, где A –площадь сечения канала, Π – периметр сечения. (В случае круглой трубы, в качестве n принимается наружный диаметр трубы d_n);

λ - коэффициент теплопроводности воздуха (в табл.7.2, стр.17), Вт/м К.

Критерий Нуссельта Nu - безразмерный коэффициент теплоотдачи, характеризует соотношение между теплообменом конвекцией и теплопроводностью.

Согласно теории подобия взаимосвязь различных физических процессов количественно описывается различными безразмерными критериями подобия. Часть из них определяется экспериментально в определенных условиях при изменении какого-либо из физических параметров. Кроме этого, также находится зависимость определяемого критерия подобия (в нашем случае критерий Нуссельта Nu), в который входит искомая физическая величина (в данном случае коэффициент теплоотдачи α), от других определяющих критериев подобия. Эта зависимость называется критериальным уравнением.

При свободном движении воздуха в гараже (*свободная конвекция*) и горизонтальном расположении трубы отопления критериальное уравнение имеет вид:

$$Nu = C (Gr \cdot Pr)^n , \quad (7.3)$$

где **C**, **n** - постоянные определяются по результатам эксперимента в определенных условиях и зависят от режима свободного движения воздуха и условий обтекания поверхности. Они являются функциями произведения $Gr \cdot Pr$;

Gr - *критерий Грасгофа*, определяет интенсивность движения среды при свободной конвекции и характеризует соотношение между подъемной силой и силой вязкости при движении среды;

Pr - *критерий Прандтля* приводится в таблицах теплофизических свойств веществ (для воздуха в табл.7.2, стр.17), характеризует теплофизические свойства среды и соотношение толщин динамического и теплового размера пограничных слоев при конвекции.

Критерий Грасгофа определяется из выражения:

$$Gr = \frac{g \beta (t_{ст} - t_{в}) d_H^3}{\nu^2} , \quad (7.4)$$

где **g** – ускорение свободного падения. $g=9.81 \text{ м/с}^2$;

β - коэффициент объемного расширения воздуха,

$$\beta = 1/(t_{в} + 273), \quad (t_{в} - \text{в градусах Цельсия}), \text{ 1/К}$$

ν — коэффициент кинематической вязкости воздуха, $\text{м}^2/\text{с}$.

После расчета произведения критериев $Gr \cdot Pr$ для горизонтальной трубы по табл.7.3 для критериального уравнения (7.3) определяются постоянные **C**, **n**.

Таблица 7.3

Значения постоянных **C** и **n**

$Gr \cdot Pr$	C	n	Режим движения
$1 \cdot 10^3 \dots 1 \cdot 10^9$	0,5	0,25	Ламинарный
$\geq 6 \cdot 10^{10}$	0,15	0,333	Турбулентный

Из критериального уравнения (7.3) определяется критерий Нуссельта.

Из выражения для критерия Нуссельта (7.2) определяется коэффициент теплоотдачи α :

$$\alpha = Nu \left(\frac{\lambda}{d} \right)$$

Площадь наружной поверхности трубы находится из выражения:

$$F = \pi d_n l \quad (7.5)$$

Тогда искомый тепловой поток, отдаваемый от наружной поверхности трубы к воздуху в гараже рассчитывается по формуле (7.1):

$$Q = \alpha (t_{ст} - t_{в}) F .$$

Пример решения задания №7

Исходные данные: $d_n = 0,2\text{м}$, $l = 5\text{м}$, $t_{ст} = 92^\circ\text{C}$, $t_{в} = 16^\circ\text{C}$

Решение

По таблице 7.2 для $t_{в} = 16^\circ\text{C}$ находим параметры воздуха λ , ν и Pr

$$\lambda = 0.0256 \text{ Вт/м К}; \quad \nu = 14.7 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}; \quad Pr = 0.704;$$

Коэффициент объемного расширения воздуха для $t_{в} = 16^\circ\text{C}$:

$$\beta = 1/(t_{в} + 273) = 1/(16 + 273) = 3,46 \cdot 10^{-3} \text{ 1/К},$$

Вычисляем значение критерия Грасгофа:

$$Gr = \frac{g \beta (t_{ст} - t_{в}) d^3}{\nu^2} =$$

$$= 9.81 \cdot 3.46 \cdot 10^{-3} \cdot (92 - 16) \cdot 0,2^3 / (14.7 \cdot 10^{-6})^2 = 9,5497 \cdot 10^7$$

Вычисляем значение комплекса критериев:

$$Gr \cdot Pr = 9,5497 \cdot 10^7 \cdot 0.704 = 6.723 \cdot 10^7$$

Из табл. 7.3 находим, что постоянные равны: $C = 0.5$ и $n = 0.25$.

