

**МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ ГРАЖДАНСКОЙ АВИАЦИИ**

Кафедра «Двигатели летательных аппаратов»

Шулекин В.Т.

Пособие

к выполнению контрольных работ № 1 и № 2 по дисциплине
«Теплотехника» для студентов специальности 330500 «Безопасность
технологических процессов и производств» дневной формы обучения

Москва - 2002

Дисциплина «Теплотехника» является частью нового учебного плана специальности 330500 «Безопасность технологических процессов и производств» для подготовки специалистов по дневной форме обучения.

При изучении учебной дисциплины «Теплотехника» студенты выполняют две контрольные работы:

1. Оценка термодинамического совершенства циклов тепловых машин.

2. Расчет системы обогрева испытательного бокса.

Целью первой контрольной работы является приобретение навыков и умений в определении:

- параметров состояния рабочего тела в контрольных точках заданных циклов;
- энергетических показателей термодинамических процессов, составляющих заданный цикл;
- энергетических показателей заданных циклов;
- параметров состояния рабочего тела на выходе из утилизатора или теплообменного аппарата, которые в настоящее время являются одними из средств повышения топливной эффективности тепловых машин;
- сравнительный анализ термодинамического совершенства заданного цикла тепловой машины по отношению к базовому циклу – **циклу Карно**.

В первой контрольной работе для расчёта предлагаются следующие циклы тепловых машин:

1. Цикл Отто. 2. Цикл Брайтона. 3. Цикл Дизеля. 4. Цикл Отто с утилизацией тепла. 5. Цикл Брайтона с регенерацией тепла. 6. Цикл Дизеля с утилизацией тепла.

Целью второй контрольной работы является приобретение навыков и умений в определении:

- коэффициентов теплоотдачи при свободном и вынужденном конвективном теплообмене на основе решения критериальных уравнений для того или иного вида теплообмена;
- критериев динамического и теплового подобия;
- основных параметров теплообменного аппарата.

Для реализации поставленной задачи во второй контрольной работе студентам для цикла Брайтона с регенерацией тепла предлагается выполнить расчёт теплообменного аппарата, для остальных студентов – расчет системы обогрева испытательного бокса.

Рассмотрено и одобрено на заседании кафедры «Двигатели летательных аппаратов», протокол № 3 от 20 октября 2002 года, а также на заседании Методической комиссии по специальности 330500, протокол № 2 от 21 октября 2002 года.

Рецензент, профессор, к.т.н. Тихонов Н.Д.

к выбору варианта задания и исходных данных для выполнения контрольных работ.

1. По таблице 1 определяется число, соответствующее первой букве фамилии студента – А.

2. К числу «А» прибавляется число, образованное двумя последними цифрами шифра студента – В.

3. Номер варианта находится по двум последним цифрам полученной суммы – С.

Пример: Студент Иванов И.И., шифр БТП200092. Из таблицы 1 следует, что первой букве фамилии «И» соответствует число А=9. Две последние цифры шифра образуют число В=92, то есть С=92+9=101. Таким образом, вариант задания – 01.

Таблица 2

А	Б	В	Г	Д	Е	Ж	З	И	К	Л	М	Н	О	П	Р	С	Т
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
У	Ф	Х	Ц	Ч	Ш	Щ	Э	Ю	Я								
19	20	21	22	23	24	25	26	27	28								

В соответствии с вариантом задания из таблицы 2 выписываются исходные данные для выполнения контрольной работы № 1:

1. Степень повышения давления рабочего тела $\pi = \frac{p_2}{p_1}$.

2. Количество тепла, подведенное к рабочему телу в цикле $q_1, \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$.

3. Циклы тепловой машины 1, 2, 3, 4, 5, 6.

4. Степень регенерации $\sigma_p = \frac{T_{2\text{та}} - T_2}{T_4 - T_2}$ (для цикла Брайтона с регенерацией тепла).

Таблица 2

Вариант задания	π	q_1 $\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$	Циклы тепловых машин	Степень регенерации σ_p
01,99	15	800	1,2	-
02,98	14	850	1,3	-
03,97	13	900	1,4	-
04,96	12	950	1,5	0.65
05,95	11	1000	1,6	-
06,94	10	950	2,3	-
07,93	9	900	2,4	-
08,92	8	850	2,5	0.70
09,91	7	800	2,6	-
10,90	6	850	3,4	-
11,89	5	900	3,5	0/75
12,88	6	950	3,6	-
13,87	7	1000	1,2	-
14,86	8	950	1,3	-
15,85	9	900	1,4	-
16,84	10	850	1,5	0.70
17,83	11	800	1,6	-
18,82	12	850	2,3	-
19,81	13	900	2,4	-
20,80	14	950	2,5	0.65
21,79	15	1000	2,6	-
22,78	14	950	3,4	-
23,77	13	900	3,5	0.70
24,76	12	850	3,6	-
25,75	11	800	1,2	-
26,74	10	850	1,3	-
27,73	9	900	1,4	-
28,72	8	950	1,5	0.75
29,71	7	1000	1,6	-
30,70	6	950	2,3	-
31,69	5	900	2,4	-
32,68	6	850	2,5	0.70
33,67	7	800	2,6	-
34,66	8	850	3,4	-
35,65	9	900	3,5	0.65
36,64	10	950	3,6	-
37,63	11	1000	1,2	-
38,62	12	950	1,3	-
39,61	13	900	1,4	-
40,60	14	850	1,5	0.70
41,59	15	800	1,6	-
42,58	14	850	2,3	-
43,57	13	900	2,4	-
44,56	12	950	2,5	0.65
45,55	11	1000	2,6	-
46,54	10	950	3,4	-
47,53	9	900	3,5	0.70
48,52	8	850	3,6	-
49,51	7	800	1,2	-
50,00	6	850	1,3	-

1. Оценка термодинамического совершенства циклов тепловых машин.

Порядок выполнения контрольной работы №1.

1. Для каждого заданного цикла определить:

- а) параметры состояния рабочего тела в контрольных точках циклов;
- б) энергетические показатели термодинамических процессов, из которых состояются циклы;
- в) энергетические показатели циклов;
- г) параметры состояния рабочего тела на выходе из утилизатора или теплообменного аппарата;
- д) энергетические показатели циклов с утилизацией или регенерацией тепла;
- е) термодинамическое совершенство заданных циклов.

2. Построить на бумаге изображение циклов тепловых машин в p, v и T, S – координатах (по данным расчетов). Начальную точку в T, S – диаграмме совместить с началом координат.

1. Цикл Отто (рис.1).

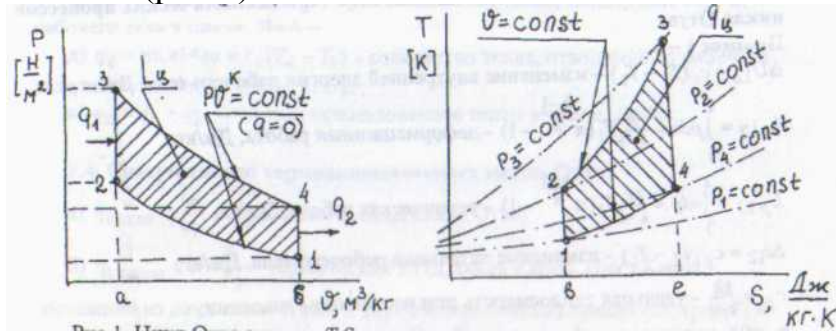


Рис.1. Цикл Отто в p, v и T, S координатах.

1.1. Расчёт параметров состояния рабочего тела (сухого воздуха) в контрольных точках цикла.

Точка 1. $p_1 = 101325 \text{ Н/м}^2$ (760 мм рт.ст.); $T_1 = 288.15 \text{ К}$ ($+t^\circ\text{C}$); $v_1 = \frac{RT_1}{p_1}, \frac{\text{м}^3}{\text{кг}}$,

$\rho_1 = \frac{1}{v_1}, \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$; $R = \frac{8314}{\mu_B} = \frac{8314}{28.966} = 287 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}\cdot\text{К}}$ - газовая постоянная для сухого

воздуха; $\mu_B = 28.966 \frac{\text{кг}}{\text{кмоль}}$ - масса одного киломоля воздуха.

Точка 2. - давление $p_2 = \pi p_1$, где π - степень повышения давления из задания, $p_1 = 101325 \frac{\text{Н}}{\text{м}^2}$ - начальное давление; - температура $T_2 = T_1 \pi^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}$,

где $\kappa = 1.4$ - показатель адиабаты для воздуха; - удельный объём

$v_2 = \frac{RT_2}{p_2}, \frac{\text{м}^3}{\text{кг}}$; - плотность $\rho_2 = \frac{1}{v_2}, \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$; $\varepsilon = \frac{v_1}{v_2} = \frac{\rho_2}{\rho_1}$ - степень сжатия в

цикле Отто.

Точка 3. $v_3 = v_2$; $T_3 = T_2 + \frac{q_1}{c_v}$; q_1 - из задания; $c_v = \frac{R}{\kappa-1}, \frac{\text{Дж}}{\text{кг}\cdot\text{К}}$ - удельная теплоемкость при постоянном объеме; $p_3 = \frac{RT_3}{v_3}, \text{Па}$; $\rho_3 = \frac{1}{v_3}$.

