

Министерство науки и высшего образования РФ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ЛЕСОТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ имени С. М. Кирова»

Кафедра промышленной энергетики

А. А. Куликов, кандидат технических наук, доцент

И. В. Иванова, кандидат технических наук, доцент

М. М. Иванов, старший преподаватель

В. А. Прохоров, ассистент

ТЕХНИЧЕСКАЯ ТЕРМОДИНАМИКА

АНАЛИЗ

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ
В ИДЕАЛЬНЫХ ГАЗОВЫХ СМЕСЯХ

Учебное пособие

для студентов бакалавриата всех форм обучения направления
подготовки 13.03.01 «Теплоэнергетика и теплотехника»
и других направлений

Санкт-Петербург
2021

Рассмотрено и рекомендовано к изданию
учебно-методической комиссией Ученого совета
Санкт-Петербургского государственного лесотехнического
университета имени С. М. Кирова

Отв. редактор
кандидат технических наук, доцент **А. А. Куликов**

Рецензенты:
кафедра теплосиловых установок и тепловых двигателей СПбГУПТД
(зав. кафедрой кандидат технических наук, доцент **В. Г. Злобин**),
кандидат технических наук, доцент **И. Г. Русскова**
(Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого)

УДК 621.1

Куликов, А. А.

Техническая термодинамика. Анализ термодинамических процессов в идеальных газовых смесях: учебное пособие для студентов бакалавриата всех форм обучения направления подготовки 13.03.01 «Теплоэнергетика и теплотехника» и других направлений / А. А. Куликов, И. В. Иванова, М. М. Иванов, В. А. Прохоров. – Санкт-Петербург: СПбГЛТУ, 2021. – 60 с.

ISBN 978-5-9239-1239-5

Представлено кафедрой промышленной энергетики.

Учебное пособие предназначено для выполнения контрольной работы по дисциплине «Техническая термодинамика» студентами бакалавриата всех форм обучения направления подготовки 13.03.01 «Теплоэнергетика и теплотехника» согласно рабочей программе и других направлений. Контрольная работа состоит из двух заданий. Для выполнения заданий учебное пособие содержит полное теоретическое обоснование необходимой расчетной части. Также подробно изложены требования к оформлению контрольной работы. Учебное пособие рекомендуется для самостоятельной работы и студентам других направлений.

Табл. 9. Ил. 4. Библиогр. 6 назв.

Темплан 2021 г. Изд. № 132.
ISBN 978-5-9239-1239-5

© СПбГЛТУ, 2021

ВВЕДЕНИЕ

В рамках рабочей программы всех форм обучения по направлению подготовки 13.03.01 «Теплоэнергетика и теплотехника» и других специальностей предусматривается выполнение контрольной работы, состоящей из двух последовательно решаемых задач. Учебное пособие рекомендуется для самостоятельной работы и студентам других направлений.

В первом задании требуется рассчитать основные термодинамические характеристики газовой смеси заданного состава.

Во втором задании требуется рассчитать параметры и характеристики кругового процесса, реализуемого в газовой смеси из задания № 1.

Контрольная работа должна иметь титульный лист, (название вуза и института, направление, курс, группа, Ф.И.О. и номер зачетной книжки студента, номер варианта контрольной работы), приложение 1, а также задание на контрольную работу, приложение 2, содержание и текст, структурированный в соответствии с содержанием, выводы по практическим заданиям приводятся после каждого выполненного задания и в конце список использованной литературы, в который необходимо включать только те учебники, учебные пособия, монографии, ГОСТы (при необходимости) и прочее, которые действительно были использованы при выполнении контрольной работы.

Контрольная работа оформляется на компьютере или пишется на листах А4, вложенных в папку с файлами, и скрепляется. Основные требования к оформлению: шрифт Times New Roman; размер – 14 кегль; межстрочный интервал 1,5; первая строка – отступ 1,25 см; выравнивание по ширине; размер полей – верхнее 2,0 см; нижнее – 2,0 см; левое – 3,0 см; правое – 1,5 см. Перед оформлением контрольной работы ознакомиться с указаниями по оформлению контрольной работы (приложение 3) и придерживаться рекомендаций.

Все теоретические положения и формулы, необходимые для расчетов, подробно в исчерпывающем объеме изложены в [1; 2].

При решении заданий № 1 и № 2 дать помимо теоретической справки подробное решение с обоснованием всех принятых и используемых величин, а если надо то и сформулировать принятое техническое решение, а также написать выводы после каждого выполненного задания. Работа проводится *с использованием* вспомогательных информационных источников.

Преподаватель в случае необходимости может провести со студентом собеседование по его контрольной работе.

Контрольная работа считается выполненной и зачтенной, если студент полностью раскрыл содержание теоретического вопроса и правильно выполнил все практические расчеты. Все расчеты должны быть выполнены в системе СИ. При оценке контрольной работы учитывается правильность ее оформления.

Контрольная работа должна отразить собственное понимание студентом существа вопроса, способность самостоятельно использовать источники, умение увязывать теоретические положения с их практическим применением, обосновывать технические решения и формулировать выводы.

Контрольная работа № 1

КОНТРОЛЬНОЕ ЗАДАНИЕ № 1 Расчет характеристик газовой смеси

1.1. Исходные данные, условия, расчетные задания

Газовая смесь при нормальных условиях (н.у.), то есть при нормальной температуре $T_n = 273,15$ К и нормальном давлении $p_n = 101\,325$ Па, имеет объем $V_{см}, м^3$.

Химический состав смеси задан объемными процентами компонентов, входящих в смесь:

$$CO_2; CO; H_2O; O_2; N_2; H_2, \text{ об } \%$$

В изобарном процессе за счет подвода теплоты смесь нагревается от начальной температуры t_1 до конечной $t_2, ^\circ C$.

Значения индивидуальных исходных данных выбираются студентами из табл. 1 «Исходные данные к заданию № 1» по двум последним цифрам шифра (номеру зачетной книжки).

В задании требуется рассчитать следующие величины:

- 1) плотность смеси $\rho_{см}, кг/м^3$;
- 2) массу смеси $M_{см}, кг$;
- 3) приведенные объемы компонентов смеси при н.у.:

$$V_{CO_2}, V_{CO}, V_{H_2O}, V_{O_2}, V_{N_2}, V_{H_2}, м^3;$$

- 4) массовые доли компонентов смеси:

$$g_{CO_2}, g_{CO}, g_{H_2O}, g_{O_2}, g_{N_2}, g_{H_2};$$

- 5) массу каждого компонента смеси:

$$M_{CO_2}, M_{CO}, M_{H_2O}, M_{O_2}, M_{N_2}, M_{H_2}, кг;$$

- 6) газовую постоянную смеси $R_{см}, Дж/(кг \cdot K)$;
- 7) кажущуюся (среднюю) молярную массу смеси $\mu_{см}, кг/моль$;
- 8) парциальные давления компонентов смеси:

$$p_{CO_2}, p_{CO}, p_{H_2O}, p_{O_2}, p_{N_2}, p_{H_2}, Па;$$

- 9) число молей смеси $\nu_{см}, моль$;

Таблица 1

Исходные данные к заданию № 1

Последняя цифра шифра	Химический состав смеси, объемные %*						Предпоследняя цифра шифра	Интервал температур		Объем смеси $V_{см}$, нм ³
	CO ₂	CO	H ₂ O	O ₂	N ₂	H ₂		t_1 , °C	t_2 , °C	
<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>	<i>7</i>	<i>8</i>	<i>9</i>	<i>10</i>	<i>12</i>
0	7	2	15	6	70	—	0	100	500	9
1	8	1	17	—	69	5	1	200	600	8
2	9	2	19	2	68	—	2	300	700	7
3	5	—	20	3	66	6	3	400	800	6
4	—	1	21	4	67	7	4	500	900	5
5	6	—	16	5	65	8	5	600	500	4
6	10	2	17	7	64	—	6	700	400	3
7	11	1	25	—	60	3	7	800	300	2
8	12	—	15	8	63	2	8	900	200	10
9	4	1	18	5	72	—	9	1000	100	11

Примечание: Объемные проценты компонентов определяются путем умножения объемных долей на 100. Например, для водорода: $H_2 = r_{H_2} \cdot 100, \text{об.}\%$, где r_{H_2} – объемная доля водорода, $r_{H_2} = \frac{V_{H_2}}{V_{см}}$, (безразмерная величина); V_{H_2} – приведенный объем водорода в смеси, нм³; $V_{см}$ – объем смеси, нм³.

Приведенный объем i -го компонента газовой смеси V_i – это объем, который один этот компонент мог бы занимать при условии, что его давление и температура будут равны давлению и температуре всей газовой смеси.

10) число молей каждого компонента:

$$V_{CO_2}, V_{CO}, V_{H_2O}, V_{O_2}, V_{N_2}, V_{H_2}, \text{ МОЛЬ};$$

11) рассчитать двумя способами плотность каждого компонента:

$$\rho_{CO_2}, \rho_{CO}, \rho_{H_2O}, \rho_{O_2}, \rho_{N_2}, \rho_{H_2}, \text{ КГ/М}^3,$$

(исходя из определения плотности и из следствия закона Авогадро при н.у.);

12) в интервале от t_1 до t_2 рассчитать значения средних удельных теплоемкостей смеси

- изобарные: массовую $(c_{pm_{см}})_{t_1}^{t_2}$, кДж/(кг · К); объемную $(c'_{pm_{см}})_{t_1}^{t_2}$, Дж/(нм³ · К); мольную $(\mu c_{pm_{см}})_{t_1}^{t_2}$, Дж/(моль · К);
- изохорные: массовую $(c_{vm_{см}})_{t_1}^{t_2}$, кДж/(кг · К); объемную $(c'_{vm_{см}})_{t_1}^{t_2}$, Дж/(нм³ · К); мольную $(\mu c_{vm_{см}})_{t_1}^{t_2}$, Дж/(моль · К);

13) по полученным значениям средних удельных массовых теплоемкостей рассчитать значение показателя адиабаты k ;

14) для изобарного процесса, в котором температура смеси меняется от t_1 до t_2 , рассчитать теплоту процесса Q , Дж.

1.2. Некоторые общие теоретические сведения

1.2.1. Смеси идеальных газов

В технике часто расчеты проводятся не для чистых газов, а для газовых смесей.

Смесь идеальных газов можно рассматривать как идеальный газ, для которого уравнение состояния записывается в виде:

$$p_{см} \cdot v_{см} = R_{см} \cdot T_{см} \text{ или } p_{см} \cdot v_{см} = \frac{R_{\mu}}{\mu_{см}} \cdot T_{см}, \quad (1)$$

где $p_{см}$, $v_{см}$ и $T_{см}$ – параметры состояния смеси – абсолютное давление, удельный объем и температура, соответственно, Па, м³/кг, К; $R_{см}$ – газовая постоянная смеси, Дж/(моль · К); R_{μ} – универсальная газовая постоянная, $R_{\mu} = 8,314$ Дж/(моль · К); $\mu_{см}$ – кажущаяся молярная масса смеси, кг/моль.

Чтобы иметь возможность проводить расчеты с использованием уравнения (1), необходимо знать значения величин $R_{см}$, $\mu_{см}$.

Эти значения рассчитываются по известному химическому составу газовой смеси, который по условиям задачи всегда задан. (На практике он определяется с помощью газоанализатора.)

1.2.2. Парциальные давления в газовой смеси.

Закон Дальтона

Газовая смесь находится в состоянии равновесия, если концентрации компонентов и ее параметры состояния во всем объеме имеют одинаковые значения. При этом температура всех газов, входящих в смесь, одинакова и равна температуре смеси $T_{см}$.

В равновесном состоянии молекулы каждого газа рассеяны равномерно по всему объему смеси, то есть имеют свою определенную концентрацию и, следовательно, свое давление p_i , Па, которое называется *парциальным*. Оно определяется следующим образом.

Парциальное давление равно давлению данного компонента при условии, что он один занимает весь объем, предназначенный для смеси при температуре смеси $T_{см}$.

По закону английского химика и физика Дальтона, сформулированному в 1801 г., давление смеси идеальных газов $p_{см}$ равно сумме парциальных давлений ее компонентов p_i :

$$p_{см} = \sum_{i=1}^n p_i, \quad (2)$$

где n – число компонентов.

Выражение (2) также называется *законом парциальных давлений*.

1.2.3. Приведенный объем компонента газовой смеси.

Закон Амага

По определению, приведенным объемом i -го компонента газовой смеси V_i , м³, называется объем, который один этот компонент мог бы занимать при условии, что его давление и температура будут равны давлению и температуре всей газовой смеси.

Закон французского физика Амага, сформулированный примерно в 1870 г., гласит: сумма приведенных объемов всех компонентов смеси равна объему смеси $V_{см}$:

$$\sum_{i=1}^n V_i = V_{см}, \text{ м}^3. \quad (3)$$

1.2.4. Химический состав газовой смеси

Химический состав газовой смеси может задаваться *тремя различными* способами.

Рассмотрим газовую смесь, состоящую из n компонентов. Смесь занимает объем $V_{\text{см}}$, м³, имеет массу $M_{\text{см}}$, кг, давление $p_{\text{см}}$, Па, и температуру $T_{\text{см}}$, К. Также число молей смеси равно $\nu_{\text{см}}$, моль. При этом масса одного i -го компонента m_i , кг, а число молей этого компонента ν_i , моль.

Очевидно, что:

$$M_{\text{см}} = \sum_{i=1}^n m_i, \quad (4)$$

$$\nu_{\text{см}} = \sum_{i=1}^n \nu_i. \quad (5)$$

Используя для рассматриваемой смеси закон Дальтона (2) и Амага (3), можно записать:

$$p_{\text{см}} = \sum_{i=1}^n p_i, \quad (6)$$

$$V_{\text{см}} = \sum_{i=1}^n V_i, \quad (7)$$

где p_i – парциальное давление i -го компонента, Па; V_i – приведенный объем i -го компонента, м³.

Однозначно химический состав газовой смеси может быть задан либо массовыми, либо мольными, либо объемными долями ее компонентов:

$$g_i = \frac{m_i}{M_{\text{см}}}, \quad (8)$$

$$k_i = \frac{\nu_i}{\nu_{\text{см}}}, \quad (9)$$

$$r_i = \frac{V_i}{V_{\text{см}}}, \quad (10)$$

где g_i , k_i и r_i – массовая, мольная и объемная доли i -го компонента смеси соответственно (безразмерные величины).

Очевидно, что:

$$\sum_{i=1}^n g_i = 1, \quad \sum_{i=1}^n k_i = 1, \quad \sum_{i=1}^n r_i = 1. \quad (11)$$

Часто на практике химический состав смеси задается не долями i -го компонента, а его процентами.

Например, в теплотехнике приближенно принимается, что сухой воздух состоит из 79 объемных процентов азота и 21 объемного процента кислорода.

Процент i -го компонента в смеси вычисляется путем умножения его доли на 100.

Для примера с сухим воздухом будем иметь:

$$N_2 = r_{N_2} \cdot 100 = 79 \% , \quad O_2 = r_{O_2} \cdot 100 = 21 \% , \quad (12)$$

где r_{N_2} и r_{O_2} – объемные доли азота и кислорода в сухом воздухе; N_2 и O_2 – обозначение объемных процентов азота и кислорода соответственно, % (об.).

Примечание:

1) Мольные доли идеальной смеси численно равны объемным долям: $k_i = r_i$. Докажем это.

Пользуясь определением объемной доли (10) и законом Амага (3), можем записать:

$$r_i = \frac{V_i}{V_{\text{см}}} = \frac{v_i V_i^1}{\sum_{i=1}^n V_i} = \frac{v_i \cdot V_i^1}{\sum_{i=1}^n v_i \cdot V_i^1} , \quad (13)$$

где V_i – приведенный объем i -го компонента, м³; v_i – число молей i -го компонента, моль; V_i^1 – объем одного моля i -го компонента при давлении смеси $p_{\text{см}}$ и температуре смеси $T_{\text{см}}$, м³/моль.

