

Министерство образования и науки Российской Федерации
федеральное автономное образовательное учреждение высшего образования
Национальный исследовательский Томский политехнический университет

Д.С. Исаченко

**СБОРНИК ИНДИВИДУАЛЬНЫХ ЗАДАНИЙ
ПО КУРСУ «ТЕРМОДИНАМИКА И ТЕПЛОПЕРЕДАЧА»**

*Варианты индивидуальных расчетных заданий
по курсу «Термодинамика и теплопередача» для студентов II курса,
обучающихся по направлению 14.03.02 «Ядерная физика и технологии»*

Томск 2016

Указания к выполнению и оформлению индивидуального задания

1. Условия задачи переписываются полностью без сокращений. Обязательно указывается номер раздела, подраздела и задачи, например: 1.2.3. Здесь: 1 – номер раздела, 2 – номер подраздела, 3 – номер задачи. Номер задачи соответствует номеру варианта. Номер варианта – порядковый номер в списке студентов. n = номеру варианта.
2. Текст и графики должны быть выполнены без помарок и исправлений. Допускается оформление на компьютере. Правила оформления компьютерного варианта указаны в приложении А. Все формулы набираются с использованием встроенного редактора формул (или MathType), греческие символы печатаются прямыми, все переменные – курсивом, русские буквы – прямые, векторы и векторные функции – полужирным. Пример оформления формул и размерностей можно посмотреть в приложении А. Стилистика и ход решения задачи в тетради – аналогично требованиям оформления на компьютере. В тетради все рисунки выполняются карандашом.
3. Титульный лист должен иметь все атрибуты, приведенные в приложении Б.
4. Решение задачи должно содержать основные законы и формулы, на которых базируется решение. Все используемые буквенные обозначения должны быть обозначены с приведением их размерностей. Все используемые формулы должны быть выведены с полным объяснением. После числового ответа должна быть приведена проверка размерности полученной величины.
5. Рекомендуется выполнить чертеж, эскизный рисунок или график, поясняющий содержание задачи или ход решения.
6. Решения задачи должны сопровождаться исчерпывающими, но краткими словесными объяснениями, раскрывающими физический смысл формул и величин.
7. Студент должен быть готов дать устные пояснения по существу решения задач, входящих в его задание.
8. Все справочные величины приведены в приложении В.

Содержание

1	Первое начало термодинамики	4
1.1	Параметры состояния тела	4
1.2	Теплоемкость, внутренняя энергия и энтальпия идеального газа	5
1.3	Смеси газов	7
1.4	Первый закон термодинамики	9
2	Второй закон термодинамики	13
2.1	Энтропия	13
2.2	Термодинамические циклы	15
2.3	Цикл Карно	17
3	Водяной пар и паровые процессы	20
3.1	Состояние водяного пара	20
3.2	Паровые процессы.....	22
3.3	Цикл Ренкина.....	23
	Приложение А – Пример оформления решения задачи.....	25
	Приложение Б – Титульный лист	26
	Приложение В – Справочные данные	27

1 Первое начало термодинамики

1.1 Параметры состояния тела

1 (13, 25). В конденсаторе паровой турбины поддерживается абсолютное давление $p = (0,04 + n)$ кГ/см². Каковы показания вакуумметров, градуированных в кН/м² и в мм.рт.ст., если в одном случае показания барометра составляют 735 мм.рт.ст., а в другом – 764 мм.рт.ст.?

2 (14, 26). Для пуска двигателя внутреннего сгорания (ДВС) используется сжатый воздух, хранящийся в баллоне. Определить отношение давлений в баллоне до и после пуска ДВС, если до пуска показание манометра было $p_{\text{изб}} = 54 \cdot 10^5$ Па, а после пуска $p_{\text{изб}} = 29,4 \cdot 10^4$ Па. Барометрическое давление 742 мм.рт.ст. при температуре $(293,15 + 2 \cdot n)$ К.