Точка 4. $v_4 = v_1$; $p_4 = p_3 \left(\frac{v_3}{v_4}\right)^\kappa$; $T_4 = \frac{p_4 v_4}{R}$; $\rho_4 = \frac{1}{v_4}$.

7.

1.2. Расчёт энергетических показателей термодинамических процессов цикла Отто.

Процесс 1 – 2.

$\Delta U_{12} = c_v(T_2 - T_1)$ – изменение внутренней энергии рабочего тела, Дж/кг;

$$L_{v12} = \int_1^2 p dv = \frac{R}{k-1} T_1 (\pi^{\frac{k-1}{k}} - 1) - \text{деформационная работа, Дж/кг;}$$

$$L_{p12} = \int_1^2 v dp = \frac{kR}{k-1} T_1 (\pi^{\frac{k-1}{k}} - 1) - \text{техническая работа, Дж/кг;}$$

$\Delta i_{12} = c_p(T_2 - T_1)$ – изменение энтальпии рабочего тела, Дж/кг;

$c_p = \frac{kR}{k-1}$ – удельная теплоемкость при постоянном давлении;

$q_{12}=0$ – количество теплоты, участвующее в процессе;

$\Delta S_{12} = 0$ – изменение энтропии рабочего тела.

Процесс 2 – 3.

$\Delta u_{23} = c_v(T_3 - T_2)$; $L_{v23} = 0$; $L_{p23} = R(T_3 - T_2)$; $\Delta i_{23} = c_p(T_3 - T_2)$;

$$q_{23} = c_v(T_3 - T_2); \Delta S_{23} = c_p \ln \frac{T_3}{T_2} - R \ln \frac{p_3}{p_2};$$

Процесс 3 – 4.

$$\Delta u_{34} = c_v(T_4 - T_3); L_{v34} = \int_3^4 p dv = \frac{R}{k-1} T_3 \left(1 - \frac{1}{\pi^{\frac{k-1}{k}}}\right); L_{p34} = kL_{v34};$$

$$\Delta i_{34} = c_p(T_4 - T_3); q_{34} = 0; \Delta S_{34} = 0;$$

Процесс 4 – 1.

$\Delta u_{41} = c_v(T_1 - T_4)$; $L_{v41} = 0$; $L_{p41} = R(T_1 - T_4)$; $\Delta i_{41} = c_p(T_1 - T_4)$;

$$q_{41} = c_v(T_1 - T_4); \Delta S_{41} = c_p \ln \frac{T_1}{T_4} - R \ln \frac{p_1}{p_4};$$

1.3. Расчёт энергетических показателей цикла Отто:

а) $L_{сж} = \text{пл. } a21ба = L_{v12} = \frac{R}{k-1} T_1 (\pi^{\frac{k-1}{k}} - 1)$ – удельная работа сжатия, Дж/кг;

б) $L_{расш} = \text{пл. } a2341ба = L_{v34} = \frac{R}{k-1} T_3 \left(1 - \frac{1}{\pi^{\frac{k-1}{k}}}\right)$ – удельная работа

расширения, Дж/кг;

в) $L_{ц} = L_{расш} - L_{сж}$ – работа цикла (свободная энергия на выходе из тепловой машины), Дж/кг;

- г) $q_1 = \text{пл. } \nu 1234 \text{ев} = c_v(T_3 - T_2)$ - количество тепла, подведенное к 1 кг рабочего тела в цикле, Дж/кг;
- д) $q_2 = \text{пл. } \nu 14 \text{ев} = c_v(T_4 - T_1)$ - количество тепла, отводимое от рабочего тела в окружающую среду, Дж/кг;
- е) $q_{\text{ц}} = q_1 - q_2$ - полезно использованное тепло в цикле, Дж/кг.

1.4. Совершенство термодинамического цикла Отто:

а) $\eta_{t \text{ отто}} = \frac{L_{\text{ц}}}{q_1}$ - термический КПД цикла Отто;

б) $\eta_{t \text{ карно}} = 1 - \frac{T_1}{T_3}$ - термический КПД цикла Карно. Цикл Карно,

состоящий из двух адиабатных и двух изотермических процессов (рис.2) и совершаемый в диапазоне температур $T_1 - T_3$, является базовым для любого термодинамического цикла.

в) $\overline{\eta}_t = \frac{\eta_{t \text{ отто}}}{\eta_{t \text{ карно}}}$ - совершенство заданного термодинамического цикла

Отто.

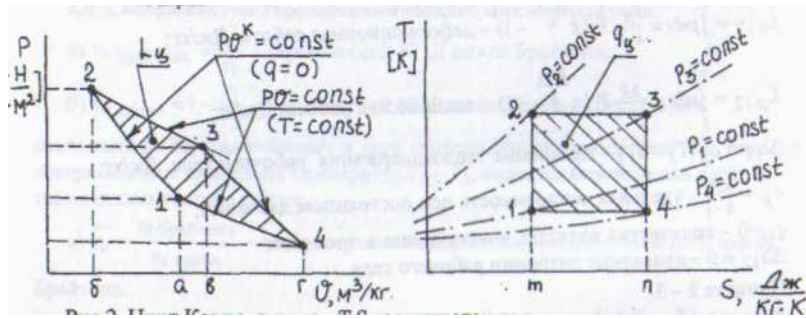


Рис.2. Цикл Карно в p, v и T, S координатах.

2. Цикл Брайтона (рис.3).

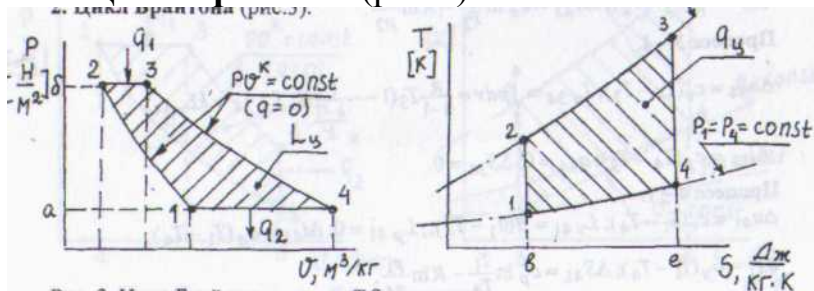


Рис. 3. Цикл Брайтона в p, v и T, S координатах.

2.1. Расчёт параметров состояния рабочего тела (сухого воздуха) в контрольных точках цикла.

Точка 1. Смотри расчёт параметров в этой точке для цикла Отто.

Точка 2. Смотри расчёт параметров в этой точке для цикла Отто.

Точка 3. $p_3=p_2$; $T_3 = T_2 + \frac{q_1}{c_p}$; q_1 - из задания; $c_p = \frac{\kappa R}{k-1}$, $\frac{\text{Дж}}{\text{кг}\cdot\text{К}}$ - удельная

теплоемкость при постоянном давлении; $v_3 = \frac{RT_3}{p_3}$, $\frac{\text{м}^3}{\text{кг}}$; $\rho_3 = \frac{1}{v_3}$, $\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$.

Точка 4. $p_4=p_1$; $T_4 = \frac{T_3}{\pi^{\frac{k-1}{\kappa}}}$; $v_4 = \frac{RT_4}{p_4}$; $\rho_4 = \frac{1}{v_4}$.

2.2. Расчёт энергетических показателей термодинамических процессов цикла Брайтона.

Процесс 1 – 2.

$\Delta U_{12} = c_v(T_2 - T_1)$ – изменение внутренней энергии рабочего тела, Дж/кг;

$L_{v12} = \int_1^2 p dv = \frac{R}{k-1} T_1 (\pi^{\frac{k-1}{k}} - 1)$ - деформационная работа, Дж/кг;

$L_{p12} = \int_1^2 v dp = \frac{\kappa R}{k-1} T_1 (\pi^{\frac{k-1}{k}} - 1)$ - техническая работа, Дж/кг;

$\Delta i_{12} = c_p(T_2 - T_1)$ - изменение теплосодержания рабочего тела, Дж/кг;

$c_p = \frac{\kappa R}{k-1}$ - удельная теплоемкость при постоянном давлении;

$q_{12}=0$ – количество теплоты, участвующее в процессе;

$\Delta S_{12} = 0$ – изменение энтропии рабочего тела.

Процесс 2 – 3.

$\Delta u_{23} = c_v(T_3 - T_2)$; $L_{v23} = R(T_3 - T_2)$; $L_{p23} = 0$; $\Delta i_{23} = c_p(T_3 - T_2)$;

$q_{23} = c_p(T_3 - T_2)$; $\Delta S_{23} = c_p \ln \frac{T_3}{T_2} - R \ln \frac{p_3}{p_2}$;

Процесс 3 – 4.

$\Delta u_{34} = c_v(T_4 - T_3)$; $L_{v34} = \int_3^4 p dv = \frac{R}{k-1} T_3 (1 - \frac{1}{\pi^{\frac{k-1}{k}}})$; $L_{p34} = \kappa L_{v34}$;

$\Delta i_{34} = c_p(T_4 - T_3)$; $q_{34} = 0$; $\Delta S_{34} = 0$;

Процесс 4 – 1.