Из закона Авогадро [1] следует, что при одинаковых температуре и давлении один моль любого газа (компонента смеси) занимает один и тот же объем. В частности, при $T_{\text{см}}$ и $p_{\text{см}}$ это будет некоторый объем V^1 , м³.

Сказанное позволяет записать равенство:

$$V_i^1 = V^1 . \quad (14)$$

Подставляя (14) в (13), получаем требуемое:

$$r_i = \frac{v_i \cdot V^1}{V^1 \cdot \sum_{i=1}^n v_i} = \frac{v_i}{\sum_{i=1}^n v_i} = k_i . \quad (15)$$

2) Объемные доли компонентов газовой смеси можно рассчитать, зная их парциальные давления. Покажем это.

Рассмотрим i -й компонент идеальной газовой смеси в двух различных состояниях: когда он находится при своем парциальном давлении p_i ; когда он занимает свой приведенный объем V_i .

Уравнение состояния идеального газа справедливо для любых его состояний, в частности, и для двух, названных выше.

В соответствии с этим, и учитывая определение удельного объема, можем записать:

$$p_i \cdot \frac{V_{\text{см}}}{m_i} = R_i \cdot T_{\text{см}}, \quad (16)$$

и

$$p_{\text{см}} \cdot \frac{V_i}{m_i} = R_i \cdot T_{\text{см}}, \quad (17)$$

где R_i – газовая постоянная i -го компонента смеси, Дж/(кг · К).

После деления обеих частей (16) и (17) друг на друга получаем требуемое доказательство:

$$\frac{p_i}{p_{\text{см}}} = \frac{V_i}{V_{\text{см}}} = r_i. \quad (18)$$

Из (18) видно, что парциальные давления компонентов смеси можно рассчитать по ее химическому составу, при известном общем давлении смеси $p_{\text{см}}$:

$$p_i = r_i \cdot p_{\text{см}}. \quad (19)$$

1.2.5. Газовая постоянная идеальной газовой смеси

Как известно, каждый компонент в газовой смеси находится под своим парциальным давлением p_i и при температуре смеси $T_{\text{см}}$.

Для каждого компонента, находящегося в таком состоянии, можно записать уравнение состояния идеального газа в виде:

$$\begin{aligned} p_1 \cdot V_{\text{см}} &= m_1 \cdot R_1 \cdot T_{\text{см}}, \\ p_2 \cdot V_{\text{см}} &= m_2 \cdot R_2 \cdot T_{\text{см}}, \\ &\dots\dots\dots \\ p_n \cdot V_{\text{см}} &= m_n \cdot R_n \cdot T_{\text{см}}. \end{aligned} \quad (20)$$

После суммирования всех левых и правых частей равенств, входящих в (20), получаем:

$$\sum_{i=1}^n p_i \cdot V_{\text{см}} = \sum_{i=1}^n m_i \cdot R_i \cdot T_{\text{см}}. \quad (21)$$

После элементарных преобразований из (21) следует:

$$V_{\text{см}} \cdot \sum_{i=1}^n p_i = m_{\text{см}} \cdot T_{\text{см}} \cdot \sum_{i=1}^n \left(\frac{m_i}{m_{\text{см}}} \right) \cdot R_i. \quad (22)$$

Учитывая закон Дальтона (2) и определение массовой доли (8), можем записать:

$$p_{\text{см}} \cdot V_{\text{см}} = m_{\text{см}} \cdot T_{\text{см}} \cdot \sum_{i=1}^n g_i \cdot R_i. \quad (23)$$

Чтобы (23) соответствовало уравнению идеального газа [см. формулу (1)], остается только ввести обозначение:

$$\sum_{i=1}^n g_i \cdot R_i = R_{\text{см}}. \quad (24)$$

Формула (24) показывает, что газовая постоянная идеальной газовой смеси может быть рассчитана по ее химическому составу, конкретно, по массовым долям компонентов.

Так как известно, что $R_i = \frac{R_{\mu}}{\mu_i}$ (см. п. 2.4 прил. 2 [1]), то из (24) можно получить:

$$R_{\text{см}} = \sum_{i=1}^n g_i \cdot \frac{R_{\mu}}{\mu_i} = R_{\mu} \cdot \sum_{i=1}^n \frac{g_i}{\mu_i}. \quad (25)$$

1.2.6. Кажущаяся молярная масса идеальной газовой смеси

По определению, кажущаяся молярная масса смеси $\mu_{\text{см}}$ – это величина, которая определяется путем деления массы смеси $M_{\text{см}}$, кг, на число молей смеси $\nu_{\text{см}}$, моль:

$$\mu_{\text{см}} = \frac{M_{\text{см}}}{\nu_{\text{см}}}. \quad (26)$$

Рассчитать значение $\mu_{\text{см}}$ можно по ее химическому составу:

$$\mu_{\text{см}} = \frac{M_{\text{см}}}{\nu_{\text{см}}} = \frac{\sum_{i=1}^n m_i}{\nu_{\text{см}}} = \frac{\sum_{i=1}^n \mu_i \cdot \nu_i}{\nu_{\text{см}}} = \sum_{i=1}^n \mu_i \cdot \frac{\nu_i}{\nu_{\text{см}}} = \sum_{i=1}^n \mu_i \cdot k_i = \sum_{i=1}^n \mu_i \cdot r_i, \quad (27)$$

где μ_i – молярная масса i -го компонента идеальной газовой смеси, кг/моль; r_i – объемная доля i -го компонента.

Полученная путем очевидных преобразований формула (27) показывает, как кажущаяся молярная масса вычисляется через объемные доли компонентов – по химическому составу смеси.

Подобным образом можно получить формулу для вычисления $\mu_{\text{см}}$ через массовые доли. Для этого из (5), с учетом (26), получим равенство:

$$\nu_{\text{см}} = \sum_{i=1}^n \nu_i = \sum_{i=1}^n \frac{m_i}{\mu_i} = \frac{M_{\text{см}}}{\mu_{\text{см}}}. \quad (28)$$

Преобразуем (28) к виду:

$$\frac{1}{\mu_{\text{см}}} = \frac{1}{M_{\text{см}}} \cdot \sum_{i=1}^n \frac{m_i}{\mu_i} = \sum_{i=1}^n \frac{(m_i / M_{\text{см}})}{\mu_i} = \sum_{i=1}^n \frac{g_i}{\mu_i}. \quad (29)$$

Из (29) получаем искомую формулу:

$$\mu_{\text{см}} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{g_i}{\mu_i}}. \quad (30)$$

Примечание:

Подставляя (27) и (30) в уравнение состояния идеально-газовой смеси, получаем:

$$p_{\text{см}} \cdot v_{\text{см}} = R_{\text{см}} \cdot T_{\text{см}} = \frac{R_{\mu}}{\mu_{\text{см}}} \cdot T_{\text{см}} = \frac{R_{\mu}}{\sum_{i=1}^n \mu_i \cdot r_i} \cdot T_{\text{см}} = R_{\mu} \cdot \sum_{i=1}^n \frac{g_i}{\mu_i} \cdot T_{\text{см}}. \quad (31)$$

Из (31) следует, что $R_{\text{см}}$ можно вычислять по известным массовым g_i или объемным r_i долям компонентов:

$$R_{\text{см}} = R_{\mu} \cdot \sum_{i=1}^n \frac{g_i}{\mu_i} = R_{\mu} \cdot \frac{1}{\sum_{i=1}^n \mu_i \cdot r_i}. \quad (32)$$

1.2.7. Удельный объем или плотность газовой смеси

По определению, удельный объем газовой смеси $v_{\text{см}}$ является обратной величиной ее плотности $\rho_{\text{см}}$, которая может быть рассчитана по ее химическому составу. Получим расчетные формулы путем очевидных преобразований определения плотности смеси, как отношение ее массы к объему:

$$\rho_{\text{см}} = \frac{M_{\text{см}}}{V_{\text{см}}} = \frac{1}{V_{\text{см}}} \cdot \sum_{i=1}^n m_i = \frac{1}{V_{\text{см}}} \cdot \sum_{i=1}^n \rho_i \cdot V_i = \sum_{i=1}^n \rho_i \cdot \frac{V_i}{V_{\text{см}}} = \sum_{i=1}^n \rho_i \cdot r_i, \quad (33)$$

где ρ_i – плотность i -го компонента смеси, находящегося при давлении смеси $p_{\text{см}}$ и температуре смеси $T_{\text{см}}$, кг/м³; V_i – приведенный объем i -го компонента смеси, м³; r_i – объемная доля i -го компонента.

При других преобразованиях получаем:

$$\rho_{\text{см}} = \frac{M_{\text{см}}}{V_{\text{см}}} = \frac{M_{\text{см}}}{\sum_{i=1}^n V_i} = \frac{M_{\text{см}}}{\sum_{i=1}^n \frac{m_i}{\rho_i}} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{m_i / M_{\text{см}}}{\rho_i}} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{g_i}{\rho_i}}. \quad (34)$$

Формулы (33) и (34) позволяют рассчитать плотность газовой смеси, а значит и ее удельный объем по ее химическому составу, заданному в объемных и массовых долях соответственно.

1.2.8. Соотношение между массовыми и объемными долями идеальной газовой смеси

Из определений (8) и (10) и формулы (27) путем применения очевидных преобразований можно получить следующие формулы для пересчета массовых и объемных долей идеальной газовой смеси друг в друга.

Для массовых долей будем иметь:

$$g_i = \frac{m_i}{m_{\text{см}}} = \frac{\mu_i \cdot v_i}{\mu_{\text{см}} \cdot N_{\text{см}}} = \frac{\mu_i \cdot \frac{v_i}{N_{\text{см}}}}{\mu_{\text{см}}} = \frac{\mu_i \cdot k_i}{\mu_{\text{см}}} = \frac{\mu_i \cdot r_i}{\sum_{i=1}^n \mu_i \cdot r_i}. \quad (35)$$

Для объемных долей:

$$r_i = \frac{V_i}{V_{\text{см}}} = k_i = \frac{v_i}{N_{\text{см}}} = \frac{v_i}{\sum_{i=1}^n v_i} = \frac{\left(\frac{m_i}{\mu_i}\right)}{\sum_{i=1}^n \left(\frac{m_i}{\mu_i}\right)}. \quad (36)$$

После умножения и числителя и знаменателя (36) на $\left(\frac{1}{m_{\text{см}}}\right)$, получим искомую формулу:

$$r_i = \frac{\left(\frac{m_i}{\mu_i} \cdot \frac{1}{m_{\text{см}}}\right)}{\sum_{i=1}^n \left(\frac{m_i}{\mu_i} \cdot \frac{1}{m_{\text{см}}}\right)} = \frac{\left(\frac{g_i}{\mu_i}\right)}{\sum_{i=1}^n \left(\frac{g_i}{\mu_i}\right)}. \quad (37)$$

1.2.9. Понятие теплоемкости. Теплоемкость газовой смеси

В термодинамике теплоемкость веществ определяется для всех агрегатных состояний: твердого, жидкого и газообразного. Например, у воды теплоемкость жидкой фазы примерно в два раза больше, чем газовой – когда вода находится в виде пара.

Строго говоря, под **теплоемкостью** термодинамической системы следует понимать ее энергоемкость в процессах, когда энергия к ней подводится в форме теплоты (по механизму теплообмена).

Забегая вперед, отметим, что теплоемкости всех веществ, значимых для техники, экспериментально определены и их значения приводятся в

справочной литературе. Знание теплоемкости вещества необходимо, главным образом для того, чтобы иметь возможность рассчитывать теплоту, которую необходимо подвести к веществу, чтобы нагреть его до определенной температуры, или отвести от вещества, при его охлаждении.

Если к некоторому количеству вещества массой M , кг, подвести теплоту в количестве ΔQ , Дж, то его температура возрастет от начальной T_1 до конечной T_2 , К.

Определение:

Отношение $\frac{\Delta Q}{T_2 - T_1}$ называется **средней теплоемкостью C_m** в данном процессе в интервале температур от T_1 до T_2 :

$$C_m = \frac{\Delta Q}{T_2 - T_1}, \text{ Дж/К.} \quad (38)$$

Из опытов известно, что в **различных** процессах для нагрева одного и того же вещества в одном и том же интервале температур требуются **различные** количества теплоты. Например, при нагреве газа при постоянном давлении теплоты потребуется больше, чем при его нагреве при постоянном объеме. Это означает, что теплоемкость зависит от вида процесса, в котором осуществляется нагрев.

Как будет показано ниже, наибольшее практическое значение имеют теплоемкости вещества, определяемые в двух процессах: при постоянном удельном объеме $v = \text{const}$; при постоянном абсолютном давлении $p = \text{const}$.

Чаще всего в теплотехнических расчетах пользуются удельными массовыми теплоемкостями.

Формула для определения **средней удельной массовой** теплоемкости c_m в диапазоне температур от T_1 до T_2 получается из (38) путем деления обеих частей равенства на массу вещества M :

$$\frac{C_m}{M} = c_m = \frac{\Delta Q / M}{T_2 - T_1} = \frac{\Delta q}{T_2 - T_1}, \quad \text{или} \quad c_m = \frac{\Delta q}{T_2 - T_1}, \text{ Дж/(кг}\cdot\text{К)}, \quad (39)$$

где Δq – теплота, которую необходимо подвести к 1 кг вещества, чтобы изменить его температуру от T_1 до T_2 , Дж/кг.

Примечание:

1) По своему физическому смыслу средняя удельная массовая теплоемкость – численно равна количеству теплоты, которую необходимо подвести к 1 кг вещества, чтобы нагреть его на один градус.

2) Помимо удельных массовых в расчетах используются также удельные объемные и удельные молярные теплоемкости (подробнее об этом см. прил. 5 [1]).

Средняя удельная теплоемкость является свойством конкретного вещества и для данного процесса зависит только от интервала температур $\Delta T = T_1 - T_2$, в котором определяется.

В термодинамике, для удобства расчетов, дополнительно вводится понятие *истинной* удельной массовой теплоемкости c , Дж/(кг · К).

Отличие в определении истинной теплоемкости от средней состоит только в том, что истинная определяется по тем же соотношениям (38) и (39), но при условии, что изменение температуры вещества в ходе процесса стремится к нулю: $(T_2 - T_1) = \Delta T \rightarrow 0$. То есть ширина интервала «стягивается» к точке T_1 . Следовательно, можно сказать, что истинная теплоемкость определяется не в интервале температур, а в точке – при одной какой-то температуре. Соответственно и зависеть она будет не от интервала температур как средняя, а просто от температуры – то есть будет являться непрерывной функцией температуры, так как при разных температурах, в общем случае, значение истинной теплоемкости будет разным.

Очевидно, что если в (39) знаменатель $(T_2 - T_1) = \Delta T$ стремится к нулю, то и числитель Δq также будет стремиться к нулю. Из высшей математики известно, что предел такого отношения равен производной от функции q , зависящей от T , по переменной T :

$$\lim_{\Delta T \rightarrow 0} \frac{\Delta q}{\Delta T} = \frac{dq}{dT} = c, \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К}). \quad (40)$$

Соотношение (40) можно считать **определением истинной удельной массовой теплоемкости**, по которому на базе экспериментальных данных определяются ее значения.

Соотношение (40) можно преобразовать к виду, удобному для расчета теплоты процесса:

$$dq = c(T) dT. \quad (41)$$

Если в результате процесса вещество, к примеру, нагревается от T_1 до T_2 , то после интегрирования (41) в соответствующих пределах получим:

$$q = \int_{T_1}^{T_2} c(T) dT, \quad (42)$$

где q – удельная теплота процесса, Дж/кг.