3 (15, 27). После пуска двигателя внутреннего сгорания (ДВС) давление сжатого воздуха в пусковом баллоне понизилось от 3,5 до 2,9 МПа. Определить объем израсходованного воздуха при температуре и давлении окружающей среды 18 °С и 1008 гПа, если вместимость пускового баллона $(0,2 + 0,1 \cdot n)$ м³, температура воздуха в баллоне до пуска 18 °С, а после пуска 10 °С.

4 (16, 28). В баллоне вместимостью $(0,10 + 0,1 \cdot n)$ м³ находится кислород при давлении 6 МПа и температуре 25 °С. После того как из него была выпущена часть газа, показание манометра стало 3 МПа, а температура кислорода понизилась до 15 °С. Определить массу выпущенного и плотность оставшегося в баллоне кислорода, если давление окружающей среды 1000 гПа.

5 (17, 29). Баллон вместимостью $(0,0055 + 0,001 \cdot n)$ м³ наполнен углекислым газом (СО₂). Давление сжатого газа по манометру $p_{\text{изб}} = 15$ МПа. Определить температуру сжатого газа, если его объем при н.у. составляет $V = (7,5 + 0,1 \cdot n)$ м³.

6 (18, 30). Определить плотность углекислого газа (азота, метана) при н.у.

7 (19, 31). Молярный объем некоторого двухатомного газа при давлении $p = (0,02 + 0,001 \cdot n)$ МПа и температуре T в три раза больше, чем при н.у. Определить эту температуру. Какой это газ, если его плотность при указанных p и T равна 0,4167 кг/м³?

8 (20, 32). Масса баллона с газом $m_1 = (2,9 + 0,01 \cdot n)$ кг, при этом давление в баллоне по манометру $p_1 = (4 + 0,1 \cdot n)$ МПа. После израсходования части газа при неизменной температуре давление в баллоне понизилось до $p_2 = (1,5 + 0,1 \cdot n)$ МПа, при этом масса баллона с газом уменьшилась до $m_2 = 1,4$ кг. Определить плотность газа при давлении 1013 гПа, если вместимость баллона 0,5 м³.

9 (21, 33). Найти абсолютное давление пара в котле, если манометр показывает $p = (0,13 + 0,005 \cdot n)$ МПа, а атмосферное давление по ртутному барометру составляет $(680 + 5 \cdot n)$ мм.рт.ст. при $t = (25 + n)$ °С.

10 (22, 34). Какая высота водяного столба соответствует $(10 + 2,5 \cdot n)$ Па?

11 (23, 35). Для предупреждения испарения ртути, пары которой оказывают вредное действие на человеческий организм, обычно при пользовании ртутными манометрами над уровнем ртути наливают слой воды. Определить абсолютное давление в сосуде, если разность столбов ртути в U-образном манометре составляет $(580 + 5 \cdot n)$ мм при температуре ртути 25°C , а высота столба воды над ртутью равна $(150 + 2 \cdot n)$ мм. Атмосферное давление по ртутному барометру $(770 + 8 \cdot n)$ мм при $t = 25^\circ\text{C}$.

12 (24, 36). В трубке вакуумметра высота столбика ртути составляет $(570 + 5 \cdot n)$ мм при температуре ртути 20°C . Над ртутью находится столбик воды высотой $(37 + n)$ мм. Барометрическое давление воздуха 728 мм. рт. ст. при $t = 15^\circ\text{C}$. Определить абсолютное давление в сосуде.

1.2 Теплоемкость, внутренняя энергия и энтальпия идеального газа

1 (13, 25). Коэффициент Пуассона для двухатомных газов равен $1,4$. Определить какое количество теплоты потребуется для нагревания 5 м^3 газа на 200 градусов при постоянном объеме и н.у.

2 (14, 26). Подсчитать массовую теплоемкость кислорода и объемную теплоемкость (при н.у.) двуокиси азота при $p = \text{const}$, если молярная теплоемкость μc_v [кДж/(кмоль·град)], одноатомного газа – $12,6$, двухатомного – $20,9$, трех- и многоатомного – $29,3$.

3 (15, 27). Исходя из заданной зависимости истинной молярной теплоемкости [кДж/(кмоль·град)] водорода от температуры

$$\mu c_v = 20,8034 + 0,838 \cdot 10^{-3} T - 2,0112 \cdot 10^{-6} T^2,$$

вычислить значения следующих истинных теплоемкостей водорода при $T = 473 \text{ K}$: μc_p [кДж/(кмоль·град)], c'_p и c'_v [кДж/(м³·град)].