$\Delta u_{41} = c_v(T_1 - T_4)$; $L_{v41} = R(T_1 - T_4)$; $L_{p41} = 0$; $\Delta i_{41} = c_p(T_1 - T_4)$;

$q_{41} = c_p(T_1 - T_4)$; $\Delta S_{41} = c_p \ln \frac{T_1}{T_4} - R \ln \frac{p_1}{p_4}$;

2.3. Расчёт энергетических показателей цикла Брайтона:

а) $L_{сж} = \text{пл. } a21ба = L_{p12} = \frac{\kappa R}{\kappa-1} T_1 (\pi^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} - 1)$ - удельная работа сжатия, Дж/кг;

б) $L_{расш} = \text{пл. } a2341ба = L_{p34} = \frac{\kappa R}{\kappa-1} T_3 (1 - \frac{1}{\pi^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}})$ - удельная работа

расширения, Дж/кг;

в) $L_{ц} = L_{расш} - L_{сж}$ - работа цикла (свободная энергия на выходе из тепловой машины), Дж/кг;

г) $q_1 = \text{пл. } в1234ев = c_p (T_3 - T_2)$ - количество тепла, подведенное к 1 кг рабочего тела в цикле, Дж/кг;

д) $q_2 = \text{пл. } в14ев = c_p (T_4 - T_1)$ - количество тепла, отводимое от рабочего тела в окружающую среду, Дж/кг;

е) $q_{ц} = q_1 - q_2$ - полезно использованное тепло в цикле, Дж/кг.

2.4. Совершенство термодинамического цикла Брайтона:

а) $\eta_t \text{ брайтона} = \frac{L_{ц}}{q_1}$ - термический КПД цикла Брайтона;

б) $\eta_t \text{ карно} = 1 - \frac{T_1}{T_3}$ - термический КПД цикла Карно. Цикл Карно,

состоящий из двух адиабатных и двух изотермических процессов (см. рис.2) и совершаемый в диапазоне температур $T_1 - T_3$, является базовым для любого термодинамического цикла.

в) $\overline{\eta_t} = \frac{\eta_t \text{ брайтона}}{\eta_t \text{ карно}}$ - совершенство заданного термодинамического цикла

Брайтона.

3. Цикл Дизеля (рис.4).

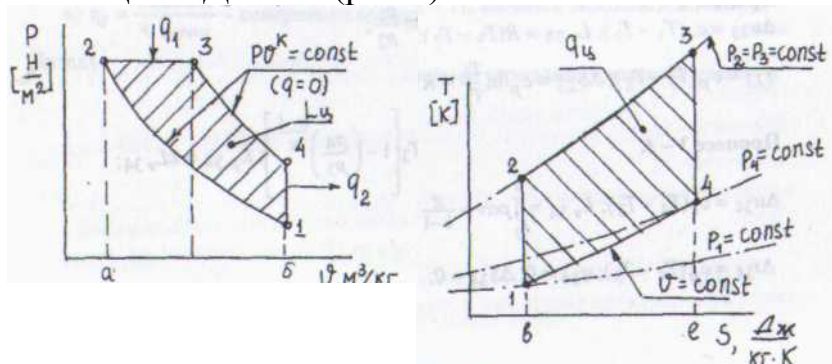


Рис. 4. Цикл Дизеля в p, v и T, S координатах.

3.1. Расчёт параметров состояния рабочего тела (сухого воздуха) в контрольных точках цикла.

Точка 1. Смотри расчёт параметров в этой точке для цикла Отто.

Точка 2. Смотри расчёт параметров в этой точке для цикла Отто.

Точка 3. $p_3=p_2$; $T_3 = T_2 + \frac{q_1}{c_p}$; q_1 - из задания; $c_p = \frac{\kappa R}{\kappa-1}$, Дж/кг·К - удельная

теплоемкость при постоянном давлении; $v_3 = \frac{RT_3}{p_3}$, м³/кг; $\rho_3 = \frac{1}{v_3}$.

Точка 4. $v_4=v_1$; $p_4 = p_3 \left(\frac{v_3}{v_4}\right)^\kappa$; $T_4 = \frac{p_4 v_4}{R}$; $\rho_4 = \frac{1}{v_4}$.

3.2. Расчёт энергетических показателей термодинамических процессов цикла Дизеля.

Процесс 1 – 2.

$\Delta U_{12} = c_v(T_2 - T_1)$ – изменение внутренней энергии рабочего тела, Дж/кг;

$L_{v12} = \int_1^2 p dv = \frac{R}{\kappa-1} T_1 (\pi^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} - 1)$ - деформационная работа, Дж/кг;

$L_{p12} = \int_1^2 v dp = \frac{\kappa R}{\kappa-1} T_1 (\pi^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} - 1)$ - техническая работа, Дж/кг;

$\Delta i_{12} = c_p(T_2 - T_1)$ - изменение энтальпии рабочего тела, Дж/кг;

$c_p = \frac{\kappa R}{\kappa-1}$ - удельная теплоемкость при постоянном давлении;

$q_{12}=0$ – количество теплоты, участвующее в процессе;

$\Delta S_{12} = 0$ – изменение энтропии рабочего тела.

Процесс 2 – 3.

$\Delta u_{23} = c_v(T_3 - T_2)$; $L_{v23} = R(T_3 - T_2)$; $L_{p23} = 0$; $\Delta i_{23} = c_p(T_3 - T_2)$;

$q_{23} = c_p(T_3 - T_2)$; $\Delta S_{23} = c_p \ln \frac{T_3}{T_2} - R \ln \frac{p_3}{p_2}$;

Процесс 3 – 4.

$\Delta u_{34} = c_v(T_4 - T_3)$; $L_{v34} = \int_3^4 p dv = \frac{R}{\kappa-1} T_3 \left[1 - \left(\frac{p_4}{p_3}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} \right]$; $L_{p34} = \kappa L_{v34}$;

$\Delta i_{34} = c_p(T_4 - T_3)$; $q_{34} = 0$; $\Delta S_{34} = 0$;

Процесс 4 – 1.

$\Delta u_{41} = c_v(T_1 - T_4)$; $L_{v41} = 0$; $L_{p41} = R(T_1 - T_4)$; $\Delta i_{41} = c_p(T_1 - T_4)$;

$$q_{41} = c_v(T_1 - T_4); \Delta S_{41} = c_p \ln \frac{T_1}{T_4} - R \ln \frac{p_1}{p_4};$$

3.3. Расчёт энергетических показателей цикла Дизеля:

а) $L_{сж} = \text{пл. } a21ба = L_{v12} = \frac{R}{k-1} T_1 (\pi^{\frac{k-1}{k}} - 1)$ - удельная работа сжатия, Дж/кг;

б) $L_{расш} = \text{пл. } a2341ба = R(T_3 - T_2) + \frac{R}{k-1} T_3 \left[1 - \left(\frac{p_4}{p_3} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]$ - удельная

работа расширения, Дж/кг;

в) $L_{ц} = L_{расш} - L_{сж}$ - работа цикла (свободная энергия на выходе из тепловой машины), Дж/кг;

г) $q_1 = \text{пл. } в1234ев = c_p(T_3 - T_2)$ - количество тепла, подведенное к 1 кг рабочего тела в цикле, Дж/кг;

д) $q_2 = \text{пл. } в14ев = c_v(T_4 - T_1)$ - количество тепла, отводимое от рабочего тела в окружающую среду, Дж/кг;

е) $q_{ц} = q_1 - q_2$ - полезно использованное тепло в цикле, Дж/кг.

3.4. Совершенство термодинамического цикла Дизеля:

а) $\eta_{t \text{ дизеля}} = \frac{L_{ц}}{q_1}$ - термический КПД цикла Дизеля;

б) $\eta_{t \text{ карно}} = 1 - \frac{T_1}{T_3}$ - термический КПД цикла Карно. Цикл Карно,

состоящий из двух адиабатных и двух изотермических процессов (см. рис.2) и совершаемый в диапазоне температур $T_1 - T_3$, является базовым для любого термодинамического цикла.

в) $\overline{\eta}_t = \frac{\eta_{t \text{ дизеля}}}{\eta_{t \text{ карно}}}$ - совершенство заданного термодинамического цикла

Дизеля.

4. Цикл Отто с утилизацией тепла (рис.5).

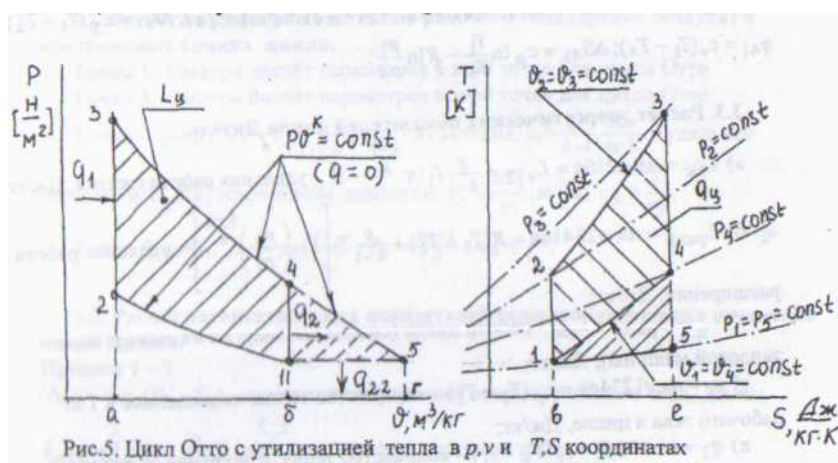


Рис.5. Цикл Отто с утилизацией тепла в p, v и T, S координатах

4.1. Расчёт параметров состояния рабочего тела (сухого воздуха) в контрольных точках цикла.