Тогда значение критерия Нуссельта составит:

$$Nu = C (Gr \cdot Pr)^n = 0,5 \cdot (6,723 \cdot 10^7)^{0,25} = 45,27$$

Коэффициент теплоотдачи α определяется как:

$$\alpha = Nu (\lambda / d) = 45,27 (0,0256/0,2) = 5,8 \text{ Вт/м}^2 \text{ К}$$

Площадь наружной поверхности трубы:

$$F = \pi d_n l = 3,14 \cdot 0,2 \cdot 5 = 3,14 \text{ м}^2.$$

Тогда тепловой поток, отдаваемый от наружной поверхности трубы к воздуху в гараже будет равен:

$$Q = \alpha (t_{ct} - t_B) F = 5,8 \cdot (92 - 16) \cdot 3,14 = 1384,1 \text{ Вт/м}^2 \text{ К}$$

$$\text{Ответ: } Q = 1384,1 \text{ Вт/м}^2 \text{ К}$$

5. СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Теплотехника. Практикум: Учеб. пособие для бакалавриата и магистратуры; под ред. В.Л.Ерофеева, А.С.Пряхина. – М.: Издательство Юрайт, 2018. – 395с.
- 2 Сборник задач по теплотехнике: Учеб. пособие для студ. учреждений высш. проф. образования / М.Г.Шатров, И.Е.Иванов, С.А.Пришвин и др.; под ред. М.Г. Шатрова. – М.: Издательский центр «Академия», 2012. – 272с.
- 3 Синявский Ю. В. Сборник задач по курсу "Теплотехника": учеб. пособие / Ю. В. Синявский. - СПб.: ГИОРД, 2010. – 128с.
- 4 Теплотехника. В 2 т. Том 1. Термодинамика и теория теплообмена: учебник для бакалавриата и магистратуры / В.Л.Ерофеев, А.С.Пряхин, П.Д. Семенов; под ред. В.Л.Ерофеева, А.С.Пряхина. – М.: Издательство Юрайт, 2018. – 308с.
- 5 Еремин В.И. Теоретические основы термодинамики и теплопередачи (Краткий курс). Ч. I. Техническая термодинамика: Учебное пособие / В. И. Еремин. – Бронницы: БФ МАДИ, 2017. – 130 с.
- 6 Еремин В.И. Теоретические основы термодинамики и теплопередачи (Краткий курс). Ч. II. Теплопередача: Учебное пособие / В. И. Еремин. – Бронницы: БФ МАДИ, 2019. – 78 с.
- 7 Варгафтик Н.Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей/ Н. Б. Варгафтик. – 2-е изд. – М.: Наука, 1972. – 720с.

СОДЕРЖАНИЕ

1. Основные задачи самостоятельной работы.....	3
--	---

2. Содержание и структура работы	3
3. Варианты заданий.....	6
Задание №1.....	6
Задание №2.....	9
Задание №3.....	10
Задание №4.....	11
Задание №5.....	12
Задание №6.....	17
Задание №7.....	20
4. Методические рекомендации к выполнению заданий.....	22
4.1 Методические рекомендации к выполнению задания №1.....	22
4.2 Методические рекомендации к выполнению задания №2.....	24
4.3 Методические рекомендации к выполнению задания №3.....	25
4.4 Методические рекомендации к выполнению задания №4.....	26
4.5 Методические рекомендации к выполнению задания №5.....	28
4.5.1 Общие виды циклов тепловых машин.....	28
4.5.2 Виды циклов работы двигателей внутреннего сгорания	29
4.5.3 Основные зависимости к выполнению задания №5.....	30
4.5.4 Пример выполнения задания №5.....	35
4.6 Методические рекомендации к выполнению задания №6.....	42
4.7 Методические рекомендации и пример выполнения задания №7.....	44
5. Список рекомендуемой литературы	49
Содержание.....	50

Еремин Владимир Иванович,
ст. науч. сотр., канд. техн. наук

**МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ
ПО ВЫПОЛНЕНИЮ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ ПО
ДИСЦИПЛИНЕ ТЕРМОДИНАМИКА И ТЕПЛОПЕРЕДАЧА**

Учебно-методическое пособие

по выполнению самостоятельной работы студентов
специальности 23.05.01 «Наземные транспортно-технологические средства»

Подписано в печать 21.12.2020г.

Печать цифровая

Тираж 30 экз.

Усл. печ. л. 3,02

Заказ № 25

Формат 148x210

Цена договорная

140170 Московская область, г.Бронницы, ул. Красная, д.85