4 (16, 28). Найти изменение внутренней энергии 20 кг ацетилена при изменении его температуры от 300 до 600°C , если зависимость истинной молярной теплоемкости ацетилена [кДж/(кмоль·град)] от температуры выражается уравнением

$$\mu c_p = 26,8696 + 64,0232 \cdot 10^{-3} T - 23,1288 \cdot 10^{-6} T^2.$$

5 (17, 29). Углекислый газ находится в емкости вместимостью $(250 - 0,5 \cdot n)$ л при давлении $(0,25 + 0,01 \cdot n)$ мПа и температуре 100°C . Подсчитать изменение внутренней энергии газа при увеличении его температуры до 200°C , если известны следующие значения средних молярных теплоемкостей углекислого газа:

$$\mu c_p \Big|_0^{100} = 38,118 \text{ кДж/(кмоль·град)};$$

$$\mu_{c_p}|_0^{200} = 40,065 \text{ кДж/(кмоль}\cdot\text{град)}.$$

6 (18, 30). Воздух при нормальном давлении $p_0 = (0,5 - 0,01 \cdot n)$ МПа и температуре $t_0 = (300 + 0,1 \cdot n)$ °С адиабатно расширяется до давления 0,1 МПа. Определить изменение его внутренней энергии и энтальпии.

7 (19, 31). Кислород занимает объем 2 м^3 и имеет параметры $(500 - 0,1 \cdot n)$ °С и $(0,65 + 0,01 \cdot n)$ МПа. Определить конечные значения температуры и плотности газа, если в изобарном процессе его внутренняя энергия уменьшилась на 2500 кДж. Определить также изменение энтальпии кислорода.

8 (20, 32). Вычислить среднюю массовую и среднюю объемную теплоемкость окиси углерода при постоянном объеме для интервала температур 0–1200 °С, если известно, что для окиси углерода $(\mu_{c_{pm}})|_0^{1200} = 32,192 \text{ кДж/(кмоль}\cdot\text{град)}$. Сопоставить полученные результаты с данными таблицы В.7.

9 (21, 33). Опытным путем найдены следующие значения истинной мольной теплоемкости кислорода при постоянном давлении:

$$\text{для } 0 \text{ °С } \mu_{c_p} = 29,2741 \text{ [кДж/кмоль}\cdot\text{град]};$$

$$\text{для } 500 \text{ °С } \mu_{c_p} = 33,5488 \text{ [кДж/кмоль}\cdot\text{град]};$$

$$\text{для } 1000 \text{ °С } \mu_{c_p} = 35,9144 \text{ [кДж/кмоль}\cdot\text{град]}.$$

По этим данным составить приближенное интерполяционное уравнение вида:

$$\mu_{c_p} = a + bt + et^2 ,$$

дающее зависимость истинной мольной теплоемкости кислорода при постоянном давлении от температуры.

10 (22, 34). Используя формулу $\mu_{c_p} = 29,2741 + 0,01046t - 0,0000038t^2$, определить истинную мольную теплоемкость кислорода при постоянном давлении для температуры $(700 - 2 \cdot n)$ °С. Сравнить полученное значение теплоемкости со значением из таблиц.

11 (23, 35). В сосуде объемом $(500 - 1,5 \cdot n)$ л находится кислород при давлении $p_1 = (0,15 + 0,2 \cdot n)$ МПа и температуре $t_1 = 20$ °С. Какое количество теплоты необходимо подвести, чтобы температура кислорода повысилась до $t_2 = 300$ °С? Какое давление установится при этом в сосуде? Зависимость теплоемкости от температуры принять нелинейной.

12 (24, 36). В закрытом сосуде объемом $(500 - 1,5 \cdot n)$ л находится воздух при давлении $p_1 = (0,7 + 0,2 \cdot n)$ МПа и температуре $t_1 = 20$ °С. Какое количество теплоты необходимо подвести для того, чтобы температура воздуха поднялась до $t_2 = 120$ °С? Задачу решить, принимая теплоемкость воздуха постоянной, а также учитывая зависимость теплоемкости от температуры. Определить относительную ошибку, получаемую в первом случае.