Точка 1 }
 Точка 2 } Параметры состояния рабочего тела во всех точках цикла
 Точка 3 }
 Точка 4 }

находятся также как для цикла Отто без утилизации тепла (смотри расчет цикла Отто).

4.2. Расчет энергетических показателей термодинамических процессов цикла Отто с утилизацией тепла.

Процесс 1–2 }
 Процесс 2–3 } Энергетические показатели термодинамических процессов
 Процесс 3–4 }
 Процесс 4–1 }

находятся также как для цикла Отто без утилизации тепла (см. расчет цикла Отто).

4.3. Расчет энергетических показателей цикла Отто с утилизацией тепла производится также как и для цикла Отто без утилизации тепла.

4.4. Расчет параметров состояния рабочего тела на выходе из утилизатора тепла (например, воздушной турбины):

точка 5. $p_5 = p_1$; $v_5 = v_4 \left(\frac{p_4}{p_5} \right)^{\frac{1}{k}}$; $T_5 = \frac{p_5 v_5}{R}$;

4.5. Определение энергетических показателей в термодинамическом процессе утилизатора:

$$\Delta u_{45} = c_v(T_5 - T_4); L_{v45} = \int_4^5 p dv = \frac{R}{k-1} T_4 \left[1 - \left(\frac{p_5}{p_4} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]; L_{p45} = L_{v45} k;$$

$$\Delta i_{45} = c_p(T_5 - T_4); q_{45} = 0; \Delta S_{45} = 0$$

4.6. Энергетические показатели цикла Отто с утилизацией тепла::

а) $L_{сж} = \text{пл. } a21ба = L_{v12} = \frac{R}{k-1} T_1 \left(\pi^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right)$ - удельная работа сжатия, Дж/кг;

б) $L_{расш} = \text{пл. } a2341ба = L_{v34} = \frac{R}{k-1} T_3 \left(1 - \frac{1}{\pi^{\frac{k-1}{k}}} \right)$ - удельная работа

расширения в цикле Отто без утилизации тепла, Дж/кг;

в) $L_{расш \text{ в утилизаторе}} = \text{пл. } б145гб = L_{v45} = \frac{R}{k-1} T_4 \left[1 - \left(\frac{p_5}{p_4} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]$ - работа

расширения в утилизаторе, Дж/кг;

г) $L_{ц} = L_{расш} + L_{расш \text{ в утилизаторе}} - L_{сж}$ - работа цикла на выходе из тепловой машины с учетом утилизатора тепла, Дж/кг;

г) $q_1 = \text{пл. } в1234ев = c_v(T_3 - T_2)$ - количество тепла, подведенное к 1 кг рабочего тела в цикле, Дж/кг;

д) $q_2 = \text{пл. } в14ев = c_p(T_5 - T_1)$ - количество тепла, отводимое от рабочего тела в окружающую среду, Дж/кг;

е) $q_{ц} = q_1 - q_2$ - полезно использованное тепло в цикле, Дж/кг.

4.7. Совершенство термодинамического цикла Отто с утилизацией тепла:

а) $\eta_{t \text{ отто}} = \frac{L_{ц}}{q_1}$ - термический КПД цикла Отто с утилизацией тепла;

б) $\eta_{t \text{ карно}} = 1 - \frac{T_1}{T_3}$ - термический КПД цикла Карно.

в) $\overline{\eta}_t = \frac{\eta_t \text{ Отто}}{\eta_t \text{ Карно}}$ - совершенство заданного термодинамического цикла

Отто с утилизацией тепла.

5. Цикл Брайтона с регенерацией тепла (рис.6).

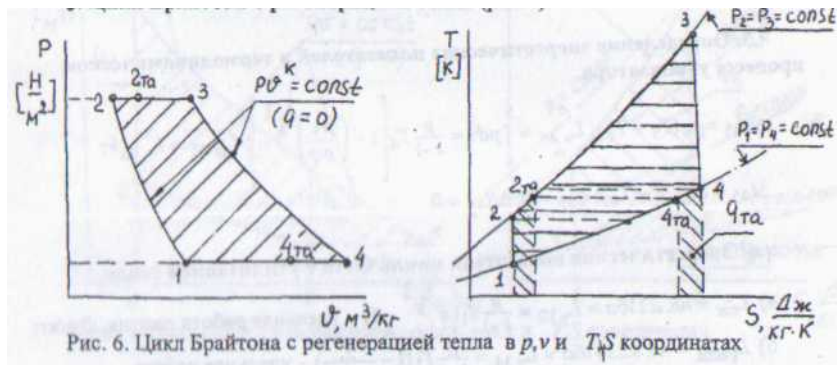


Рис. 6. Цикл Брайтона с регенерацией тепла в p, v и T, S координатах

5.1. Расчёт параметров состояния рабочего тела (сухого воздуха) в контрольных точках цикла.

Точка 1 }
 Точка 2 } Параметры состояния рабочего тела во всех точках цикла
 Точка 3 }
 Точка 4 }

находятся также как для цикла Брайтона без регенерации тепла (см. расчет цикла Брайтона).

5.2. Расчет энергетических показателей термодинамических процессов цикла Брайтона с регенерацией тепла.

Процесс 1 – 2 }
 Процесс 2 – 3 } Энергетические показатели термодинамических процессов
 Процесс 3 – 4 }
 Процесс 4 – 1 }

находятся также как для цикла Брайтона без регенерации тепла (смотри расчет цикла Брайтона).

5.3. Расчет энергетических показателей цикла Брайтона с регенерацией тепла производится также как и для цикла Брайтона без регенерации тепла.

5.4. Расчет параметров состояния рабочего тела на входе и выходе из теплообменного аппарата:

а) холодный теплоноситель:

$$\text{Вход (точка 2): } p_2 = \pi p_1; \quad T_2 = T_1 \pi^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}; \quad v_2 = \frac{RT_2}{p_2}, \frac{\text{м}^3}{\text{кг}}; \quad \rho_2 = \frac{1}{v_2}, \frac{\text{кг}}{\text{м}^3};$$

$$\text{Выход (точка 2}_{\text{та}}\text{): } v_{2_{\text{та}}} = v_2; \quad T_{2_{\text{та}}} = T_2 + \sigma_p (T_4 - T_2); \quad p_{2_{\text{та}}} = \frac{RT_{2_{\text{та}}}}{v_{2_{\text{та}}}};$$

$$\rho_{2_{\text{та}}} = \frac{1}{v_{2_{\text{та}}}}$$

в) горячий теплоноситель

$$\text{Вход (точка 4): } v_4 = v_1; \quad p_4 = p_3 \left(\frac{v_3}{v_4} \right)^{\kappa}; \quad T_4 = \frac{p_4 v_4}{R}; \quad \rho_4 = \frac{1}{v_4}.$$

$$\text{Выход (точка 4}_{\text{та}}\text{): } p_{4_{\text{та}}} = p_1; \quad T_{4_{\text{та}}} = T_4 - \sigma_p (T_4 - T_2); \quad v_{4_{\text{та}}} = \frac{RT_{4_{\text{та}}}}{p_{4_{\text{та}}}};$$

$$\rho_{4_{\text{та}}} = \frac{1}{v_{4_{\text{та}}}}$$

5.5. Количество теплоты, полученное холодным теплоносителем в теплообменном аппарате:

$$q_{\text{та}} = \text{пл. а} 1 2 2_{\text{та}} \text{ ба} = c_p (T_{2_{\text{та}}} - T_2)$$

5.6. Совершенство термодинамического цикла Брайтона с регенерацией тепла:

$$\text{а) } \eta_t \text{ брайтона с рег. тепла} = \frac{L_{\text{ц}}}{q_1 - q_{\text{та}}} \quad \text{б)}$$

$$\eta_t \text{ брайтона без рег. тепла} = \frac{L_{\text{ц}}}{q_1}$$

$$\text{в) } \eta_t \text{ карно} = 1 - \frac{T_1}{T_3}; \quad \text{г) } \overline{\eta_t} = \frac{\eta_t \text{ брайтона с рег. тепла}}{\eta_t \text{ карно}}$$

6. Цикл Дизеля с утилизацией тепла (рис.7).