В термодинамике формулы (41) и (42) являются основными соотношениями для расчета удельной теплоты в различных процессах.

Очевидно, чтобы воспользоваться соотношением (42), необходимо знать функцию $c(T)$ для данного процесса.

Следует отметить, что, благодаря экспериментам, для всех веществ удельные теплоемкости при постоянном абсолютном давлении (в дальнейшем для краткости – при постоянном давлении) и при постоянном

удельном объеме (в дальнейшем для краткости – при постоянном объеме) известны. Их значения приводятся в справочной литературе в виде таблиц. Зависимость удельной истинной теплоемкости при постоянном давлении от температуры $c_p(T)$ для всех технически значимых веществ в твердой, жидкой и газовой фазах приводится в виде стандартной формулы:

$$c_p(T) = a_1 + a_2 T + \frac{a_3}{T^2}, \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К}), \quad (43)$$

где a_1 , a_2 и a_3 – известные коэффициенты, имеющие свое значение для каждого вещества; T – абсолютная температура, К.

1.2.10. Теплоемкость газов

У одного и того же газа значение теплоемкости, как уже отмечалось, зависит от вида процесса, в котором теплота к газу подводится.

В технике большую роль играют процессы, протекающие в газах при постоянном объеме $v = \text{const}$ и постоянном давлении $p = \text{const}$.

Средние и истинные удельные теплоемкости газа для этих процессов определяются в соответствии с (39) и (40) следующим образом:

$$c_{pm} = \frac{\Delta q_p}{T_2 - T_1}; \quad (44)$$

$$c_p = \frac{dq_p}{dT}; \quad (45)$$

$$c_{vm} = \frac{\Delta q_v}{T_2 - T_1}; \quad (46)$$

$$c_v = \frac{dq_v}{dT}, \quad (47)$$

где c_{pm} и c_p – удельные массовые теплоемкости газа при постоянном давлении, средняя, в интервале температур от T_1 до T_2 , и истинная соответственно, Дж/(кг·К); Δq_p и dq_p – удельные теплота и ее дифференциал в процессе нагрева газа при постоянном давлении от T_1 до T_2 , Дж/кг; c_{vm} и c_v – удельные массовые теплоемкости газа при постоянном объеме, средняя, в интервале температур от T_1 до T_2 , и истинная соответственно, Дж/(кг·К); Δq_v и dq_v – удельные теплота и ее дифференциал в процессе нагрева газа при постоянном объеме от T_1 до T_2 , Дж/кг.

Как было отмечено выше, в справочной литературе приводятся таблицы для c_{pm} и формулы типа (43) для c_p .

Также, благодаря экспериментам, для каждого газа известно значение так называемого **показателя адиабаты k** , который определяется как от-

ношение удельной теплоемкости при постоянном давлении к удельной теплоемкости при постоянном объеме:

$$k = \frac{c_p}{c_v}.$$

Например, для одноатомных газов $k = 1,67$, для двухатомных $k = 1,40$, а для трехатомных и многоатомных $k = 1,29$ (табл. П4.7). Таким образом, зная c_{pm} и c_p , а также k , всегда можно вычислить c_{vm} и c_v .

Замечание:

Строго говоря, удельная теплоемкость газа зависит от давления, при котором она определялась. Однако существенно эта зависимость проявляется при очень высоких давлениях, которые в обычных теплотехнических расчетах встречаются редко. То есть в большинстве случаев можно приближенно считать, что удельная теплоемкость не зависит от давления.

В технике часто встречаются процессы, когда в газе одновременно изменяются и давление, и объем.

Соответственно значение теплоемкости в таком общем случае нам неизвестно. Однако, забегаая вперед, отметим, что в термодинамике разработана теория политропного процесса, которая позволяет рассчитать теплоемкость для такого рода процессов.

Смесь идеальных газов, так же, как и однородные газы, характеризуется удельной теплоемкостью, которая рассчитывается по известному химическому составу смеси.

Примечание:

1) Изменение внутренней энергии любого идеального газа в любом равновесном процессе можно вычислить по его истинной удельной теплоемкости при постоянном объеме $c_v(T)$. Покажем это.

Внутренняя энергия, как уже отмечалось, является функцией состояния – непрерывной функцией параметров состояния. По определению дифференциала (бесконечно малого приращения) функции двух переменных можем записать:

$$du(v, T) = \left. \frac{\partial u}{\partial v} \right|_T dv + \left. \frac{\partial u}{\partial T} \right|_v dT, \quad (48)$$

где v и T – параметры состояния – удельный объем и абсолютная температура соответственно, $\text{м}^3/\text{кг}$, К ; $u(v, T)$ – удельная внутренняя энергия идеального газа, как функция переменных v и T , $\text{Дж}/\text{кг}$; $\left. \frac{\partial u}{\partial v} \right|_T$ и $\left. \frac{\partial u}{\partial T} \right|_v$ – частные

производные от внутренней энергии: по удельному объему, при постоянной температуре, и по температуре, при постоянном удельном объеме, соответственно, Дж/м³, Дж/(кг·К); dv и dT – дифференциалы удельного объема и температуры соответственно, м³/кг, К.

Экспериментально установлено, что внутренняя энергия идеальных газов не зависит от их удельного объема v м³/кг. Это означает, что первое слагаемое в (48) равно нулю, как производная, взятая от константы. Следовательно, из (48) получаем:

$$du(T) = \left. \frac{du}{dT} \right|_v dT. \quad (49)$$

Величина $\left. \frac{du}{dT} \right|_v$ характеризует изменение внутренней энергии идеального

газа в процессе при постоянном удельном объеме $v = \text{const}$. Для такого процесса $dv = 0$ (как дифференциал от константы). Соответственно первый закон термодинамики для такого процесса при постоянном v принимает вид:

$$du|_v = dq|_v - pdv = dq|_v. \quad (50)$$

С другой стороны, из определения (49) истинной удельной теплоемкости при постоянном объеме c_v получаем:

$$dq|_v = c_v dT|_v. \quad (51)$$

Сравнивая (50) и (51), будем иметь:

$$du|_v = c_v dT|_v, \text{ или } \left. \frac{du}{dT} \right|_v = c_v. \quad (52)$$

Подставляя (52) в (49), получаем формулу для вычисления изменения внутренней энергии идеального газа при любых процессах, когда, в общем случае, одновременно могут меняться и давление, и удельный объем:

$$du = c_v dT. \quad (53)$$

Изменение удельной внутренней энергии идеального газа в некотором процессе 1 – 2 определяется путем интегрирования (53) в соответствующих пределах:

$$u_2 - u_1 = \int_{T_1}^{T_2} c_v \cdot dT, \quad (54)$$

где T_1 и T_2 – начальная и конечная температуры идеального газа соответственно, К.

Формула (54) показывает, что рассчитать изменение внутренней энергии идеального газа в любом процессе можно по известной истинной удельной теплоемкости этого газа при постоянном объеме.

2) У идеальных газов удельные теплоемкости связаны между собой соотношением:

$$c_p - c_v = R, \quad (55)$$

где c_p и c_v – удельные теплоемкости при постоянном давлении и при постоянном объеме соответственно (это могут быть либо истинные, либо средние теплоемкости), Дж/(кг · К); R – газовая постоянная данного идеального газа, Дж/(кг · К).

Докажем справедливость (55), опираясь на первый закон термодинамики и свойство идеальных газов (53):

$$dq = du + p dv = c_v dT + p dv. \quad (56)$$

По правилам вычисления дифференциала от произведения имеем:

$$d(pv) = p \cdot dv + v \cdot dp. \quad (57)$$

Выражаем из (57) $(p dv)$ и подставляем в (56), учитывая, что $pv = RT$:

$$dq = c_v dT + d(R \cdot T) - v dp = (c_v + R) dT - v dp. \quad (58)$$

Выражение (58) справедливо для любых процессов.

Далее будем рассматривать только процессы при постоянном давлении $p = \text{const}$, а значит $dp = 0$. Для такого процесса (58) принимает вид:

$$dq = (c_v + R) dT. \quad (59)$$

С другой стороны, для такого процесса из определения c_p – истинной удельной теплоемкости при постоянном давлении (45) следует:

$$dq = c_p dT. \quad (60)$$

После сравнения (59) и (60) получаем:

$$c_p = c_v + R \text{ или } c_p - c_v = R. \quad (61)$$

Выражение (61) впервые было получено немецким врачом Майером в 1824 г. и называется **соотношением Майера**. Из него следует, что газовая постоянная некоторого идеального газа (например, азота) равна разности между его удельными теплоемкостями при постоянном давлении и при постоянном объеме.

1.3. Методические указания по решению задания № 1

1.3.1. Вначале определяются массовые доли заданной газовой смеси (табл. 1), используя формулы табл. 2.

Соотношение для расчета смесей идеальных газов

Расчет смеси	Способ задания смеси	
	массовыми долями (g_i)	объемными долями (r_i)
Определение долей	$g_i = \frac{M_i}{M_{\text{см}}},$ <p>где M_i – масса данного (i-го) компонента, кг; $M_{\text{см}}$ – масса всей смеси, кг. При этом: $M_1 + M_2 + \dots + M_i = M_{\text{см}};$ $\sum_{i=1}^n g_i = 1$</p>	$r_i = \frac{V_i}{V_{\text{см}}},$ <p>где V_i – приведенный объем данного (i-го) компонента, м³; $V_{\text{см}}$ – объем всей смеси, м³. При этом: $\sum_{i=1}^n V_i = V_{\text{см}}; \sum_{i=1}^n r_i = 1$</p>
Формула перехода	$r_i = \frac{\frac{g_i}{\mu_i}}{\sum_{i=1}^n \frac{g_i}{\mu_i}}$	$g_i = \frac{r_i \cdot \mu_i}{\sum_{i=1}^n r_i \cdot \mu_i}$
Парциальное давление компонентов	$p_i = \frac{g_i \cdot R_i}{R_{\text{см}}} \cdot p_{\text{см}}$	$p_i = r_i \cdot p_{\text{см}}$
Удельный объем смеси	$v_{\text{см}} = \sum_{i=1}^n \frac{g_i}{\rho_i}$	$v_{\text{см}} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n r_i \cdot \rho_i}$
Плотность смеси	$\rho_{\text{см}} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{g_i}{\rho_i}}$	$\rho_{\text{см}} = \sum_{i=1}^n r_i \cdot \rho_i$
Средняя молярная масса смеси	$\mu_{\text{см}} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{g_i}{\mu_i}}$	$\mu_{\text{см}} = \sum_{i=1}^n r_i \cdot \mu_i$
Газовая постоянная смеси	$R_{\text{см}} = \sum_{i=1}^n g_i \cdot R_i$	$R_{\text{см}} = \frac{8,314}{\sum_{i=1}^n r_i \cdot \mu_i}$
Теплоемкость смеси	$c_{\text{см}} = \sum_{i=1}^n g_i \cdot c_i$	$c'_{\text{см}} = \sum_{i=1}^n r_i \cdot c'_i;$ $\mu c_{\text{см}} = \sum_{i=1}^n r_i \cdot \mu c_i$

Примечание: В табл. 2 приняты следующие обозначения:

- g_i и r_i – массовые и объемные доли соответственно;
- μ_i – молярная масса компонента, кг/моль;
- $\mu_{см}$ – молярная масса смеси, кг/моль;
- p_i и $p_{см}$ – давление компонента и смеси соответственно, Па;
- R_i и $R_{см}$ – газовая постоянная компонента и смеси соответственно, Дж/(кг · К);
- ρ_i и $\rho_{см}$ – плотность компонента и смеси соответственно, кг/м³;
- c_i , c'_i и μc_i – массовая [кДж/(кг · К)], объемная [кДж/(нм³ · К)] и молярная [Дж/(моль · К)] теплоемкости компонента;
- $c_{см}$, $c'_{см}$ и $\mu c_{см}$ – массовая, кДж/(кг · К), объемная, кДж/(нм³ · К) и молярная, Дж/(моль · К), теплоемкости смеси соответственно.

1.3.2. Используя значения молярных масс компонентов (используя таблицу Менделеева), рассчитываются их газовые постоянные по формуле

$$R_i = \frac{8,314}{\mu_i}, \text{ Дж/(кг · К)}, \quad (62)$$

где μ_i – молярная масса, кг/моль (табл. П4.5).

1.3.3. Газовая постоянная, средняя молярная масса смеси, парциальные давления компонентов определяются через объемные доли по формулам табл. 2.

1.3.4. Смеси идеальных газов обладают свойствами идеального газа, т. е. они подчиняются всем газовым законам [1]. Масса смеси выражается из уравнения Клапейрона для смеси газа:

$$p_{см} V_{см} = M_{см} R_{см} T_{см}, \quad (63)$$

где $p_{см}$ и $T_{см}$ – абсолютное давление, Па, и температура, К, смеси при нормальных условиях; $V_{см}$ – объем смеси, м³ (табл. 1); $M_{см}$ – масса смеси, кг; $R_{см}$ – газовая постоянная смеси, Дж/(кг · К).

1.3.5. Через рассчитанные ранее массовые доли находим массы компонентов и их приведенные объемы при заданном объеме смеси $V_{см}$.

1.3.6. Рассчитывается число молей в смеси (молярные доли компонентов численно равны объемным долям, т. е. $k_i = r_i$) из формулы

$$M_{см} = v_{см} \cdot \mu_{см}, \text{ кг}. \quad (64)$$

Примечание: По определению объемной доли i -го компонента газовой смеси формулу (15) можно записать (см. п. 1.2.4):

$$r_i = \frac{V_i}{V_{\text{см}}} = \frac{V_i}{\sum_{i=1}^N V_i} = \frac{v_i \cdot V_i^1}{\sum_{i=1}^N v_i \cdot V_i^1}, \quad (65)$$

где v_i – число молей i -го компонента в смеси, моль; V_i^1 – объем одного моля i -го компонента при условии, что он находится при температуре смеси $T_{\text{см}}$ и давлении $p_{\text{см}}$.

Равенство $V_{\text{см}} = \sum_{i=1}^N V_i$ определяется законом Амага.

Из закона Авогадро известно, что при одинаковых температуре и давлении 1 моль любого компонента смеси занимает один и тот же объем V^1 . То есть в (65) можно записать $V_i^1 = V^1$, из чего следует согласно (13):

$$r_i = \frac{v_i \cdot V^1}{V^1 \cdot \sum_{i=1}^N v_i} = \frac{v_i}{\sum_{n=1}^N v_n} = \frac{v_i}{v_{\text{см}}} = k_i, \quad (66)$$

где $v_{\text{см}}$ – число молей всей смеси, моль; k_i – мольная доля i -го компонента смеси.

Таким образом, благодаря (66) установлено, что объемные доли компонентов смеси идеальных газов всегда численно равны их мольным долям.

1.3.7. Плотность компонентов при нормальных условиях определяется по выражению (определение плотности):

$$\rho_i = \frac{M_i}{V_i}, \text{ кг/нм}^3, \quad (67)$$

где M_i , V_i – массы, кг, и приведенные объемы, нм³, соответствующих компонентов газовой смеси.