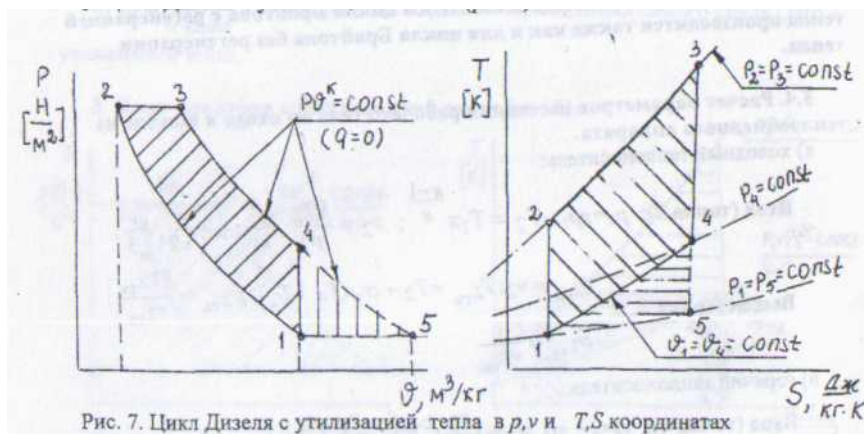


Рис. 7. Цикл Дизеля с утилизацией тепла в p, v и T, S координатах.

6.1. Расчёт параметров состояния рабочего тела (сухого воздуха) в контрольных точках цикла.

Точка 1 }
 Точка 2 } Параметры состояния рабочего тела во всех точках цикла
 Точка 3 }
 Точка 4 }

находятся также как для цикла Дизеля без утилизации тепла (см. расчет цикла Дизеля).

6.2. Расчет энергетических показателей термодинамических процессов цикла Дизеля с утилизацией тепла.

Процесс 1-2 }
 Процесс 2-3 } Энергетические показатели термодинамических процессов
 Процесс 3-4 }
 Процесс 4-1 }

находятся также как для цикла Дизеля без утилизации тепла (см. расчет цикла Дизеля).

6.3. Расчет параметров состояния рабочего тела на выходе из утилизатора тепла (например, воздушной турбины):

$$\text{точка 5. } p_5 = p_1; v_5 = v_4 \left(\frac{p_5}{p_4} \right)^{\frac{1}{k}}; T_5 = \frac{p_5 v_5}{R};$$

6.4. Определение энергетических показателей в термодинамическом процессе утилизатора:

$$\Delta u_{45} = c_v(T_5 - T_4); L_{v45} = \int_4^5 p dv = \frac{R}{k-1} T_4 \left[1 - \left(\frac{p_5}{p_4} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]; L_{p45} = L_{v45} k;$$

$$\Delta i_{45} = c_p(T_5 - T_4); q_{45} = 0; \Delta S_{45} = 0$$

6.5. Расчёт энергетических показателей цикла Дизеля с утилизацией тепла:

а) $L_{сж} = \text{пл. } a21ба = L_{v12} = \frac{R}{k-1} T_1 (\pi^{\frac{k-1}{k}} - 1)$ - удельная работа сжатия, Дж/кг;

б) $L_{расш} = \text{пл. } a2341ба = R(T_3 - T_2) + \frac{R}{k-1} T_3 \left[1 - \left(\frac{p_4}{p_3} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]$ - удельная работа расширения без учета утилизатора, Дж/кг;

в) $L_{расш \text{ в утилизаторе}} = \text{пл. } б145гб = L_{v45} = \frac{R}{k-1} T_4 \left[1 - \left(\frac{p_5}{p_4} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]$ - работа расширения в утилизаторе, Дж/кг;

г) $L_{ц} = L_{расш} + L_{расш \text{ в утилизаторе}} - L_{сж}$ - работа цикла на выходе из тепловой машины с учетом утилизатора тепла, Дж/кг;

д) $q_1 = \text{пл. } в1234ев = c_p(T_3 - T_2)$ - количество тепла, подведенное к рабочему телу в цикле, Дж/кг;

д) $q_2 = \text{пл. } в14ев = c_p(T_5 - T_1)$ - количество тепла, отводимое от рабочего тела в окружающую среду, Дж/кг;

е) $q_{ц} = q_1 - q_2$ - полезно использованное тепло в цикле, Дж/кг.

6.6. Совершенство термодинамического цикла Дизеля с утилизацией тепла:

а) $\eta_{t \text{ дизеля}} = \frac{L_{ц}}{q_1}$ - термический КПД цикла Дизеля с утилизацией тепла;

б) $\eta_{t \text{ карно}} = 1 - \frac{T_1}{T_3}$ - термический КПД цикла Карно.

в) $\overline{\eta}_t = \frac{\eta_{t \text{ дизеля}}}{\eta_{t \text{ карно}}}$ - совершенство заданного термодинамического цикла

Дизеля с утилизацией тепла.

Расчет системы обогрева испытательного бокса.

Студенты, которые в первой контрольной работе не производили расчет цикла с регенерацией тепла, во второй контрольной работе занимаются решением задачи № 1, все остальные осуществляют решение задачи № 2.

Исходными данными для решения задачи № 1 являются:

- 1. Размеры трубы D/d мм, длина трубы L , м.**
- 2. Температура горячей воды $t_{ж1}$.**
- 3. Температура воздуха в испытательном боксе $t_{ж2}$.**
- 4. Коэффициент теплопроводности материала трубы $\lambda \frac{\text{Вт}}{\text{м}\cdot\text{К}}$.**
- 5. Скорость течения воды в трубе $c_{ж}$, м/с.**

Значения исходных данных для выполнения контрольной работы № 2 (задача № 1) выбираются из таблицы 3.

Порядок решения задачи №1:

1. Рассчитать изменение температуры при теплопередаче (вынужденный конвективный теплообмен + теплопроводность + свободный конвективный теплообмен).

2. Применить оребрение наружной поверхности трубы и определить, во сколько раз изменится тепловой поток.

3. Построить на бумаге эпюру изменения температур в контрольных точках теплопередачи.

Исходными данными для решения задачи № 2 являются:

1. Параметры состояния на входе в теплообменный аппарат холодного

(T_2, p_2, v_2, ρ_2) и горячего (T_4, p_4, v_4, ρ_4) теплоносителей.

2. Параметры состояния на выходе из теплообменного аппарата холодного $(T_{2_{\text{та}}}, p_{2_{\text{та}}}, v_{2_{\text{та}}}, \rho_{2_{\text{та}}})$ и горячего

$(T_{4_{\text{та}}}, p_{4_{\text{та}}}, v_{4_{\text{та}}}, \rho_{4_{\text{та}}})$ теплоносителей.

Значения всех параметров состояния берутся из первой контрольной работы при расчете цикла Брайтона с регенерацией тепла.

3. Массовый расход холодного и горячего теплоносителей $G_{\text{хол}}=G_{\text{гор}}=G$, кг/с.

4. Форма канала – равносторонний треугольник со стороной l_1 для холодного теплоносителя и l_2 для горячего теплоносителя.

5. Скорость течения холодного c_1 и горячего c_2 теплоносителей, м/с.

Значения исходных данных, перечисленных в п.3,4,5 берутся из таблицы 4.

Таблица 3

Вари- Ант	D/d мм	$t_{ж1}$ °C	$t_{ж2}$ °C	λ $\frac{Вт}{м \cdot К}$	L М	$c_{ж}$ м/с
01,99	140/130	95	15	63.0	15	3.2
02,98	135/125	93	16	116.3	14	3.1
03,97	130/120	91	17	45.4	13	3.0
04,96	125/115	89	18	58.2	12	2.9
05,95	120/110	86	19	384	11	2.8
06,94	115.105	84	20	85.5	10	2.7
07,93	110/100	82	21	64.0	9	2.6
08,92	105/95	95	22	204.0	8	2.5
09,91	100/90	93	23	63.0	7	2.4
10,90	140/130	91	24	116.3	6	2.3
11,89	135/125	89	25	45.4	5	2.2
12,88	130/120	86	15	58.2	15	2.1
13,87	125/115	84	16	384	14	2.0
14,86	120/110	82	17	85.5	13	3.2
15,85	115.105	95	18	64.0	12	3.1
16,84	110/100	93	19	204.0	11	3.0
17,83	105/95	91	20	63.0	10	2.9
18,82	100/90	89	21	116.3	9	2.8
19,81	140/130	86	22	45.4	8	2.7
20,80	135/125	84	23	58.2	7	2.6
21,79	130/120	82	24	384	6	2.5
22,78	125/115	95	25	85.5	5	2.4
23,77	120/110	93	15	64.0	15	2.3
24,76	115.105	91	16	204.0	14	2.2
25,75	110/100	89	17	63.0	13	2.1
26,74	105/95	86	18	116.3	12	2.0
27,73	100/90	84	19	45.4	11	3.2
28,72	140/130	82	20	58.2	10	3.1
29,71	135/125	95	21	384	9	3.0
30,70	130/120	93	22	85.5	8	2.9
31,69	125/115	91	23	64.0	7	2.8
32,68	120/110	89	24	204.0	6	2.7
33,67	115.105	86	25	63.0	5	2.6
34,66	110/100	84	15	116.3	15	2.5
35,65	105/95	82	16	45.4	14	2.4
36,64	100/90	95	17	58.2	13	2.3
37,63	140/130	93	18	384	12	2.2
38,62	135/125	91	19	85.5	11	2.1
39,61	130/120	89	20	64.0	10	2.0
40,60	125/115	86	21	204.0	9	3.2
41,59	120/110	84	22	63.0	8	3.1
42,58	115.105	82	23	116.3	7	3.0
43,57	105/95	93	25	58.2	5	2.8
44,56	100/90	91	15	384	15	2.7
45,55	140/130	89	16	85.5	14	2.6
46,54	135/125	86	17	64.0	13	2.5
47,53	130/120	84	18	204.0	12	2.4
48,52	125/115	82	19	63.0	11	2.3
49,51	120/110	95	20	116.3	10	2.2
50,00	115.105	93	21	45.4	9	2.1

21.

Таблица 4

Вари-	G	L_2	L_2	C_2	C_2
-------	---	-------	-------	-------	-------

Ант	кг/с	мм	мм	м/с	м/с
01,99	20	2.0	2.0	15	25
02,98	19	2.5	2.5	16	24
03,97	18	3.0	3.0	17	23
04,96	17	3.5	3.5	18	25
05,95	15	4.0	4.0	19	24
06,94	14	5.0	5.0	20	30
07,93	13	2.0	2.0	21	29
08,92	12	2.5	2.5	22	28
09,91	11	3.0	3.0	23	27
10,90	10	3.5	3.5	24	26
11,89	20	4.0	4.0	25	25
12,88	19	5.0	5.0	25	15
13,87	18	2.0	2.0	26	14
14,86	17	2.5	2.5	27	13
15,85	15	3.0	3.0	28	15
16,84	14	3.5	3.5	29	14
17,83	13	4.0	4.0	20	10
18,82	12	5.0	5.0	11	29
19,81	11	2.0	2.0	12	28
20,80	10	2.5	2.5	13	27
21,79	20	3.0	3.0	14	26
22,78	19	3.5	3.5	15	25
23,77	18	4.0	4.0	25	18
24,76	17	5.0	5.0	26	14
25,75	15	2.0	2.0	27	13
26,74	14	2.5	2.5	18	15
27,73	13	3.0	3.0	19	14
28,72	12	3.5	3.5	20	10
29,71	11	4.0	4.0	21	19
30,70	10	5.0	5.0	12	28
31,69	20	2.0	2.0	13	27
32,68	19	2.5	2.5	14	26
33,67	18	3.0	3.0	15	29
34,66	17	3.5	3.5	15	15
35,65	15	4.0	4.0	16	14
36,64	14	5.0	5.0	27	13
37,63	13	2.0	2.0	18	15
38,62	12	2.5	2.5	19	14
39,61	11	3.0	3.0	20	20
40,60	10	3.5	3.5	11	29
41,59	20	4.0	4.0	12	28
42,58	19	5.0	5.0	13	29
43,57	18	2.0	2.0	14	26
44,56	17	2.5	2.5	15	23
45,55	15	3.0	3.0	35	15
46,54	14	3.5	3.5	36	14
47,53	13	4.0	4.0	37	13
48,52	12	5.0	5.0	38	15
49,51	11	2.0	2.0	39	14
50,00	10	2.5	2.5	30	10

Задача № 1. Рассчитать теплопередачу через цилиндрическую стенку.

Для отопления испытательного бокса используется стальная труба (сталь 20) $D/d=100/90$ мм, в которой протекает горячая вода. Температуры воды $t_{ж1}=86^\circ\text{C}$, скорость движения воды $c_{ж}=2$ м/с, длина трубы $L=10$ м. Труба расположена горизонтально или вертикально.

Температура воздуха внутри бокса $t_{ж2}=20^\circ\text{C}$. Коэффициент теплопроводности для стали $\lambda = 51.5 \frac{\text{Вт}}{\text{м}\cdot\text{К}}$.

Рассчитать тепловой поток Q , объёмный расход воды и температуры на поверхностях трубы, расположенной горизонтально и вертикально, без оребрения наружной поверхности трубы и с учётом оребрения.

Решение.

Решение данной задачи находится методом последовательных приближений. Вначале для расчета значений коэффициентов теплоотдачи от воды к внутренней поверхности трубы α_1 и от внешней поверхности трубы к воздуху бокса α_2 приходится задаваться температурами поверхностей трубы из условия $t_{ж1} > t_{ст1} > t_{ст2} > t_{ж2}$, причем разность соседних температур тем больше, чем больше термическое сопротивление между ними. Исходя из этого принимаем $t_{ст1}=85.5^\circ\text{C}$, $t_{ст2}=85^\circ\text{C}$.

1. Производится расчет вынужденного конвективного теплообмена внутри трубы. По температуре $t_{ж1}=86^\circ\text{C}$ из таблицы 8 линейной интерполяцией находим теплофизические свойства горячей воды:

$\frac{\lambda-0.669}{0.676-0.669} = \frac{t-80}{90-80}$; при $t_{ж1}=86^\circ\text{C}$, $\lambda_{ж1} = 0.6732 \frac{\text{Вт}}{\text{м}\cdot\text{К}}$ - коэффициент теплопроводности для воды.

Аналогичным образом определяем $\nu_{ж1} = 0.3416 \cdot 10^{-6} \frac{\text{м}^2}{\text{с}}$ - кинематическая вязкость воды; $Pr_{ж1} = 2.074$. По температуре $t_{ст1}=85.5^\circ\text{C}$ по таблице 8 находим число Прандтля на внутренней поверхности трубы $Pr_{ст1} = 2.087$.

Определяем число Рейнольдса (для оценки характера течения воды):

$$Re_{ж} = \frac{c_{ж}d}{\nu_{ж1}} = \frac{2 \cdot 0.09}{0.3416 \cdot 10^{-6}} = 0.5269 \cdot 10^6$$

Так как $Re_{ж} > 10^4$, то характер движения воды – турбулентный. Критериальное уравнение для данного случая вынужденного конвективного теплообмена имеет вид:

$$Nu_{ж1} = 0.021 Re_{ж1}^{0.8} Pr_{ж1}^{0.43} \left(\frac{Pr_{ж1}}{Pr_{ст1}} \right)^{0.25} = 0.021 \cdot (0.5269 \cdot 10^6)^{0.8} \cdot 2.074^{0.43} \cdot \left(\frac{2.74}{2.087} \right)^{0.25} = 792.4$$

Из выражения для числа Нуссельта находим коэффициент теплоотдачи от воды к внутренней поверхности трубы:

$$\alpha_1 = \frac{Nu_{ж1} \lambda_{ж1}}{d} = \frac{792.4 \cdot 0.6732}{0.09} = 5927 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$$

2. Производится расчет естественного конвективного теплообмена от наружной поверхности трубы к воздуху в испытательном боксе. Труба расположена горизонтально. Определяющая температура для данного вида теплообмена находится по формуле:

$$t_{\text{оп}} = \frac{t_{\text{ст2}} + t_{\text{ж2}}}{2} = \frac{85 + 20}{2} = 52.5^{\circ}\text{C}$$

По температуре $t_{\text{оп}}=52.5^{\circ}\text{C}$ из таблицы 7 находим теплофизические свойства воздуха методом линейной интерполяции:

$$\lambda_{\text{ж2}} = 2.8475 \cdot 10^{-2} \frac{\text{Вт}}{\text{м}\cdot\text{К}}; \nu_{\text{ж2}} = 18.205 \cdot 10^{-6} \frac{\text{м}^2}{\text{с}}; \text{Pr}_{\text{ж2}} = 0.6975$$

По температуре $t_{\text{ст2}}=85^{\circ}\text{C}$ из таблицы 7 находим $\text{Pr}_{\text{ст2}}=0.691$.

Безразмерное число Грасгофа:

$$Gr_{\text{ж2}} = \frac{g\beta(t_{\text{ст2}} - t_{\text{ж2}})D^3}{\nu_{\text{ж2}}} = \frac{9.81 \cdot \frac{1}{273+20} (85-20) \cdot 0.1^3}{(18.205 \cdot 10^{-6})^2} = 6566491$$

Находим произведение $Gr_{\text{ж2}} \text{Pr}_{\text{ж2}} = 6566491 \cdot 0.6975 = 4580127$

Критериальное уравнение для свободного конвективного теплообмена имеет вид:

$$Nu_{\text{ж2}} = B(Gr_{\text{ж2}} \text{Pr}_{\text{ж2}})^n \left(\frac{\text{Pr}_{\text{ж2}}}{\text{Pr}_{\text{ст2}}} \right)^{0.25}$$

Значения коэффициентов «В» и «n» принимаются из таблицы 5.