Значения плотности компонентов ρ_i , вычисленные по соотношению (67), проверяются по формуле [1], (эта формула вытекает из закона Авогадро):

$$\rho_i = \frac{\mu_i}{22,4 \cdot 10^{-3}}, \text{ кг/нм}^3. \quad (68)$$

1.3.8. Через известные массовые или объемные доли находится плотность смеси при нормальных условиях по выражениям табл. 2 (эта формула следует из определения удельного объема):

$$\rho_{\text{см}} = \frac{1}{v_{\text{см}}}, \text{ кг/нм}^3. \quad (69)$$

Значение плотности смеси $\rho_{см}$, вычисленное по соотношению (69), проверяется по формулам табл. 2 по заданному химическому составу смеси:

$$\rho_{см} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{g_i}{\rho_i}}, \text{ кг/нм}^3 \quad (70)$$

или

$$\rho_{см} = \sum_{i=1}^n r_i \cdot \rho_i, \text{ кг/нм}^3. \quad (71)$$

1.3.9. Средняя массовая изобарная теплоемкость смеси $(c_{pm_{см}})_0^t$ в интервале температур от 0 и t , °С, рассчитывается по формуле [1]:

$$(c_{pm_{см}})_0^t = \sum_{i=1}^n [g_i \cdot (c_{pm_i})_0^t], \text{ кДж/(кг} \cdot \text{К)}, \quad (72)$$

где g_i – массовая доля i -го компонента заданной газовой смеси, по данным расчета; $(c_{pm_i})_0^t$ – средняя массовая изобарная теплоемкость i -го компонента в интервале температур от 0 до t , °С (определяется по табл. П4.6), кДж/(кг · К).

При расчете теплоемкости, учитывая правила вычисления с приближенными числами, оставлять два знака после запятой [5].

1.3.10. Средняя массовая изобарная теплоемкость смеси $(c_{pm_{см}})_{t_1}^{t_2}$ в интервале температур от t_1 до t_2 , °С, рассчитывается по формуле

$$(c_{pm_{см}})_{t_1}^{t_2} = \frac{(c_{pm_{см}})_0^{t_2} \cdot t_2 - (c_{pm_{см}})_0^{t_1} \cdot t_1}{t_2 - t_1}, \text{ кДж/(кг} \cdot \text{К)}. \quad (73)$$

Входящие в (73) величины $(c_{pm_{см}})_0^{t_2}$ и $(c_{pm_{см}})_0^{t_1}$ рассчитываются по формуле (72). Формула (73) вытекает из 1-го закона термодинамики – закона сохранения энергии.

1.3.11. Средняя массовая теплоемкость смеси при $v = \text{const}$ $(c_{vm_{см}})_{t_1}^{t_2}$ может быть рассчитан по формуле Майера [1], которая для рассматриваемого случая принимает вид:

$$(c_{pm_{см}})_{t_1}^{t_2} - (c_{vm_{см}})_{t_1}^{t_2} = R_{см}, \text{ кДж/(кг} \cdot \text{К)}, \quad (74)$$

или

$$(c_{vm_{cm}})_{t_1}^{t_2} = (c_{pm_{cm}})_{t_1}^{t_2} - R_{cm}, \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К}). \quad (75)$$

1.3.12. По определению, показатель адиабаты смеси вычисляется по соотношению [1]:

$$k = \frac{(c_{pm_{cm}})_{t_1}^{t_2}}{(c_{vm_{cm}})_{t_1}^{t_2}}. \quad (76)$$

1.3.13. В соответствии с законами идеальных газов массовые, объемные и мольные теплоемкости связаны между собой формулами [1]:

$$(c'_{pm_{cm}})_{t_1}^{t_2} = \frac{(\mu c_{pm_{cm}})_{t_1}^{t_2}}{22,4 \cdot 10^{-3}}, \text{ Дж}/(\text{нм}^3 \cdot \text{К}), \quad (77)$$

$$(c_{pm_{cm}})_{t_1}^{t_2} = \frac{(\mu c_{pm_{cm}})_{t_1}^{t_2}}{\mu_{cm}}, \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К}), \quad (78)$$

где $\mu c_{pm_{cm}}$ – мольная теплоемкость смеси, Дж/(моль · К); $22,4 \cdot 10^{-3}$ – объем 1 моля идеального газа при нормальных условиях, нм³/моль.

Из (77) и (78) при найденной средней молярной массе смеси μ_{cm} и средней массовой теплоемкости смеси $(c_{pm_{cm}})_{t_1}^{t_2}$ выражаются средние мольная и объемная теплоемкости заданной газовой смеси при $p = \text{const}$.

Аналогично рассчитываются объемные и мольные теплоемкости смеси при $v = \text{const}$ по известным μ_{cm} и $(c_{vm_{cm}})_{t_1}^{t_2}$.

1.3.14. Абсолютные значения теплоты в изобарном процессе ($p = \text{const}$) рассчитываются по формулам:

$$Q_M = M_{cm} \cdot (c_{pm_{cm}})_{t_1}^{t_2} \cdot (t_2 - t_1), \text{ кДж}, \quad (79)$$

$$Q_V = V_{cm} \cdot (c'_{pm_{cm}})_{t_1}^{t_2} \cdot (t_2 - t_1), \text{ кДж}, \quad (80)$$

$$Q_N = N_{cm} \cdot (\mu c_{pm_{cm}})_{t_1}^{t_2} \cdot (t_2 - t_1), \text{ Дж}, \quad (81)$$

где M_{cm} , V_{cm} , N_{cm} – масса (кг), объем (нм³), число молей (моль) нагреваемой (охлаждаемой) газовой смеси соответственно; Q_M , Q_V , Q_N – теплоты, получаемые (отдаваемые) газовой смесью, имеющей массу M_{cm} , объем V_{cm} и число молей N_{cm} .

Сделать выводы по всем расчетам.

КОНТРОЛЬНОЕ ЗАДАНИЕ № 2

Расчет термодинамического цикла в газовой смеси

2.1. Исходные данные, условия, расчетные задания

Задана газовая смесь определенного химического состава (см. контрольное задание № 1).

В этой газовой смеси реализуется прямой круговой процесс, состоящий из пяти последовательных процессов, проходящих между характерными точками цикла **1, 2, 3, 4, 5**: **1 – 2** – адиабатный; **2 – 3** – изохорный; **3 – 4** – изобарный; **4 – 5** – адиабатный; **5 – 1** – изохорный.

Как известно, круговым процессом подобного вида моделируется работа двигателей внутреннего сгорания (ДВС): это так называемый обобщенный цикл ДВС (цикл Тринклера) [2, с. 26]. Обобщенный цикл ДВС характеризуется тремя показателями. Это степень сжатия ε , степень повышения давления λ , степень предварительного расширения ρ . Очевидно, что эти параметры также будут характеризовать рассмотренный в задаче цикл.

Температура и давление в точке **1** цикла соответствует н.у., т. е. $T_1 = 273,15$ К и $p_1 = 101325$ Па.

Индивидуальные значения параметров ε , λ и ρ выбираются студентами из табл. 3 «Исходные данные к заданию № 2» по двум последним цифрам шифра (номера зачетной книжки).

В задании требуется рассчитать следующие величины:

1) значения параметров состояния (p , v , T) в характерных точках цикла (точки **1, 2, 3, 4, 5**) и заполнить табл. 4;

2) изменение удельной внутренней энергии Δu , Дж/кг; удельной энтальпии Δh , Дж/кг; удельной энтропии Δs , Дж/(кг · К); удельную работу l , Дж/кг, и удельную теплоту q , Дж/кг в каждом процессе цикла, заполнить табл. 5;

3) удельные подведенную q_1 , Дж/кг, и отведенную q_2 , Дж/кг, теплоты в цикле; удельную работу цикла $l_{ц}$, Дж/кг, заполнить табл. 5;

4) термический КПД цикла η_t . Показать, как η_t зависит от характеристик цикла: степени сжатия $\varepsilon = \frac{v_1}{v_2}$; степени повышения давления $\lambda = \frac{p_3}{p_2}$;

степени предварительного расширения $\rho = \frac{v_4}{v_3}$, (т. е. вывести из определения формулу для η_t). Расчеты свести в табл. 6–8;

5) термический КПД цикла Карно η_k , который осуществляется в том же интервале температур, и сравнить его с η_t цикла;

б) на основании определенных параметров построить цикл в координатах $p - v$ (с соблюдением масштабов). Указать название каждого термодинамического процесса.

Т а б л и ц а 3

Исходные данные к заданию № 2

Параметр	Последняя цифра шифра									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
ε	16	13	14	15	16	17	18	19	16	18
Параметр	Предпоследняя цифра шифра									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
λ	1,5	1,6	1,5	1,7	1,4	1,5	1,6	1,7	1,7	1,5
ρ	1,6	1,4	1,3	1,4	1,5	1,5	1,4	1,3	1,5	1,3

Т а б л и ц а 4

Параметры состояния рабочего тела в характерных точках цикла

Номер точки	p , Па (кПа)	v , м ³ /кг	T , К
1	p_1	v_1	T_1
2	p_2	v_2	T_2
3	p_3	v_3	T_3
4	p_4	v_4	T_4
5	p_5	v_5	T_5

Т а б л и ц а 5

Результаты расчетов характеристик процессов цикла

№ п/п	Процессы	Δu , кДж/кг	Δh , кДж/кг	Δs , кДж/(кг · К)	l , кДж/кг	q , кДж/кг
1	1 – 2					
2	2 – 3					
3	3 – 4					
4	4 – 5					
5	5 – 1					
6	Итого за цикл					

Т а б л и ц а 6

Зависимость термического КПД от степени сжатия $\varepsilon = 10 \dots 14$ с шагом 0,5

ε	10	10,5	11	11,5	12	12,5	13	13,5	14
η_t									

Т а б л и ц а 7

Зависимость термического КПД от степени повышения давления $\lambda = 1,2 \dots 1,7$ с шагом 0,1

λ	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7
η_t						

Т а б л и ц а 8

Зависимость термического КПД от степени предварительного расширения $\rho = 1,1 \dots 1,5$ с шагом 0,1

ρ	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5
η_t					

2.2. Некоторые общие теоретические сведения

2.2.1. Пример совершения полезной работы в круговом процессе

В термодинамике теория круговых процессов применяется для анализа работы различных теплосиловых установок.

Известно, что некоторый равновесный термодинамический процесс, происходящий с любой термодинамической системой, например, с идеальным газом, может быть изображен в pV или Ts -координатах в виде непрерывной линии.

Если процесс протекает таким образом, что точки его начала и конца совпадают, то процесс называется **к р у г о в ы м**.

Круговые процессы также называются **термодинамическими циклами**.

Рассмотрим в качестве примера теплосиловую установку (ТСУ), работа которой схематично изображена на рис. 1.

Примечание:

ТСУ – это устройства, которые потребляют из окружающей среды энергию в форме теплоты (например, это может быть химическая энергия топлива). Благодаря этому, ТСУ выдают потребителю (в окружающую среду) механическую работу.

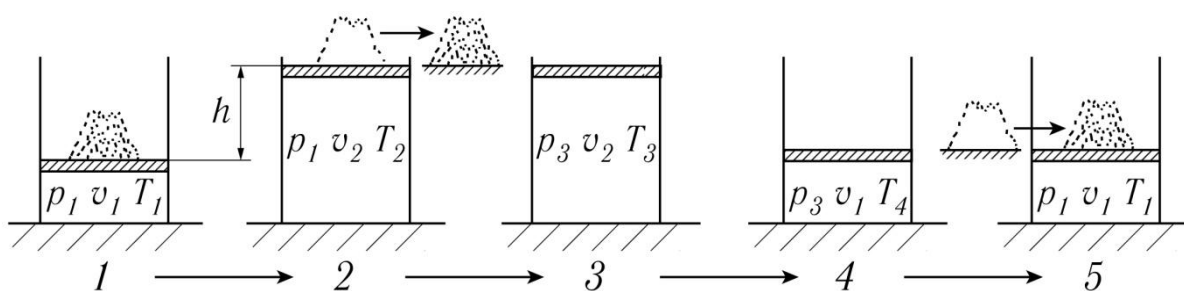


Рис. 1. Пример совершения полезной работы с помощью ТСУ:
1, 2, 3, 4, 5 – характерные промежуточные состояния рабочего тела
в течение одного цикла

Установка на рис. 1 представляет собой цилиндр с поршнем, под поршнем находится один килограмм идеального газа. В данном случае этот идеальный газ является **рабочим телом**, благодаря свойствам которого совершается полезная работа. Известно, что состояние такого рабочего тела характеризуется тремя термодинамическими параметрами состояния: абсолютным давлением p , Па; абсолютной температурой T , К; удельным объемом v , м³/кг. Будем считать, что все процессы, происходящие с газом в установке, являются равновесными.

Сверху поршень нагружен, например, песком массой m , кг. Этот песок требуется поднять на высоту h , м, совершив при этом полезную удельную (на 1 кг газа – рабочего тела) работу l :

$$l = m g h, \text{ Дж/кг}, \tag{82}$$

где g – ускорение свободного падения, м/с².

Осуществить такой подъем можно путем подвода к газу некоторого количества теплоты.

Очевидно, что рассматриваемая ТСУ, как машина для получения механической работы, должна совершать полезную работу не разово, а пе-

риодически, например, в течение рабочего дня. То есть такая машина должна работать циклически.

Рассмотрим один полный цикл работы установки. На рис. 1 схематично изображены пять последовательных, характерных, промежуточных состояний, в которых находится установка в течение одного цикла.

В состоянии **1** (начальное состояние) газ под поршнем имеет параметры p_1, v_1, T_1 . Для наглядности будем считать, что давление p_1 уравнивает силу тяжести песка массой m и поршня, который также имеет какую-то массу.

Установка работает следующим образом.

В процессе **1 – 2** к рабочему телу подводится теплота q_{1-2} , благодаря чему объем газа увеличивается от v_1 до v_2 , а поршень с песком поднимается на необходимую высоту h . При этом совершается работа за счет расширения рабочего тела (работа расширения). В состоянии **2** параметры состояния рабочего тела: p_1, v_2, T_2 (очевидно, что температура возросла, а давление не изменилось).

В процессе **2 – 3** масса песка постепенно сгружается с поршня при постоянном объеме v_2 (на постоянной высоте) без совершения механической работы (так как трением пренебрегаем, а высота не изменяется). В этом процессе давление рабочего тела снижается от p_1 до p_3 (p_3 уравнивает силу тяжести одного поршня). Для осуществления такого процесса от рабочего тела необходимо отвести теплоту в количестве $(-q_{2-3})$, что приведет к снижению температуры от T_2 до T_3 . Так как объем рабочего тела не изменяется, то работа расширения в процессе **2 – 3** не совершается. В состоянии **3** параметры рабочего тела имеют значения p_3, v_2, T_3 .

После этой стадии для обеспечения цикличности работы необходимо вернуть ТСУ в начальное состояние – для поднятия очередной порции песка. Такое возвращение можно осуществить, к примеру, следующим образом.

Сперва в процессе **3 – 4** при постоянном давлении p_3 происходит уменьшение объема рабочего тела от v_2 до v_1 – до начального значения.

Для осуществления такого процесса от рабочего тела необходимо отводить теплоту в количестве $(-q_{3-4})$, что приводит к снижению температуры от T_3 до T_4 . Так как объем уменьшается, то работа в процессе **3 – 4** подводится к рабочему телу из окружающей среды (уменьшается потенциальная энергия поршня в поле силы тяжести). В состоянии **4** параметры имеют значения p_3, v_1 и T_4 .

В процессе **4 – 5** при постоянном объеме v_1 на поршень постепенно нагружается песок массой m , в результате чего давление рабочего тела ме-

няется от p_3 до p_1 . Для осуществления такого процесса к рабочему телу необходимо подвести теплоту в количестве q_{4-5} . Так как объем не изменяется, то работа расширения в этом процессе не совершается. В состоянии 5 параметры имеют значения p_1 , v_1 и T_1 . Таким образом, рабочее тело вернулось в исходное состояние.

На рис. 2 описанные выше процессы изображены в $p\nu$ и Ts -координатах. Очевидно, что в совокупности эти процессы образуют замкнутый контур – точки начала и конца всего цикла совпадают.

Как известно, площадь под линией процесса в $p\nu$ -координатах равна удельной работе, а в Ts -координатах – удельной теплоте процесса. Исходя из этого, с учетом знаков, для кругового процесса удельная работа и удельная теплота будут равны площадям внутри контуров на соответствующих диаграммах. Такая суммарная работа называется **работой цикла** $l_{ц}$, Дж/кг, а суммарная теплота – **теплотой цикла** $q_{ц}$, Дж/кг.

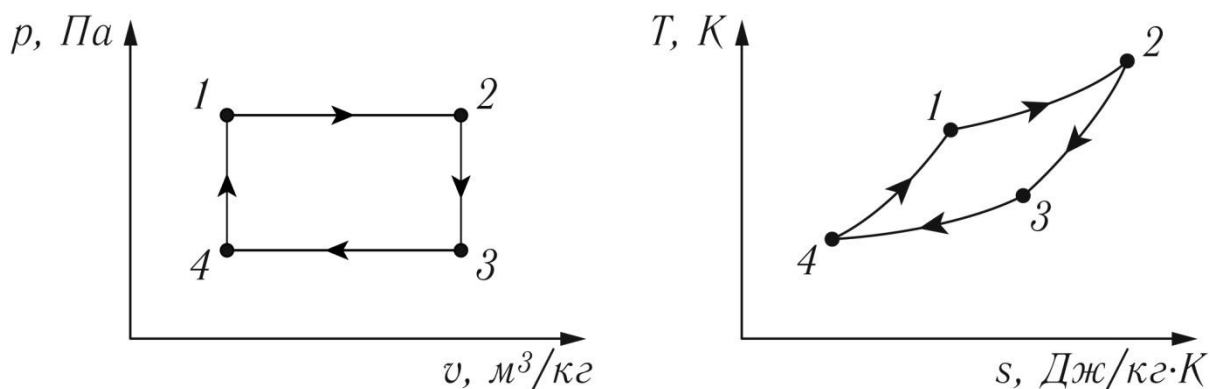


Рис. 2. Круговой процесс (цикл) в $p\nu$ и Ts -координатах, происходящий с рабочим телом в рассматриваемой ТСУ

Следует отметить, что *всегда* на каких-то участках кругового процесса теплота к рабочему телу **подводится**, а на каких-то **отводится**. (В рассматриваемом примере подводится на участках **1 – 2** и **4 – 1**, а отводится на участках **2 – 3** и **3 – 4**.)

То есть $q_{ц}$ всегда представляет собой разность между теплотой, подведенной за цикл к рабочему телу $q_{под}$ и отведенной от него $q_{отв}$. Осуществить круговой процесс, не отведя от рабочего тела теплоту, невозможно (это доказано опытным путем).

Таким образом, можно записать:

$$q_{ц} = q_{под} - q_{отв}. \quad (83)$$

2.2.2. Сведения о термодинамических циклах

Термодинамическим круговым процессом – циклом называется процесс, в котором термодинамическая система (рабочее тело), претерпев ряд изменений, возвращается в исходное состояние.

Из такого определения следует:

- все параметры состояния (p , v и T) и, соответственно, удельные функции состояния системы (внутренняя энергия u , Дж/кг, энтальпия h , Дж/кг, энтропия s , Дж/(кг·К)), изменяясь во время процесса, в конце принимают свое первоначальное значение;
- на диаграммах состояний (например, в pv и Ts -координатах) такой процесс изображается замкнутой линией.

Для любого, в том числе и для кругового процесса, справедлив первый закон термодинамики:

$$u_2 - u_1 = q - l, \quad (84)$$

где u_2 и u_1 – конечное и начальное значение удельной внутренней энергии системы, Дж/кг; q и l – удельные теплота и работа всего процесса, Дж/кг.

Из определения кругового процесса следует, что для него $u_2 = u_1$. Соответственно первый закон термодинамики (84) для кругового процесса принимает вид:

$$0 = q_{\text{ц}} - l_{\text{ц}} \quad \text{или} \quad q_{\text{ц}} = l_{\text{ц}}, \quad (85)$$

где $q_{\text{ц}}$ – суммарная, в алгебраическом смысле, удельная теплота, полученная рабочим телом в течение цикла из окружающей среды, Дж/кг; $l_{\text{ц}}$ – суммарная (итоговая) удельная работа, совершенная рабочим телом за цикл, Дж/кг.

Выражение (85) означает следующее.

Итоговая работа, совершаемая термодинамической системой (рабочим телом) за цикл, равна итоговой теплоте, полученной системой (рабочим телом) за цикл из окружающей среды.

Из (85) видно, что знаки у $q_{\text{ц}}$ и $l_{\text{ц}}$ всегда совпадают: вместе они могут иметь либо положительные, либо отрицательные значения.

Если $q_{\text{ц}}$ и $l_{\text{ц}}$ положительные, то термодинамическая система – рабочее тело за цикл совершило положительную работу и передало ее окружающей среде. При этом из окружающей среды рабочее тело получило теплоту $q_{\text{под}}$ от источника теплоты с высокой температурой и передало часть этой теплоты $q_{\text{отв}}$ источнику с более низкой температурой. То есть $q_{\text{ц}}$ вычисляется по формуле (83). На pv и Ts -диаграммах такой процесс реализуется при движении по замкнутому контуру *по часовой стрелке*.

Если значения $q_{ц}$ и $l_{ц}$ отрицательные, то из окружающей среды в результате кругового процесса была изъята механическая работа. При этом термодинамическая система – рабочее тело осуществило в окружающей среде передачу теплоты от тела с низкой температурой к телу с более высокой температурой. То есть в ходе цикла рабочее тело получило энергию в форме теплоты $q_{под}$ от некоторого тела, находящегося в окружающей среде с низкой температурой, и передало эту энергию другому телу, находящемуся в окружающей среде с более высокой температурой. Этому же телу, имеющему более высокую температуру, в ходе цикла передается также в форме теплоты энергия, полученная рабочим телом из окружающей среды в форме механической работы.

Когда такой процесс изображается на pV и Ts -диаграммах, то двигаться по замкнутым контурам приходится *против часовой стрелки*.

В рассмотренном в предыдущем разделе примере работы ТСУ процесс происходит таким образом, что двигаться по контуру приходится по часовой стрелке. При этом рабочее тело за счет подвода теплоты из окружающей среды совершило работу, которую передало окружающей среде (песок был поднят на некоторую высоту).

Циклы, в которых производится работа ($l_{ц} > 0$), а потребляется теплота, называются **прямыми циклами**.

Прямые циклы реализуются при движении по замкнутому контуру на диаграмме *по часовой стрелке*.

На практике прямые циклы реализуются, например, в двигателях внутреннего сгорания (ДВС). Точнее сказать, что с помощью прямых циклов моделируется работа ДВС (подробнее в главе 2 [2]).

Циклы, для реализации которых затрачивается работа ($l_{ц} < 0$), а теплота передается от тел с низкой температурой телам с более высокой температурой, называются **обратными циклами**.

Обратные циклы реализуются при движении по замкнутому контуру на диаграмме *против часовой стрелки*.

На практике обратные циклы реализуются, например, в холодильных машинах и тепловых насосах. Точнее сказать, что работа таких установок моделируется с помощью обратных циклов.

2.2.3. Термический КПД прямого цикла

Как отмечалось выше, термодинамические циклы изображаются на диаграммах состояния рабочего тела, например, идеального газа, в виде замкнутых контуров.

При реализации **прямых** циклов параметры состояния рабочего тела изменяются таким образом, что движение по контуру происходит по часовой стрелке. В результате такого кругового процесса рабочее тело передает итоговую работу в окружающую среду. При этом на одних этапах процесса теплота к рабочему телу подводится из окружающей среды, а на других – часть из этой подведенной теплоты отводится – передается от рабочего тела обратно окружающей среде. Причем эта возвращенная – отведенная в окружающую среду теплота на практике полезно использоваться для работы, например, ДВС уже не может. По сути, она теряется – рассеивается в окружающей среде.

По-другому дело обстоит с подводимой теплотой: чтобы иметь возможность ее подвести к рабочему телу, ее сначала нужно откуда-то получить. На практике для этого приходится нести издержки, например, приобретать бензин для ДВС.

Из сказанного следует, что при реализации **прямого цикла** работу цикла $l_{ц}$ можно рассматривать как **полезный эффект** от всего процесса, а подводимую теплоту $q_{под}$ – **общими энергозатратами** на его осуществление.

Исходя из этого, в качестве основного критерия, позволяющего оценивать эффективность прямого цикла, принимается отношение величины полезного эффекта – $l_{ц}$, к общим затратам – $q_{под}$. Такой критерий называется **термическим коэффициентом полезного действия** (КПД) прямого цикла – $\eta_{т}$.

Из данного определения, с использованием (84) и (85) получаем:

$$\eta_{т} = \frac{l_{ц}}{q_{под}} = \frac{q_{ц}}{q_{под}} = \frac{q_{под} - |q_{отв}|}{q_{под}} = 1 - \frac{|q_{отв}|}{q_{под}}. \quad (86)$$

Отведенная теплота $q_{отв}$ в (86) берется по абсолютной величине, чтобы подчеркнуть, что она всегда вычитается из $q_{под}$, то есть, что в **прямом** цикле $q_{ц}$ всегда меньше $q_{под}$ на величину $|q_{отв}|$.

Из (86) следует: чем больше работы совершается в прямом цикле на единицу подведенной теплоты, тем больше термический КПД этого цикла. Из определения следует, что $\eta_{т}$ *всегда* меньше единицы.

Примечание:

Определение (86) указывает, что величина $\eta_{т}$ является характеристикой любого равновесного термодинамического прямого кругового процесса. В частности характеристикой циклов, при помощи которых моделируется работа реальных теплосиловых установок (ТСУ), например, различных двигателей внутреннего сгорания (ДВС).

2.2.4. Прямой цикл Карно

Циклом Карно называется равновесный круговой термодинамический процесс, состоящий из двух изотерм и двух адиабат.

На рис. 3 изображен прямой цикл Карно. Цифрами *1, 2, 3, 4* обозначены последовательные характерные точки процесса. Линии *1 – 2* и *3 – 4* являются изотермами, линии *2 – 3* и *4 – 1* – адиабатами.

Очевидно, что в изотермическом процессе *1 – 2* теплота к рабочему телу подводится, а в изотермическом процессе *3 – 4* – отводится. То есть теплота в процессе *1 – 2* от некоторого источника теплоты, находящегося в окружающей среде при высокой температуре T_{\max} , передается рабочему телу.

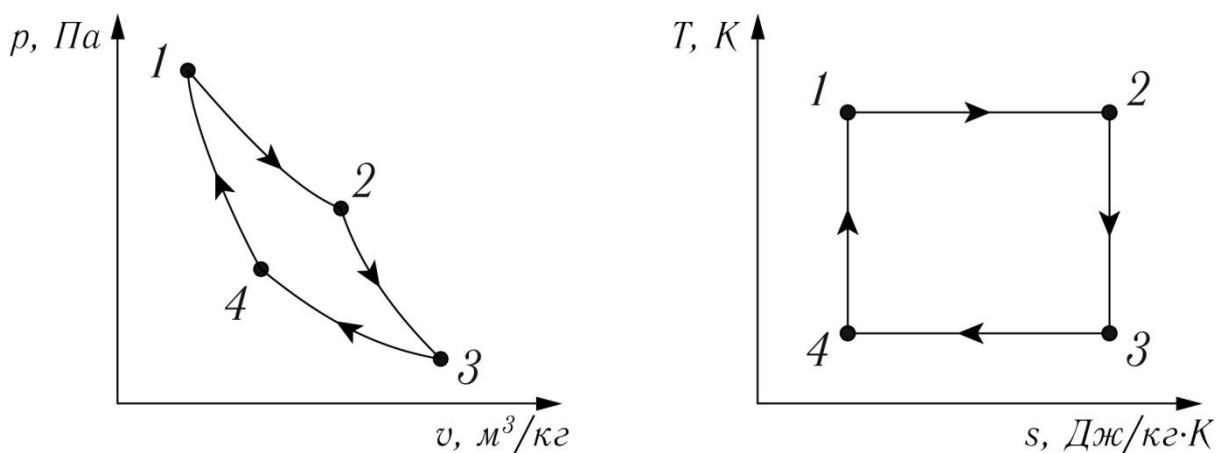


Рис. 3. Прямой цикл Карно в pv и Ts -координатах

Затем в другом изотермическом процессе *3 – 4* часть этой подведенной теплоты передается теплоприемнику, находящемуся тоже в окружающей среде при более низкой температуре T_{\min} .

По определению (86) термический КПД любого прямого цикла равен:

$$\eta_T = \frac{l_{\text{ц}}}{q_{\text{под}}} = \frac{q_{\text{ц}}}{q_{\text{под}}} = \frac{q_{\text{под}} - |q_{\text{отв}}|}{q_{\text{под}}} = 1 - \frac{|q_{\text{отв}}|}{q_{\text{под}}}. \quad (87)$$

Из определения энтропии, для прямого цикла Карно, в котором теплота подводится при постоянной температуре T_{\max} , отводится при постоянной температуре T_{\min} , следует:

$$q_{\text{под}} = T_{\max} \cdot (s_2 - s_1), \quad (88)$$

$$|q_{\text{отв}}| = |T_{\min} \cdot (s_4 - s_3)| = T_{\min} \cdot (s_3 - s_4) = T_{\min} \cdot (s_2 - s_1), \quad (89)$$

где T_{\max} и T_{\min} – значения температуры в изотермических процессах *1 – 2* и *3 – 4* соответственно, К; s_1, s_2, s_3, s_4 – значения удельной энтропии рабочего тела в характерных точках процесса *1, 2, 3, 4*, Дж/(кг·К).

Подставляя (88) и (89) в (87) для термического КПД прямого цикла Карно $\eta_{\text{ТК}}$ получаем:

$$\eta_{\text{ТК}} = \frac{T_{\text{max}} \cdot (s_2 - s_1) - T_{\text{min}} \cdot (s_2 - s_1)}{T_{\text{max}} (s_2 - s_1)} = \frac{T_{\text{max}} - T_{\text{min}}}{T_{\text{max}}} = 1 - \frac{T_{\text{min}}}{T_{\text{max}}}, \quad (90)$$

где T_{max} и T_{min} – максимальная и минимальная температуры рабочего тела во время цикла, К.

Выражение (90) позволяет сделать очень важный вывод.

Термический КПД прямого цикла Карно **зависит только** от абсолютных температур горячего и холодного источников теплоты и не зависит от свойств рабочего тела, а также конструкции тепловой машины, в которой этот цикл реализуется.

(Пример конструкции машины, позволяющей реализовать прямой цикл Карно, приводится в Приложении [2].)

*Цикл Карно обладает еще одним уникальным свойством, которое выделяет его из всех мыслимых круговых процессов: в любом заданном (фиксированном) диапазоне температур, которые может принимать во время произвольного прямого кругового процесса рабочее тело, термический КПД прямого цикла Карно **больше**, чем термодинамический КПД любого мыслимого цикла.*

Рассмотрим, как доказывается последнее утверждение с помощью геометрических построений на p v и T s -диаграммах.

Проведем в p v -координатах на рис. 4 произвольный прямой круговой процесс в виде любой замкнутой линии. Обозначим на этой линии точками T_{max} и T_{min} точки, в которых температура рабочего тела достигает своего максимального и минимального значений.