	Вертикальная поверхность	Горизонтальная поверхность
$Gr \text{Pr} \dots \dots \dots$	$10^3 - 10^9$	$10^3 - 10^8$
B	0.76	0.5
n	0.25	0.25

$$Nu_{\text{ж2}} = 0.5(Gr_{\text{ж2}} \text{Pr}_{\text{ж2}})^{0.25} \left(\frac{\text{Pr}_{\text{ж2}}}{\text{Pr}_{\text{ст2}}} \right)^{0.25} = 0.5 \cdot 4580127^{0.25} \left(\frac{0.6975}{0.691} \right)^{0.25} = 23.18$$

Коэффициент теплоотдачи от наружной поверхности трубы к воздуху из выражения для числа Нуссельта:

$$\alpha_2 = \frac{Nu_{\text{ж2}} \lambda_{\text{ж2}}}{D} = \frac{23.18 \cdot 2.8475 \cdot 10^{-2}}{0.1} = 6.6 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$$

Тепловой поток при рассматриваемой теплопередаче равен:

$$Q = \frac{t_{ж1} - t_{ж2}}{R_{\alpha1} + R_{\lambda} + R_{\alpha2}} = \frac{t_{ж1} - t_{ж2}}{\frac{1}{\alpha_1 \pi d L} + \frac{1}{2\pi\lambda L} \ln \frac{D}{d} + \frac{1}{\alpha_2 \pi D L \overline{F}_{ор}}} =$$

$$= \frac{86 - 20}{5.97 \cdot 10^{-5} + 3.257 \cdot 10^{-5} + 0.04825} = 1365.26 \text{ Вт},$$

где $R_{\alpha1} = \frac{1}{\alpha_1 \pi d L} = \frac{1}{5927 \cdot 3.14 \cdot 0.09 \cdot 10} = 5.97 \cdot 10^{-5} \frac{\text{К}}{\text{Вт}}$ - термическое

сопротивление при теплоотдаче от горячей воды к внутренней поверхности трубопровода;

$$R_{\lambda} = \frac{1}{2\pi\lambda L} \ln \frac{D}{d} = \frac{1}{2 \cdot 3.14 \cdot 51.5 \cdot 10} \ln \frac{100}{90} = 3.257 \cdot 10^{-5} \frac{\text{К}}{\text{Вт}}$$
 - термическое

сопротивление при теплопроводности в цилиндрической твёрдой стенке трубопровода;

$$R_{\alpha2} = \frac{1}{\alpha_2 \pi D L \overline{F}_{ор}} = \frac{1}{6.6 \cdot 3.14 \cdot 0.1 \cdot 10 \cdot 1.0} = 0.04825 \frac{\text{К}}{\text{Вт}}$$
 - термическое

сопротивление при теплоотдаче от наружной поверхности трубопровода к воздуху в испытательном боксе.

В этих формулах $\overline{F}_{ор} = \frac{F_{ор}}{F_{тр}}$ - отношение площади оребрения $F_{ор}$ к

наружной поверхности трубопровода. В начале принимается $\overline{F}_{ор} = 1.0$ – (площадь оребрения наружной поверхности трубы отсутствует), а затем принимаем $\overline{F}_{ор} = 10$ (площадь оребрения в 10 раз больше наружной поверхности трубопровода) и уточняем тепловой поток с учётом оребрения (после решения основной задачи).

Зная значение теплового потока, уточним значения температур поверхностей трубы. Температура на внутренней и наружной поверхностях трубы равны:

$$t_{ст1} = t_{ж1} - QR_{\alpha1} = 86 - 1365.26 \cdot 5.97 \cdot 10^{-5} = 85.92^{\circ} \text{C};$$

$$t_{ст2} = t_{ст1} - QR_{\lambda} = 85.92 - 1365.26 \cdot 3.257 \cdot 10^{-5} = 85.87^{\circ} \text{C}$$

Так как отличие найденных значений $t_{ст1}$ и $t_{ст2}$ менее одного процента, повторный расчет не производится. Если же погрешность составляет более двух процентов, то необходимо повторить расчет с новыми значениями $t_{ст1}$ и $t_{ст2}$.

Для трубы, расположенной вертикально, при расчёте свободного конвективного теплообмена определяющим размером является не наружный диаметр трубы D , а длина (высота) трубы L . В этом случае критерий Грасгофа равен:

$$Gr_{ж2} = \frac{g\beta(t_{cm2} - t_{ж2})L^3}{\nu_{ж2}} = \frac{9.81 \cdot \frac{1}{273+20} (85-20) \cdot 10^3}{(18.205 \cdot 10^{-6})^2} = 6.56649 \cdot 10^{12}$$

Критериальное уравнение для данного вида теплообмена имеет вид (смотри табл.5*):

$$Nu_{ж2} = 0.15(Gr_{ж2} Pr_{ж2})^{0.33} \left(\frac{Pr_{ж2}}{Pr_{ст2}} \right)^{0.25} =$$

$$= 0.15 \cdot (6.56649 \cdot 10^{12} \cdot 0.6975)^{0.33} \left(\frac{0.6975}{0.691} \right)^{0.25} = 2265.67$$

Коэффициент теплоотдачи от наружной поверхности трубы, расположенной вертикально, к воздуху в испытательном боксе

$$\alpha_2 = \frac{Nu_{ж2} \lambda_{ж2}}{H} = \frac{2265.67 \cdot 2.8475 \cdot 10^{-2}}{10} = 6.45 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$$

Тепловой поток при рассматриваемой теплопередаче равен:

$$Q = \frac{t_{ж1} - t_{ж2}}{R_{\alpha1} + R_{\lambda} + R_{\alpha2}} = \frac{t_{ж1} - t_{ж2}}{\frac{1}{\alpha_1 \pi d L} + \frac{1}{2\pi \lambda L} \ln \frac{D}{d} + \frac{1}{\alpha_2 \pi D L F_{op}}} =$$

$$= \frac{86 - 20}{5.97 \cdot 10^{-5} + 3.257 \cdot 10^{-5} + 0.0493638} = 1314.29 \text{ Вт},$$

где

$$R_{\alpha2} = \frac{1}{\alpha_2 \pi D L F_{op}} = \frac{1}{6.45 \cdot 3.14 \cdot 0.1 \cdot 10 \cdot 1.0} = 0.0493638 \frac{\text{К}}{\text{Вт}}$$

сопротивление при теплоотдаче от наружной поверхности трубопровода к воздуху в испытательном боксе.

Зная значение теплового потока, уточним значения температур поверхностей трубы. Температура на внутренней и наружной поверхностях трубы равны:

$$t_{ст1} = t_{ж1} - QR_{\alpha1};$$

$$t_{ст2} = t_{ст1} - QR_{\lambda}$$

Если отличие найденных значений $t_{ст1}$ и $t_{ст2}$ от ранее заданных менее одного процента, повторный расчет не производится. Если же погрешность составляет более двух процентов, то необходимо повторить расчет с новыми значениями $t_{ст1}$ и $t_{ст2}$.

*) Михеев М.А., Михеева И.М. Основы теплопередачи. М.: Энергия, 1977. 344с.

Объемный расход воды в трубе равен

$$V_{ж1} = c_{ж} \frac{\pi d^2}{4} = 2 \cdot \frac{3.14 \cdot 0.09^2}{4} = 0.0127 \frac{\text{м}^3}{\text{с}}$$

Задача № 2. Расчёт потребной поверхности теплообмена и других параметров теплообменного аппарата.

1. При расчете цикла Брайтона с заданной степенью регенерации σ_p становятся известными параметры состояния холодного (точка «2» или точка «к»), и точка «2_{та}» или точка «к_{та}») и горячего (точка «4» или точка «т»), и точка «4_{та}» или точка «т_{та}») теплоносителей на входе и выходе из теплообменного аппарата.

2. Далее рассчитываются:

а) определяющая температура для горячего ($T_{оп1}$) и холодного ($T_{оп2}$) теплоносителей (для расчёта критериев подобия):

$$T_{оп1} = 0.5(T_4 + T_{4та}), \quad T_{оп2} = 0.5(T_2 + T_{2та});$$

б) плотность горячего и холодного теплоносителей при данных температурах из уравнения состояния

$$\rho_{оп1} = \frac{p_2}{RT_{оп1}}; \quad \rho_{оп2} = \frac{p_4}{RT_{оп2}};$$

в) площадь проходного сечения потока для теплоносителей из уравнения расхода

$$F_{оп1} = \frac{G}{\rho_{оп1}c_1}; \quad F_{оп2} = \frac{G}{\rho_{оп2}c_2},$$

где G – массовый расход холодного и горячего теплоносителей, кг/с;

c_1 – средняя скорость движения холодного теплоносителя по каналам теплообменного аппарата, м/с;

c_2 – средняя скорость движения горячего теплоносителя по каналам теплообменного аппарата, м/с;

г) необходимое количество каналов для теплоносителей

$$z_1 = \frac{F_{оп1}}{F_{кан1}}; \quad z_2 = \frac{F_{оп2}}{F_{кан2}},$$

где $F_{кан1}$, $F_{кан2}$ – соответствующие площади поперечного сечения каналов.