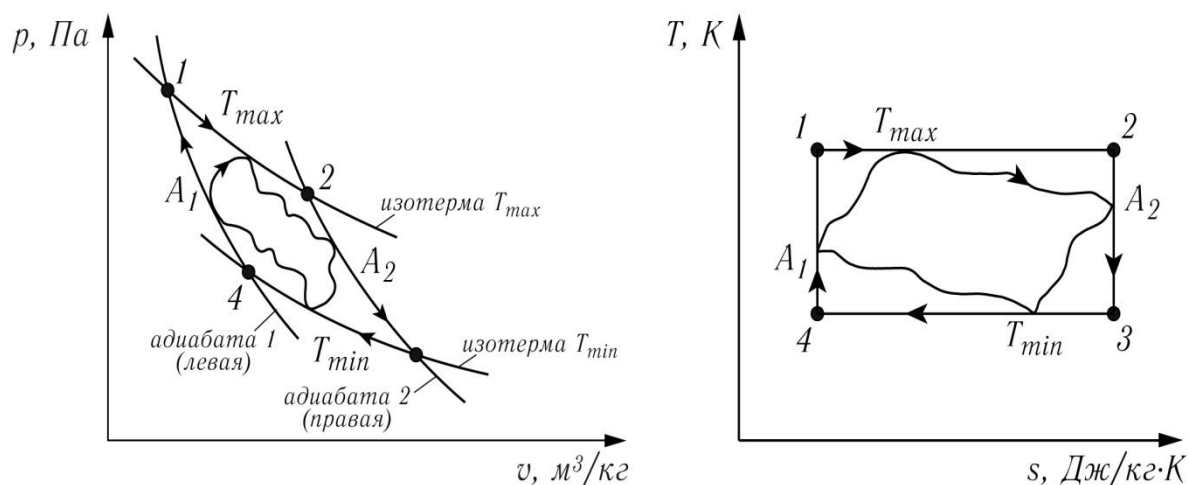


Рис. 4. Схема геометрического доказательства максимальности термического КПД прямого цикла Карно

Проведем через эти точки T_{\max} и T_{\min} соответствующие изотермы. При этом рассматриваемый произвольный цикл будет находиться между этими изотермами.

Далее проведем две адиабаты таким образом, чтобы левая адиабата, не пересекая, касалась контура произвольного цикла слева (точка A_1), а правая – справа (точка A_2). Такие адиабаты являются касательными к контуру в соответствующих точках.

Таким образом, произвольный цикл оказался в pV -координатах вписанным в прямой цикл Карно **1, 2, 3, 4**, который реализуется при том же перепаде температур рабочего тела – при той же разнице между максимальной и минимальной температурами рабочего тела во время цикла.

Очевидно, что вписанным в цикл Карно этот же цикл будет и в Ts -координатах на рис. 4.

Как известно, площадь под линией процесса в Ts -координатах равна теплоте процесса. Из рис. 4 видно: в цикле Карно теплота подводится в процессе **1 – 2**, а отводится в процессе **3 – 4**; в рассматриваемом произвольном цикле теплота подводится в процессе $A_1 - T_{\max} - A_2$, а отводится – в процессе $A_2 - T_{\min} - A_1$.

Также из рис. 4 видно: теплота подводимая в прямом цикле Карно, больше, чем в любом произвольном цикле (т.к. площадь под линией **1 – 2** больше площади под линией $A_1 - T_{\max} - A_2$); теплота, отведенная в прямом цикле Карно, меньше теплоты, отведенной в любом произвольном цикле (т.к. площадь под линией **3 – 4** меньше площади под линией $A_2 - T_{\min} - A_1$).

Согласно (86) термический КПД любого прямого цикла можно вычислить по формуле:

$$\eta_T = 1 - \frac{|q_{\text{отв}}|}{q_{\text{под}}} \quad (91)$$

Применяя к формуле (91) сформулированные выше неравенства приходим к практически очевидному выводу: термический КПД прямого цикла Карно $\eta_{\text{ТК}}$ больше термического КПД любого произвольного прямого цикла $\eta_{\text{Тпр.ц}}$ в одном и том же диапазоне температур рабочего тела:

$$\eta_{\text{ТК}} > \eta_{\text{Тпр.ц}} \quad (92)$$

Примечание:

Из (90) и (92), в частности следует, что если в окружающей среде между источниками теплоты нет перепада температур, то есть $T_{\max} = T_{\min}$, то термический КПД прямого цикла Карно равен нулю. А это, в свою очередь, означает, что без перепада температур превратить теплоту в работу никаким образом не возможно.

2.3. Методические указания по решению задания № 2

2.3.1. Расчет цикла начинается с нахождения параметров любой точки, для которой известны два параметра. Третий параметр находится по уравнению Клапейрона:

$$p v = R T, \quad (93)$$

где p – абсолютное давление, Па; v – удельный объем, м³/кг; R – газовая постоянная, Дж/(кг · К); T – температура, К.

2.3.2. Затем рассчитываются недостающие параметры для остальных точек. Для этого используются соотношение между основными параметрами для каждого процесса (табл. 9), уравнение Клапейрона (93) и характеристики цикла ϵ , λ и ρ (табл. 3).

Примечание: При расчете адиабатного процесса принимать показатель адиабаты k , вычисленный по формуле (76).

2.3.3. Найденные значения p , v , T заносятся в табл. 4. На основании этих данных строится цикл в координатах $p - v$ (с соблюдением масштаба, прил. 3). В подрисуночной надписи приводятся названия каждого изображенного термодинамического процесса.

2.3.4. Подведенная (в процессах 2 – 3 и 3 – 4) или отведенная теплота (в процессе 5 – 1), работа изменения объема газовой смеси, изменения внутренней энергии и энтальпии, изменение энтропии в зависимости от вида процесса рассчитываются по формулам табл. 9.

По определению средней изобарной теплоемкости, удельная теплота в изобарном процессе равна [1].

$$q = c_{pm} (T_2 - T_1).$$

По известным свойствам изобарного процесса:

$$q = h_2 - h_1 = \Delta h,$$

где h_1 и h_2 – энтальпии в начале и конце процесса соответственно, Дж/кг.

Тогда для любого процесса для изменения энтальпии из двух последних формул получаем:

$$\Delta h = c_{pm} (T_2 - T_1), \text{ Дж/кг}, \quad (94)$$

где T_1 и T_2 – температура в начале и конце процесса.

2.3.5. Используя результаты расчетов, заполняется табл. 5.

2.3.6. Эффективность работы цикла определяется путем нахождения его термического КПД (η_t) по формуле

$$\eta_t = \frac{l_{ц}}{q_1} = \frac{q_1 - |q_2|}{q_1} = 1 - \frac{|q_2|}{q_1}, \quad (95)$$

где $l_{ц}$ – работа цикла, Дж/кг; q_1 и q_2 – подведенная и отведенная теплота соответственно, Дж/кг.

Формулы для расчета термодинамических процессов

Процесс и уравнение процесса	Соотношение между параметрами	Работа, Дж/кг; Дж/моль	Изменение внутренней энергии, Дж/кг; Дж/моль	Теплота, Дж/кг; Дж/моль	Изменение энтропии, Дж/(кг · К); Дж/(моль · К)
<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>
1. Изохорный $v = \text{const}$	$\frac{p_1}{p_2} = \frac{T_1}{T_2}$	$l = 0$	$\Delta u = c_{vm} \cdot (T_2 - T_1)$	$q = c_{vm} (T_2 - T_1)$	$\Delta s = c_{vm} \ln \frac{T_2}{T_1}$
2. Изобарный $p = \text{const}$	$\frac{v_1}{v_2} = \frac{T_1}{T_2}$	$l = p (v_2 - v_1);$ $l = R (T_2 - T_1)$	$\Delta u = c_{vm} (T_2 - T_1)$	$q = c_{pm} (T_2 - T_1)$	$\Delta s = c_{pm} \ln \frac{T_2}{T_1}$
3. Изотермиче- ский $T = \text{const};$ $pv = \text{const}$	$\frac{p_1}{p_2} = \frac{v_2}{v_1}$	$l = R T \ln \frac{v_2}{v_1};$ $l = R T \ln \frac{p_1}{p_2};$ $l = p_1 v_1 \ln \frac{v_2}{v_1}.$	$\Delta u = 0$	$q = l$	$\Delta s = R \ln \frac{p_1}{p_2};$ $\Delta s = R \ln \frac{v_2}{v_1};$ $\Delta s = \frac{p_1 v_1}{T} \ln \frac{v_2}{v_1}$

Процесс и уравнение процесса	Соотношение между параметрами	Работа, Дж/кг; Дж/моль	Изменение внутренней энергии, Дж/кг; Дж/моль	Теплота, Дж/кг; Дж/моль	Изменение энтропии, Дж/(кг · К); Дж/(моль · К)
1	2	3	4	5	6
4. Адиабатный $pv^k = \text{const}$, где $k = \frac{c_p}{c_v}$ – показатель адиабаты	$\frac{p_2}{p_1} = \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^k$; $\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^{k-1}$; $\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{k-1}{k}}$	$l = \frac{1}{k-1} (p_1 v_1 - p_2 v_2)$; $l = \frac{R}{k-1} (T_1 - T_2)$; $l = \frac{p_1 v_1}{k-1} \left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{k-1}{k}}\right]$; $l = \frac{p_1 v_1}{k-1} \left[1 - \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^{k-1}\right]$	$\Delta u = c_{vm} (T_2 - T_1)$	$q = 0$	$\Delta s = 0$
5. Политропный* $pv^n = \text{const}$, где $n = \frac{c - c_p}{c - c_v}$ – показатель политропы	$\frac{p_2}{p_1} = \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^n$; $\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^{n-1}$; $\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{n-1}{n}}$	$l = \frac{R}{n-1} (T_1 - T_2)$	$\Delta u = c_{vm} (T_2 - T_1)$	$q = c_{vm} \frac{n-k}{n-1} \cdot (T_2 - T_1)$	$\Delta s = c_{vm} \frac{n-k}{n-1} \ln \frac{T_2}{T_1}$

Примечания: 1. Для практического определения показателя политропы в некотором процессе из табл. 9 можно получить соотношение: $n = \frac{\ln \frac{p_2}{p_1}}{\ln \frac{v_1}{v_2}}$.

2. В табл. 9 цифра 1 в индексах соответствует значениям параметра в начале процесса, цифра 2 – в конце процесса.

2.3.7. Термический КПД, вычисленный по (95) зависит от характеристик: степени сжатия ε , степени повышения давления λ и степени предварительного расширения ρ (табл. 3).

Рассмотрим, как выводится эта зависимость [3]. Будем считать, что теплоемкость рабочего тела c , кДж/(кг · К), имеет некоторое среднее значение и не изменяется во время цикла. Для нашего случая, эти теплоемкости можно обозначить $c_{pm} = \text{const}$ и $c_{vm} = \text{const}$. Это средние удельные теплоемкости смеси при $p = \text{const}$ и $v = \text{const}$ соответственно. Значения этих теплоемкостей принимаются равными значениям, определенным в п. 1.3. по формулам (73) и (75).

Теплота, подведенная в изохорном процессе 2 – 3 рассчитывается по формуле (табл. 9):

$$q'_1 = c_{vm} (T_3 - T_2). \quad (96)$$

Теплота, подведенная в изобарном процессе 3 – 4:

$$q''_1 = c_{pm} (T_4 - T_3). \quad (97)$$

Суммарная подведенная теплота в цикле:

$$q_1 = q'_1 + q''_1. \quad (98)$$

Отведенная теплота в изохорном процессе 5 – 1:

$$q_2 = c_{vm} (T_5 - T_1). \quad (99)$$

Подставляя (96), (97) и (99) в (95) получаем:

$$\eta_t = 1 - \frac{|q_2|}{q_1} = 1 - \frac{c_{vm}(T_5 - T_1)}{c_{vm}(T_3 - T_2) + c_{pm}(T_4 - T_3)}. \quad (100)$$

Известно, что показатель адиабаты $k = \frac{c_{pm}}{c_{vm}}$. Следовательно, $c_{pm} = k c_{vm}$. Подставляя это выражение в (100) получаем:

$$\eta_t = 1 - \frac{(T_5 - T_1)}{(T_3 - T_2) + k(T_4 - T_3)}. \quad (101)$$

Выразим температуры всех точек через температуру точки 1.

Для адиабатного процесса 1 – 2 с учетом, что $\varepsilon = \frac{v_1}{v_2}$ имеем (табл. 9):

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{v_1}{v_2} \right)^{k-1}; \text{ откуда}$$

$$T_2 = T_1 \left(\frac{v_1}{v_2} \right)^{k-1} = T_1 \cdot \varepsilon^{k-1}. \quad (102)$$

Для изохорного процесса **2 – 3** с учетом $\lambda = \frac{p_3}{p_2}$ и выражения (102)

имеем:

$$\frac{p_3}{p_2} = \frac{T_3}{T_2} = \lambda, \text{ откуда} \quad T_3 = T_2 \cdot \lambda = T_1 \cdot \varepsilon^{k-1} \cdot \lambda. \quad (103)$$

Для изобарного процесса **3 – 4** с учетом табл. 9, характеристики цикла $\rho = \frac{v_4}{v_3}$ и формулы (103) имеем:

$$\frac{v_4}{v_3} = \frac{T_4}{T_3} = \rho, \text{ откуда} \quad T_4 = T_3 \cdot \rho = T_1 \cdot \varepsilon^{k-1} \cdot \lambda \cdot \rho. \quad (104)$$

Для адиабатного процесса **4 – 5** с учетом табл. 9 имеем:

$$\frac{T_5}{T_4} = \left(\frac{v_4}{v_5} \right)^{k-1}. \quad (105)$$

Рассмотрим дробь, стоящую в правой части (105): $v_5 = v_1$, так как процесс **1 – 5** изохорный.

Если полученную дробь $\left(\frac{v_4}{v_1} \right)^{k-1}$ умножим и разделим на v_2^{k-1} будем иметь:

$$\left(\frac{v_4}{v_5} \right)^{k-1} = \left(\frac{v_4}{v_1} \right)^{k-1} = \left(\frac{v_4/v_2}{v_1/v_2} \right)^{k-1}. \quad (106)$$

С учетом, что $\varepsilon = \frac{v_1}{v_2}$, $\rho = \frac{v_4}{v_3}$ и $v_2 = v_3$ (процесс **2 – 3** изохорный) получаем:

$$\left(\frac{v_4}{v_5} \right)^{k-1} = \left(\frac{v_4/v_2}{v_1/v_2} \right)^{k-1} = \left(\frac{v_4/v_3}{v_1/v_2} \right)^{k-1} = \left(\frac{\rho}{\varepsilon} \right)^{k-1}. \quad (107)$$

Выражая из (106) температуру точки **5** и, подставляя (107), получим:

$$T_5 = T_4 \left(\frac{v_4}{v_5} \right)^{k-1} = T_4 \left(\frac{\rho}{\varepsilon} \right)^{k-1} = T_1 \cdot \varepsilon^{k-1} \cdot \lambda \cdot \rho \cdot \frac{\rho^{k-1}}{\varepsilon^{k-1}} = T_1 \cdot \lambda \cdot \rho^k. \quad (108)$$

Подставив полученные значения температур всех характерных точек цикла в выражение (101), получим:

$$\begin{aligned} \eta_t &= 1 - \frac{(T_5 - T_1)}{(T_3 - T_2) + k(T_4 - T_3)} = \\ &= 1 - \frac{T_1 \cdot \lambda \cdot \rho^k - T_1}{(T_1 \cdot \varepsilon^{k-1} \cdot \lambda - T_1 \cdot \varepsilon^{k-1}) + k(T_1 \cdot \varepsilon^{k-1} \cdot \lambda \cdot \rho - T_1 \cdot \varepsilon^{k-1} \cdot \lambda)} = \\ &= 1 - \frac{1}{\varepsilon^{k-1}} \cdot \frac{\lambda \cdot \rho^k - 1}{(\lambda - 1) + k \cdot \lambda \cdot (\rho - 1)}. \end{aligned} \quad (109)$$

По формуле (109) производится расчет термического КПД заданного цикла при известных ε , λ , ρ .

2.3.8. Термический КПД цикла Карно, который совершается в том же интервале температур, определяется по формуле:

$$\eta_t = 1 - \frac{T_{\min}}{T_{\max}}, \quad (110)$$

где T_{\min} и T_{\max} – наименьшая и наибольшая температура рабочего тела (в нашем случае – это заданная газовая смесь), К.

2.3.9. На основании выведенной формулы термического КПД цикла (109) построить графики зависимости η_t от характеристик цикла ε , λ , ρ , прил. 3. Расчеты свести в табл. 6 – 8.

Сделать выводы по всем расчетам.

Библиографический список

1. *Куликов, А. А.* Техническая термодинамика. Часть I: Общие принципы: учеб. пособие / А. А. Куликов, И. В. Иванова, И. Н. Дюкова. – Санкт-Петербург: СПбГЛТУ, 2015. – 104 с.

2. *Куликов, А. А.* Техническая термодинамика. Круговые процессы: теория и применение: учеб. пособие / А. А. Куликов, И. В. Иванова, А. Ф. Смоляков, И. Н. Дюкова. – Санкт-Петербург: СПбГЛТУ, 2018. – 44 с.

3. *Нащокин, В. В.* Техническая термодинамика и теплопередача / В. В. Нащокин. – Москва: Высшая школа, 1980. – 469 с.

4. *Луканин, В. Н.* Теплотехника / В. Н. Луканин. – Москва: Высшая школа, 2000. – 671 с.

5. *Нерсесова, Э. А.* Лабораторный практикум «Измерительные приборы» / Э. А. Нерсесова. – Москва: МИФИ, 2004. – 88 с.

6. ГОСТ Р 7.0.100–2018 «Библиографическая запись. Библиографическое описание. Общие требования и практика составления».

П Р И Л О Ж Е Н И Я

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

Образец оформления титульного листа

Министерство науки и высшего образования РФ	
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ЛЕСОТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ имени С. М. Кирова»	
<i>Кафедра промышленной энергетики</i>	
К О Н Т Р О Л Ь Н А Я Р А Б О Т А по дисциплине «Техническая термодинамика»	
Выполнил	
ст-т (ка) <u>ТМ и ТЛ,</u>	_____
<i>институт</i>	<i>курс</i>
_____	_____
<i>группа</i>	<i>специальность</i>
Номер зачетной книжки _____	
_____	_____
<i>(подпись)</i>	<i>(Ф.И.О.)</i>
Проверил преподаватель:	
_____	_____
<i>(подпись)</i>	<i>(Ф.И.О.)</i>
Санкт-Петербург	
20 _____ г.	

Образец оформления бланка задания на контрольную работу

<p>Министерство науки и высшего образования РФ</p> <hr/> <p>Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ЛЕСОТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ имени С. М. Кирова»</p> <hr/>	
<p><i>Кафедра промышленной энергетики</i></p>	
<p>ЗАДАНИЕ на контрольную работу по дисциплине «Техническая термодинамика»</p>	
<p>Студенту _____ <i>(Ф.И.О., институт, курс, группа)</i></p>	
<p>Номер варианта _____ <i>(две последние цифры шифра)</i></p>	
<p><i>Задание № 1.</i></p>	
<p><i>Задание № 2.</i></p>	
<p>« _____ » _____ 20 ____ г. <i>дата</i></p>	<p>_____ / _____ / <i>подпись Ф.И.О. преподавателя</i></p>

А. Указания по оформлению контрольной работы

1. Контрольная работа выполняется в печатном или рукописной формах на листах формата А4.

2. Листы должны быть сброшюрованы любым способом.

3. При написании текста соблюдать размеры полей (верхнее, нижнее – 20 мм, справа – 15 мм, слева – 30 мм).

4. Страницы должны быть пронумерованы (титульный лист – стр. 1 (номер страницы не ставится), на последующих страницах номер проставляется арабскими цифрами в правом нижнем углу).

5. Соблюдать межстрочный интервал – 1,5, абзацы.

6. Контрольная работа должна содержать: титульный лист; задание на контрольную работу, содержание; основная часть (приводится выполнение заданий с подробным разъяснением); выводы; список использованных источников.

7. Текст основной части можно разделить на разделы, подразделы, пункты.

Нумерация разделов арабскими цифрами: раздел – 1.; подразделы – 1.1., 1.2.; пункты – 1.1.1., 1.1.2. и т. д. Слова СОДЕРЖАНИЕ и СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ – пишутся заглавными буквами и не нумеруются.

8. Формулы следует выделять из текста в отдельную строку, по центру. Между формулами и текстом должно быть один интервалов сверху и снизу.

9. Нумерация формул: арабскими цифрами в круглых скобках: первая цифра – номер раздела, затем – номер формулы по порядку. Номер проставляется на той же строке, что и сама формула с правой стороны листа (у правого поля).

Если значения символов и числовых коэффициентов, входящих в формулу, ранее в тексте не пояснены, то они должны быть расшифрованы непосредственно под формулой, начиная со слова «где» без двоеточия после него.

При представлении расчетов формулы можно не нумеровать, а после их написания ставить знак равенства, подставлять численные значения всех входящих в них величин и после знака равенства представлять окончательный результат расчета с указанием его единицы измерения.

Перенос формул допускается только на знаках «+», «=», причем на новой строке знак необходимо повторить.

10. Нумерация рисунков: рисунок должен иметь номер и название. Номер и название рисунка пишутся под рисунком. Номер рисунка состоит из номера раздела и порядкового номера рисунка в пределах раздела. Подрисуночная надпись не должна выходить за пределы рисунка.

Например:

Рис. 1.1. График зависимости термического КПД от степени сжатия.

Если рисунок выполнен на альбомном листе – лист располагается так, чтобы подрисуночная надпись на листе была справа.

На рисунок должна быть сделана ссылка в тексте, которая идет обязательно до рисунка.

Например:

Схема трубопровода приведена на рис. 1.1. И далее приводится рисунок.

11. Между текстом и рисунком должно быть не менее 1...2 интервалов. Между рисунком и названием – не менее 1 интервала. Между названием рисунка и последующим текстом – не менее 1...2 интервалов.

12. Нумерация таблиц: таблицы нумеруются арабскими цифрами. В правом верхнем углу таблицы над заголовком (названием таблицы) пишется слово «Таблица» и номер таблицы. Ниже по центру — название таблицы, далее сама таблица.

На таблицу должна быть сделана ссылка в тексте, которая идет обязательно до таблицы.

Например:

В тексте: «Теплофизические свойства сухого воздуха приведены в табл. 1.1.». На следующей строке справа пишется полностью слово **Таблица 1.1** с заглавной буквы и на следующей строке посередине приводится заголовок таблицы.

13. Сведения, приведенные в работе, подтверждаются ссылками на источники с указаниями страниц, если это формулы или таблицы – то и их номера.

Например, [1, стр. 25-28] или [5].

В списке использованных источников также приводятся полный адрес интернет источников.

Например, Тепловые электрические станции: Официальный сайт. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.03-ts.ru>

Все приведенные ссылки оформляются в СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ строго с номером, указанным в тексте работы. Нумерация в «СПИСКЕ ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ» порядковая. Оформление всех источников приводить в соответствии с [5].

Б. Правила оформления расчетов

1. Название расчета или краткое описание цели расчета.
2. Расчетная формула с расшифровкой величин, входящих в эти формулы и которые предстоит рассчитать через запятую в последовательности:
 - а) название величины;
 - б) размерность;
 - в) обоснование выбора и ссылка на источник, которая приводится в тексте в квадратных скобках, далее принятое в расчетах окончательное численное значение.
3. В расчетную формулу подставляются численные значения всех величин, входящих в эту формулу, без каких-либо предварительных расчетов и сокращений. Далее можно привести промежуточные расчеты по желанию. Окончательный ответ должен быть записан с единицей измерения искомой величины.

В. Правила оформления таблиц

Для записи результатов большого количества однотипных расчетов или измерений удобно использовать **таблицы**. С их помощью удастся избежать ненужной многократной записи обозначения измеряемой величины, единиц измерения, используемых множителей и т.п. При этом форма таблицы должна быть удобна для записи и дальнейшей обработки данных. С этой целью необходимо предварительно продумать, значения каких физических величин или результаты расчетов будут помещены в таблицу. Отсюда заранее определяют количество столбцов и строк, необходимых в таблице. После этого вычерчивают графический контур таблицы. Таблицы, а их может потребоваться несколько, принято нумеровать в порядке их использования. Кроме того, каждой таблице дают краткое название, соответствующее помещенным в нее данным. Первый столбец таблицы, как правило, отводят для записи порядкового номера измерения, рис. ПЗ.1.

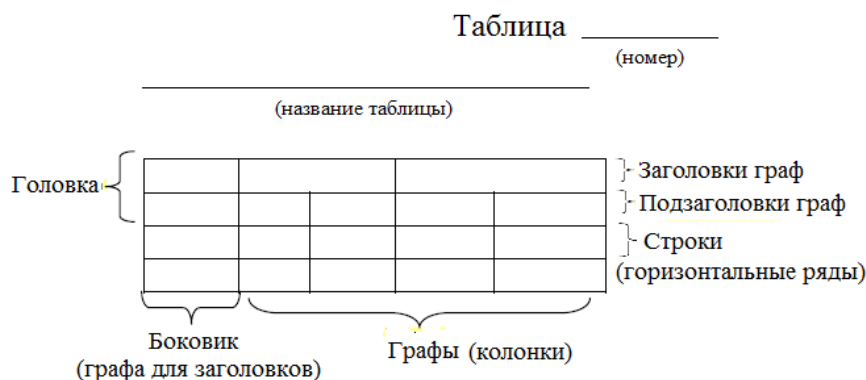


Рис. ПЗ.1. Пример оформления таблицы

В заголовках других столбцов, то есть в самой верхней части, после символического обозначения физической величины через запятую приводят единицы ее измерения, причем все единицы измерения принято указывать в русском написании и только в системе СИ. Общий десятичный множитель, если он присутствует во всех результатах измерений, помещаемых в данный столбец, выносят в заголовок. Во избежание недоразумений при последующем использовании таблицы, общий множитель записывают перед единицами измерения физической величины.

Примером создания таблиц в котельной являются режимные карты, составляемые для каждого котлоагрегата по результатам балансовых испытаний.

Г. Правила оформления графиков

Более наглядными, чем таблицы, являются *графики* зависимостей физических величин. Графики дают визуальное представление о связи между величинами, что крайне важно при интерпретации полученных данных, так как графическая информация легко воспринимается, вызывает больше доверия, обладает значительной емкостью. Графики строят только на бумаге, имеющей координатную сетку. Это может быть обычная миллиметровка с линейным масштабом по осям или логарифмическая бумага. Логарифмическую бумагу используют реже, поэтому отметим, что она бывает двух типов. У бумаги первого типа по одной оси масштаб линейный, по другой – логарифмический. Бумага второго типа имеет логарифмический масштаб по обеим осям. Графики, за редким исключением, строят в прямоугольной системе координат, где по горизонтальной оси (оси абсцисс) откладывают *аргумент, независимую физическую величину*, а по вертикальной оси (оси ординат) – *функцию, зависимую физическую величину*.

Обычно график строят на основании таблицы данных, откуда легко установить интервалы, в которых изменяются аргумент и функция. Их наименьшее и наибольшее значения задают значения масштабов, откладываемых вдоль осей. *После выбора и нанесения на оси масштабов наносятся значения физических величин.*

Не следует стремиться поместить на осях точку (0,0), используемую как начало отсчета на математических графиках. Для экспериментальных графиков масштабы по обеим осям выбирают независимо друг от друга и, как правило, соотносят с погрешностью измерения аргумента и функции: желательно, чтобы цена наименьшего деления каждой шкалы примерно равнялась соответствующей погрешности.

Масштабная шкала должна легко читаться, а для этого необходимо выбрать удобную для восприятия цену деления шкалы: одной клетке должно соответствовать кратное 10 количество единиц откладываемой физической величины: 10^n , $2 \cdot 10^n$ или $5 \cdot 10^n$, где n – любое целое число, положительное или отрицательное. Так, числа 2; 0,5; 100; 0,02 – подходят, а числа 3; 7; 0,15 – не подходят для этой цели. При необходимости масштаб по одной и той же оси для положительных и отрицательных значений откладываемой величины может быть выбран разным, но только в том случае, если эти значения отличаются не менее чем на порядок, т. е. в 10 раз и более. Примером может служить вольтамперная характеристика диода, когда прямой и обратный токи отличаются не менее, чем в тысячу раз: прямой ток составляет миллиамперы, обратный – микроамперы. Стрелки, задающие положительное направление, на координатных осях обычно не указывают, если выбрано принятое положительное направление осей: снизу – вверх и слева – направо. Оси подписывают: ось абсцисс – справа внизу, ось ординат – слева вверху. Против каждой оси указывают название или символ откладываемой по оси величины, а через запятую – единицы ее измерения, причем все единицы измерения приводят в русском написании в системе СИ. Числовой масштаб выбирают в виде равноотстоящих по значению «круглых чисел», например: 2; 4; 6; 8 и т. д. или 1,82; 1,84; 1,86 и т. д. Десятичный множитель масштаба, как в таблицах, относится к единицам измерения, например, вместо 1000; 2000; 3000 и т.д. получится 1; 2; 3 и т. д. с общим множителем 10^3 , указанным перед единицей измерения.

Масштабные риски проставляют по осям на одинаковом расстоянии друг от друга, чтобы они выходили на поле графика. По оси абсцисс цифры числового масштаба пишут под рисками, по оси ординат – слева от рисок.

Нанесение точек. Экспериментальные точки аккуратно наносят на поле графика карандашом. Их всегда проставляют так, чтобы они были отчетливо различимы. Если в одних осях строят различные зависимости, полученные, например, при измененных условиях эксперимента или на разных этапах работы, то точки таких зависимостей должны отличаться друг от друга. Их следует отмечать разными значками (квадратами, кружками, крестиками и т. п.) или наносить карандашами разного цвета. Расчетные точки, полученные путем вычислений, размещают на поле графика равномерно. В отличие от экспериментальных, они должны слиться с теоретической кривой после ее построения. Расчетные точки, как и экспериментальные, наносят карандашом – при ошибке неверно поставленную точку легче стереть. Выносные координатные линии при нанесении точек не используют, так как для этих целей существует сетка миллиметровки, а лишние линии засоряют график, делая его неудобным для восприятия и работы с ним.

На рис. ПЗ.2 приведена полученная по точкам экспериментальная зависимость, которая построена на бумаге, имеющей координатную сетку.

Проведение кривых. Экспериментальные точки с помощью карандаша соединяют плавной кривой, чтобы они в среднем были одинаково расположены по обе стороны от проведенной кривой. Если известно математическое описание наблюдаемой зависимости, то теоретическая кривая проводится точно так же. Нет смысла стремиться провести кривую через каждую экспериментальную точку – ведь кривая является только интерпретацией результатов измерений, известных из эксперимента с погрешностью. По сути есть только экспериментальные точки, а кривая – произвольное, не обязательно верное, домысливание эксперимента. Представим, что все экспериментальные точки соединены и на графике получилась ломаная линия.