Для равностороннего треугольника со стороной L_1 или L_2 имеем:

$$F_{кан1} = \frac{\sqrt{3}}{4} L_1^2; \quad F_{кан2} = \frac{\sqrt{3}}{4} L_2^2$$

д) по значению температуры $T_{оп1}$ (или $T_{оп2}$) с помощью таблицы 7 находятся коэффициенты теплопроводности λ_1 (или λ_2) и динамической вязкости μ_1 (или μ_2) теплоносителей методом линейной интерполяции;

е) эквивалентный гидравлический диаметр канала для горячего и холодного теплоносителей:

$$d_{эkv1} = \frac{4F_{кан1}}{\Pi_{кан1}}; \quad d_{эkv2} = \frac{4F_{кан2}}{\Pi_{кан2}},$$

где $\Pi_{\text{кан1}}$, $\Pi_{\text{кан2}}$ – соответствующие периметры каналов;

ж) число Рейнольдса

$$Re_1 = \frac{\rho_{\text{оп1}} d_{\text{экв1}} c_1}{\mu_1}, \quad Re_2 = \frac{\rho_{\text{оп2}} d_{\text{экв2}} c_2}{\mu_2}$$

з) число Нуссельта из критериальных уравнений в зависимости от характера движения теплоносителей:

$$Re \leq 2000 \text{ – ламинарный, } Nu = 0.17 Re^{0.33};$$

$$2000 < Re \leq 10^4 \text{ – переходный, } Nu = 0.021 Re^{0.66};$$

$$Re > 10^4 \text{ – турбулентный, } Nu = 0.018 Re^{0.8};$$

и) коэффициенты теплоотдачи от горячего теплоносителя к стенке канала (α_1) и от стенки к холодному теплоносителю (α_2):

$$\alpha_1 = \frac{Nu_1 \lambda_1}{d_{\text{экв1}}}; \quad \alpha_2 = \frac{Nu_2 \lambda_2}{d_{\text{экв2}}}$$

к) коэффициент теплопередачи:

$$K = \frac{\alpha_1 \alpha_2}{\alpha_1 + \alpha_2}$$

л) количество теплоты, переданное воздуху в теплообменном аппарате:

$$Q = G c_{\text{рв}} (t_{\text{к та}} - t_{\text{к}})$$

м) средний температурный напор в теплообменном аппарате, работающем по схеме противотока определяется формулой:

$$\overline{\Delta t} = \frac{(t_4 - t_{2\text{ТТ}}) + (t_{4\text{ТТ}} - t_2)}{2}$$

н) необходимая площадь теплообмена:

$$F_{\text{та}} = \frac{Q}{K \overline{\Delta t}}$$

о) необходимая длина каналов для теплоносителей

$$L_{\text{кан1}} = \frac{F_{\text{та}}}{z_1 \Pi_{\text{кан1}}}; \quad L_{\text{кан2}} = \frac{F_{\text{та}}}{z_2 \Pi_{\text{кан2}}};$$

п) ширина теплообменного аппарата

$$B_1 = z_1 l_1; \quad B_2 = z_2 l_2$$

р) принимая ширину теплообменного аппарата равной $B=0.5 \dots 0.6$ м, находим необходимое количество рядов каналов для теплоносителей

$$m_1 = \frac{B}{B_1}; \quad m_2 = \frac{B}{B_2};$$

с) высота теплообменного аппарата

28.

$$H = m_1 \frac{\sqrt{3}}{2} l_1 + m_2 \frac{\sqrt{3}}{2} l_2$$

3. Определяются потери полного давления по газовой и воздушной сторонам теплообменного аппарата:

а) при ламинарном движении теплоносителя

$$\Delta p = \xi \frac{\rho c^2}{2} \cdot \frac{L_{\text{кан}}}{d_{\text{ЭКВ}}},$$

где ξ - коэффициент сопротивления трения находится по формуле:

$$\xi = \frac{A}{\text{Re}}$$

Коэффициент A зависит от формы сечения; численные значения A приведены в таблице 6.

Таблица 6

Значения эквивалентного диаметра и коэффициента A для различных сечений канала

Форма сечения	$d_{\text{ЭКВ}}$	A
Круг диаметром d	D	64
Квадрат со стороной a	A	57
Равносторонний треугольник со стороной a	$0.58a$	53
Кольцо шириной a	$2a$	96
Прямоугольник со стороной a и b при: $a/b=0$ $a/b=0.25$ $a/b=0.5$	$2a$ $1.6a$ $1.3a$	96 73 62
Эллипс a – малая и b – большая полуось при: $a/b=0.3$ $a/b=0.5$ $a/b=0.7$	$1.4a$ $1.3a$ $1.17a$	73 68 65

б) при турбулентном движении теплоносителя

$$\Delta p = \xi \frac{\rho c^2}{2} \cdot \frac{L_{\text{кан}}}{d_{\text{ЭКВ}}},$$

где ξ - коэффициент сопротивления трения находится по формуле:

$$\xi = \frac{0.3164}{\text{Re}^{0.25}}$$

Список использованных источников.

1. Теория тепломассообмена. Учебник для технических университетов и вузов /С.И.Исаев, И.А.Кожин и др. Под ред. А.И.Леонтьева. 2-е изд. испр. и доп. М.:Изд-во МГТУ им. Н.Э.Баумана,1997. 683с.

T K	t °C	ρ $\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$	C_p $\frac{\text{кДж}}{\text{кг}\cdot\text{К}}$	$\lambda\cdot 10^2$ $\frac{\text{Вт}}{\text{м}\cdot\text{К}}$	$a\cdot 10^5$ $\frac{\text{м}^2}{\text{с}}$	$\mu\cdot 10^6$ $\frac{\text{Н}\cdot\text{с}}{\text{м}^2}$	$\nu\cdot 10^6$ $\frac{\text{м}^2}{\text{с}}$	Pr
273	0	1.293	1.005	2.44	1.881	17.17	13.28	0.707
283	10	1.247	1.005	2.51	2.006	17.66	14.16	0.705
293	20	1.205	1.005	2.59	2.142	18.15	15.06	0.703
303	30	1.165	1.005	2.67	2.286	18.64	16.00	0.701
313	40	1.128	1.005	2.76	2.431	19.13	16.96	0.699
323	50	1.093	1.005	2.83	2.572	19.62	17.95	0.698
333	60	1.060	1.005	2.90	2.720	20.11	18.97	0.696
343	70	1.029	1.009	2.97	2.856	20.60	20.02	0.694
353	80	1.000	1.009	3.05	3.020	21.09	21.09	0.692
363	90	0.972	1.009	3.13	3.189	21.48	22.10	0.690
373	100	0.946	1.009	3.21	3.364	21.88	23.13	0.688
393	120	0.898	1.009	3.34	3.684	22.86	25.45	0.686
413	140	0.854	1.013	3.49	4.034	23.74	27.80	0.684
433	160	0.815	1.017	3.64	4.389	24.52	30.09	0.682
453	180	0.779	1.022	3.78	4.750	25.31	32.49	0.681
473	200	0.776	1.026	3.93	5.136	26.00	34.85	0.680
523	250	0.674	1.038	4.27	6.100	27.37	40.61	0.677
573	300	0.615	1.047	4.61	7.156	29.72	48.33	0.674
623	350	0.566	1.059	4.91	8.187	31.39	55.46	0.676
673	400	0.524	1.068	5.21	9.312	33.06	63.09	0.678
773	500	0.456	1.093	5.74	11.53	36.20	79.38	0.687
873	600	0.404	1.114	6.22	13.83	39.14	96.89	0.699
973	700	0.362	1.136	6.71	16.34	41.79	115.4	0.796
1073	800	0.329	1.156	7.18	18.88	44.34	134.8	0.713
1173	900	0.301	1.172	7.63	21.62	46.70	155.1	0.717
1273	1000	0.277	1.185	8.07	24.59	49.05	177.1	0.719
1373	1100	0.257	1.198	8.50	27.63	51.21	193.3	0.722
1473	1200	0.239	1.210	9.15	31.65	53.46	223.7	0.724

$t, ^\circ\text{C}$	$p \cdot 10^5$ Па	ρ $\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$	i $\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$	c_p $\frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$	λ $\frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$	$a \cdot 10^6$ $\frac{\text{м}^2}{\text{с}}$	$\mu \cdot 10^6$ $\frac{\text{Па} \cdot \text{с}}$	$\nu \cdot 10^6$ $\frac{\text{м}^2}{\text{с}}$	$\beta \cdot 10^4$ $1/\text{К}$	$\sigma \cdot 10^4$ Н/м	Pr
0	1.013	999.9	0	4.212	0.560	13.2	1788	1.789	-0.63	756.4	13.5
10	1.013	999.7	42.04	4.191	0.580	13.8	1306	1.306	0.70	741.6	9.45
20	1.013	998.2	83.91	4.183	0.597	14.3	1004	1.006	1.82	726.9	7.03
30	1.013	995.7	125.7	4.174	0.612	14.7	801.5	0.805	3.21	712.2	5.45
40	1.013	992.2	167.5	4.174	0.627	15.1	653.3	0.659	3.87	696.5	4.36
50	1.013	988.1	209.3	4.174	0.640	15.5	549.4	0.556	4.49	676.9	3.59
60	1.013	983.1	251.1	4.179	0.650	15.8	469.9	0.478	5.11	662.2	3.03
70	1.013	977.8	293.0	4.187	0.662	16.1	406.1	0.415	5.70	643.5	3.58
80	1.013	971.8	335.0	4.195	0.669	16.3	355.1	0.365	6.32	625.9	2.23
90	1.013	965.3	377.0	4.208	0.676	16.5	314.9	0.326	6.95	607.2	1.97
100	1.013	958.4	419.1	4.220	0.684	16.8	282.5	0.295	7.52	588.6	1.75
110	1.43	951.0	461.4	4.233	0.685	17.0	259.0	0.272	8.08	569.0	1.60