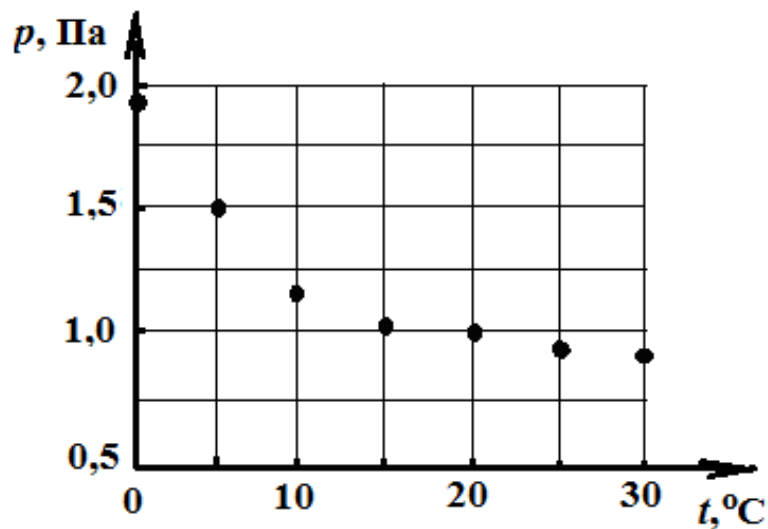


Рис. ПЗ.2. Зависимость давления от температуры

Она не имеет ничего общего с истинной физической зависимостью! Это следует из того, что форма полученной линии не будет воспроизводиться при повторных сериях измерений. Напротив, теоретическую зависимость строят на графике таким образом, чтобы она плавно проходила по всем расчетным точкам. Это требование очевидно, так как теоретические значения координат точек могут быть вычислены сколь угодно точно.

Правильно построенная кривая должна заполнять все поле графика, что будет свидетельством правильного выбора масштабов по каждой из осей. Если же значительная часть поля оказывается незаполненной, то необходимо заново выбрать масштабы и перестроить зависимость.

Отображение погрешностей измерений на графике. Результаты измерений, на основании которых строят экспериментальные зависимости, содержат погрешности. Чтобы указать их значения на графике, используют

два основных способа. Первый упоминался при обсуждении вопроса выбора масштабов. Он состоит в выборе цены деления масштабной шкалы графика, которая должна равняться погрешности откладываемой по данной оси величины. В таком случае точность измерений не требует дополнительных пояснений. Если достичь соответствия погрешности и цены деления не удастся, используют второй способ, заключающийся в прямом отображении погрешностей на поле графика. А именно, вокруг проставленной экспериментальной точки строят два отрезка, параллельные осям абсцисс и ординат. В выбранном масштабе длина каждого отрезка должна равняться удвоенной погрешности величины, откладываемой по параллельной оси. Центр отрезка должен приходиться на экспериментальную точку. Вокруг точки образуются как бы «усы», задающие область возможных значений измеряемой величины. Погрешности становятся зримыми, хотя «усы» могут невольно засорить поле графика. Отметим, что указанный способ чаще всего применяют тогда, когда погрешности меняются от измерения к измерению.

Завершение работы. График нумеруют, ему дают название, кратко отражающее содержание построенной зависимости. Все графические символы, использованные при построении, поясняют в подписи к графику, которую располагают под графиком или на не занятой кривой части поля.

Правила оформления графиков в учебниках, научных публикациях, монографиях несколько отличаются от изложенных выше, что, в первую очередь, связано с их иллюстративным характером. Большинство таких графиков имеют смысл рисунков, так как на них часто не приводят масштабную сетку и масштабы по осям, не обозначают единицы измерения откладываемых величин. Отчасти все это объясняется малыми размерами самих графиков, на которых просто не остается места для дополнительных надписей и линий.

Работа с графиками. На основе графического представления исследуемых зависимостей во многих случаях удается провести достаточно полную обработку экспериментальных данных. Подобная обработка всегда проста и наглядна, не требует сложных вычислений, взамен же дает вполне приемлемые по точности результаты. Полезно взять за правило начинать обработку любых данных с графических построений и их интерпретации. Впоследствии можно воспользоваться более точными методами статистической обработки, но никакие математические ухищрения не составят конкуренции зримой достоверности графиков.

Считывание точек с графика. Часто возникает необходимость найти из имеющегося графика значение функции y , если задано значение аргумента x . Такое считывание точек требуется, например, при использовании градуировочных графиков термомпар, расходомеров и т. п., которые, в свою очередь, строят на основании предварительных измерений или берут из справочников.

Во всех этих случаях координата точки, определяемая из графика, имеет погрешность, сопоставимую с ценой наименьшего масштабного деления.

ПРИЛОЖЕНИЕ 4

Т а б л и ц а П 4. 1

Греческий алфавит

№ п/п	Обозначение	Название	№ п/п	Обозначение	Название
1	Α α	альфа	12	Ν ν	ню
2	Β β	бета	13	Ξ ξ	кси
3	Γ γ	гамма	14	Ο ο	омикрон
4	Δ δ	дельта	15	Π π	пи
5	Ε ε	эпсилон	16	Ρ ρ	ро
6	Ζ ζ	дзета	17	Σ σ и ς	сигма
7	Η η	эта	18	Τ τ	тау
8	Θ θ	тета	19	Υ υ	ипсилон
9	Ι ι	йота	20	Φ φ	фи
10	Κ κ	каппа	21	Χ χ	хи
11	Λ λ	лямбда	22	Ψ ψ	пси

Т а б л и ц а П 4. 2

Приставки для образования кратных и дольных единиц

№ п/п	Наименование приставок	Обозначение	Отношение к основной единице
1	2	3	4
1	Дека	да	10^1
2	Гекто	г	10^2
3	Кило	к	10^3
4	Мега	М	10^6
5	Гига	Г	10^9
6	Тера	Т	10^{12}
7	Деци	д	10^{-1}
8	Санти	с	10^{-2}
9	Милли	м	10^{-3}
10	Микро	мк	10^{-6}
11	Нано	н	10^{-9}
12	Пико	п	10^{-12}

Основные единицы СИ

№ п/п	Наименование величины	Единица	Обозначение	
			международное	русское
<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>
1	Длина	метр	m	м
2	Масса	килограмм	kg	кг
3	Время	секунда	S	с
4	Сила электрического тока	ампер	A	А
5	Термодинамическая температура	кельвин	K	К
6	Количество вещества	моль	mol	моль
7	Сила света	кандела	cd	кд

Соотношения между единицами давления

№ п/п	Единица измерения	Сокращенное обозначение	в Па
<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>
1	Бар (гектопьеца)	бар	10^5
2	Паскаль	Па	1
3	Килограмм-сила на кв. метр	кгс / м ²	9,8066
4	Килограмм-сила на кв. сантиметр	кгс / см ²	$9,8066 \cdot 10^4$
5	Атмосфера физическая	атм	$1,0133 \cdot 10^5$
6	Атмосфера техническая	ат	$9,8066 \cdot 10^4$
7	Миллиметр ртутного столба	мм рт. ст.	$1,3332 \cdot 10^2$
8	Миллиметр водяного столба	мм вод. ст.	9,8066
9	Метр водяного столба	м вод. ст.	$9,8066 \cdot 10^3$

Молярные массы, плотности и газовые постоянные важнейших газов

№ п/п	Вещество	Химическое обозначение	Молярная масса, $\mu \cdot 10^3$, кг/моль	Плотность ρ , кг/м ³	Газовая постоянная, Дж/(кг · К)
1	2	3	4	5	6
1	Воздух	–	28,96	1,293	287,0
2	Кислород	O ₂	32,00	1,429	259,8
3	Азот	N ₂	28,026	1,251	296,8
4	Гелий	He	4,003	0,179	2078,0
5	Аргон	Ar	39,994	1,783	208,2
6	Водород	H ₂	2,016	0,090	4124,0
7	Окись углерода	CO	28,01	1,250	296,8
8	Двуокись углерода	CO ₂	44,01	1,977	188,9
9	Сернистый газ	SO ₂	64,06	2,926	129,8
10	Метан	CH ₄	16,032	0,717	518,8
11	Этилен	C ₂ H ₄	28,052	1,251	296,6
12	Коксовый газ	–	11,50	0,515	721,0
13	Аммиак	NH ₃	17,032	0,771	488,3
14	Водяной пар	H ₂ O	18,016	0,804	461,0

Значения средних массовых теплоемкостей различных газов

№ п/п	Темпе- ратура <i>t</i> , °С	Средняя массовая теплоемкость, кДж/(кг · К)											
		CO ₂		CO		H ₂ O		O ₂		N ₂		H ₂	
		<i>c_{ρm}</i>	<i>c_{vm}</i>	<i>c_{ρm}</i>	<i>c_{vm}</i>	<i>c_{ρm}</i>	<i>c_{vm}</i>	<i>c_{ρm}</i>	<i>c_{vm}</i>	<i>c_{ρm}</i>	<i>c_{vm}</i>	<i>c_{ρm}</i>	<i>c_{vm}</i>
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1	0	0,8148	0,6259	1,0396	0,7427	1,8594	1,3980	0,9148	0,6548	1,0392	0,7423	14,195	10,071
2	100	0,8658	0,6770	1,0417	0,7448	1,8728	1,4114	0,9232	0,6632	1,0404	0,7427	14,353	10,228
3	200	0,9102	0,7214	1,0463	0,7494	1,8937	1,4323	0,9353	0,6753	1,0434	0,7465	14,421	10,297
4	300	0,9487	0,7599	1,0538	0,7570	1,9192	1,4574	0,9500	0,6900	1,0488	0,7519	14,446	10,322
5	400	0,9826	0,7938	1,0634	0,7666	1,9477	1,4863	0,9651	0,7051	1,0567	0,7599	14,477	10,353
6	500	1,0128	0,8240	1,0748	0,7775	1,9778	1,5160	0,9793	0,7193	1,0660	0,7691	14,509	10,384
7	600	1,0396	0,8508	1,0861	0,7892	2,0092	1,5474	0,9927	0,7327	1,0760	0,7792	14,542	10,417
8	700	1,0639	0,8746	1,0978	0,8009	2,0419	1,5805	1,0048	0,7448	1,0869	0,7900	14,587	10,463
9	800	1,0852	0,8964	1,1091	0,8122	2,0754	1,6140	1,0157	0,7557	1,0974	0,8005	14,641	10,517
10	900	1,1045	0,9157	1,1200	0,8231	2,1097	1,6483	1,0258	0,7658	1,1078	0,8110	14,706	10,581
11	1000	1,1225	0,9332	1,1304	0,8336	2,1436	1,6823	1,0350	0,7750	1,1179	0,8210	14,776	10,652
12	1100	1,1384	0,9496	1,1401	0,8432	2,1771	1,7158	1,0434	0,7834	1,1271	0,8302	14,853	10,727
13	1200	1,1530	0,9638	1,1493	0,8566	2,2106	1,7488	1,0509	0,7913	1,1359	0,8395	14,934	10,809

№ п/п	Темпе- ратура <i>t</i> , °С	Средняя массовая теплоемкость, кДж/(кг · К)											
		CO ₂		CO		H ₂ O		O ₂		N ₂		H ₂	
		<i>c_{ρm}</i>	<i>c_{υm}</i>	<i>c_{ρm}</i>	<i>c_{υm}</i>	<i>c_{ρm}</i>	<i>c_{υm}</i>	<i>c_{ρm}</i>	<i>c_{υm}</i>	<i>c_{ρm}</i>	<i>c_{υm}</i>	<i>c_{ρm}</i>	<i>c_{υm}</i>
<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>	<i>7</i>	<i>8</i>	<i>9</i>	<i>10</i>	<i>11</i>	<i>12</i>	<i>13</i>	<i>14</i>
14	1300	1,1660	0,9772	1,1577	0,8608	2,2429	1,7815	1,0580	0,7984	1,1447	0,8478	15,023	10,899
15	1400	1,1782	0,9893	1,1656	0,8688	2,2743	1,8129	1,0647	0,8051	1,1526	0,8558	15,113	10,988
16	1500	1,1895	1,0006	1,1731	0,8763	2,3048	1,8434	1,0714	0,8114	1,1602	0,8633	15,202	11,077
17	1600	1,1995	1,0107	1,1798	0,8830	2,3346	1,8728	1,0773	0,8173	1,1673	0,8704	15,294	11,169
18	1700	1,2091	1,0203	1,1865	0,8893	2,3630	1,9016	1,0831	0,8231	1,1736	0,8771	15,383	11,258
19	1800	1,2179	1,0291	1,1924	0,8956	2,3907	1,9293	1,0886	0,8286	1,1798	0,8830	15,472	11,347
20	1900	1,2259	1,0371	1,1983	0,9014	2,4166	1,9552	1,0940	0,8340	1,1857	0,8889	15,561	11,437
21	2000	1,2334	1,0446	1,2033	0,9064	2,4422	1,9804	1,0990	0,8390	1,1911	0,8943	15,649	11,524
22	2100	1,2405	1,0517	1,2083	0,9115	2,4664	2,0051	1,1041	0,8441	1,1966	0,8997	15,736	11,611
23	2200	1,2468	1,0580	1,2129	0,9161	2,4895	2,0281	1,1087	0,8491	1,2012	0,9048	15,819	11,694
24	2300	1,2531	1,0639	1,2175	0,9207	2,5121	2,0503	1,1137	0,8537	1,2058	0,9094	15,902	11,798
25	2400	1,2586	1,0697	1,2217	0,9249	2,5334	2,0720	1,1183	0,8583	1,2104	0,9136	15,983	11,858
26	2500	1,2636	1,0748	1,2259	0,9291	2,5544	2,0926	1,1229	0,8629	1,2142	0,9177	16,064	11,937

**Приближенные значения молярных теплоемкостей
при $p = \text{const}$ и $v = \text{const}$ (в случае $c = \text{const}$) и показателя адиабаты**

№ п/п	Газы	Теплоемкость, Дж/(моль · К)		Показатель адиабаты k
		μc_v	μc_p	
<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>
1	Одноатомные	12,56	20,93	1,67
2	Двухатомные	20,93	29,31	1,4
3	Трех- и многоатомные	29,31	37,68	1,29

Оглавление

ВВЕДЕНИЕ	3
Контрольное задание №1. Расчет характеристик газовой смеси	4
1.1. Исходные данные, условия, расчетные задания	4
1.2. Некоторые общие теоретические сведения	6
1.2.1. Смеси идеальных газов	6
1.2.2. Парциальные давления в газовой смеси. Закон Дальтона	7
1.2.3. Приведенный объем компонента газовой смеси. Закон Амага	7
1.2.4. Химический состав газовой смеси	8
1.2.5. Газовая постоянная идеальной газовой смеси	10
1.2.6. Кажущаяся молярная масса идеальной газовой смеси	11
1.2.7. Удельный объем или плотность газовой смеси	12
1.2.8. Соотношение между массовыми и объемными долями идеальной газовой смеси	13
1.2.9. Понятие теплоемкости. Теплоемкость газовой смеси	14
1.2.10. Теплоемкость газов	16
1.3. Методические указания по решению задания № 1	20
Контрольное задание № 2. Расчет термодинамического цикла в газовой смеси	25
2.1. Исходные данные, условия, расчетные задания	25
2.2. Некоторые общие теоретические сведения	28
2.2.1. Пример совершения полезной работы в круговом процессе ...	28
2.2.2. Сведения о термодинамических циклах	31
2.2.3. Термический КПД прямого цикла	33
2.2.4. Прямой цикл Карно	34
2.3. Методические указания по решению задания № 2	37
Библиографический список	43
ПРИЛОЖЕНИЯ	44

Куликов Александр Александрович
Иванова Ирена Викторовна
Иванов Михаил Михайлович
Прохоров Владимир Алексеевич

ТЕХНИЧЕСКАЯ ТЕРМОДИНАМИКА

АНАЛИЗ

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

В ИДЕАЛЬНЫХ ГАЗОВЫХ СМЕСЯХ

Учебное пособие
для студентов бакалавриата всех форм обучения направления
подготовки 13.03.01 «Теплоэнергетика и теплотехника»
и других направлений

Редактор *Л. В. Лукьянчук*
Компьютерная верстка – *Г. Н. Кинзябулатова*

Подписано в печать с оригинал-макета 24.06.21.
Формат 60×84/16. Бумага офсетная. Печать трафаретная.
Усл.-печ. л. 3,75. Тираж 100 экз. Заказ № 62. С 132.

Санкт-Петербургский государственный
лесотехнический университет имени С. М. Кирова
Издательско-полиграфический отдел
194021, Санкт-Петербург, Институтский пер., 3