1.3 Смеси газов

1 (13, 25). Воздух (приблизительно считая, что он является только смесью азота и кислорода) имеет следующий объемный состав: $r_{N_2} = 79,0\%$; $r_{O_2} = 21,0\%$.

Определить весовые доли азота и кислорода в воздухе; вычислить газовую постоянную и кажущийся молекулярный вес воздуха.

2 (14, 26). $(0,5 - 0,01 \cdot n)$ м³ воздуха смешиваются с $(0,5 + 0,02 \cdot n)$ кг углекислого газа. Оба газа до смешения имели параметры $p = (4 + 0,5 \cdot n)$ кГ/см² и $t = 45$ °С. Определить парциальное давление углекислого газа после смешивания.

3 (15, 27). Дымовые газы имеют следующий массовый состав $g_{CO_2} = 16,1\%$, $g_{O_2} = 7,5\%$, $g_{N_2} = 76,4\%$. Рассчитать энтальпию $h'_{см}$ этих газов, отнесенную к 1 м³ при температуре $t = 800$ °С.

4 (16, 28). Определить удельный объем и массовую теплоемкость ср пара натрия при $p = 1$ Мн/м² и температуре $t = 927$ °С, если известно, что при этих параметрах пар натрия является смесью одноатомных и двухатомных молекул следующего состава $r_{Na} = 0,8628$ и $r_{Na_2} = 0,1372$. Найти парциальные давления одно- и двухатомных паров натрия. Вычислить как велика была бы ошибка в значении удельного объема, если бы пар натрия считался одноатомным газом. Теплоемкости газов, составляющих смесь, рассчитать согласно молекулярно-кинетической теории. Атомный вес натрия принять равным 23,0.

5 (17, 29). Существовали проекты энергетических установок, работающих по парогазовому циклу, в котором рабочим веществом является смесь водяного пара и горячих продуктов сгорания. Массовая доля продуктов сгорания топлива (принять, что продукты сгорания обладают свойствами воздуха) $g = (0,5 + 0,2 \cdot n)$. Определить теплоемкость c_p смеси при температуре $(600 - 0,5 \cdot n)$ и $(750 + 0,7 \cdot n)$ °С, а также удельный объем смеси при температуре $(600 - 0,5 \cdot n)$ °С и давлении $p = 10$ кГ/см².

6 (18, 30). В сосуде находится смесь газов, образовавшаяся в результате смешения $(10 + 0,25 \cdot n)$ кг азота, $(43 - 0,02 \cdot n)$ кг аргона и $(25 + 0,01 \cdot n)$ кг двуокиси углерода. Определить мольный состав смеси, ее удельный объем при н.у., кажущийся молекулярный вес смеси и газовую постоянную, отнесенную к одному нормальному кубическому метру.

7 (19, 31). Влажный воздух представляет собой смесь сухого воздуха и водяного пара. Известно, что на каждый килограмм сухого воздуха во влажном воздухе содержится d г/кг с.в. водяного пара. Определить весовые и объемные доли сухого воздуха и водяного пара, плотность при н.у., газовую постоянную, отнесенную к 1 кг и кажущийся молекулярный вес смеси, если $d = (5 + 0,7 \cdot n)$ г/кг с.в.

8 (20, 32). Объемный состав горючего газа следующий:

компонента	№ варианта		
	8	20	32
$r_{\text{CO}}, \%$	10	5	8
$r_{\text{H}_2}, \%$	45	35	30
$r_{\text{CH}_4}, \%$	35	45	30
$r_{\text{C}_2\text{H}_4}, \%$	4	10	12
$r_{\text{CO}_2}, \%$	3	2	10
$r_{\text{N}_2}, \%$	3	3	10

Определить кажущийся молекулярный вес, плотность, удельный объем при н.у., массовую газовую постоянную R , парциальное давление метана в процентах и весовые содержания компонентов.

9 (21, 33). Смесь газов, получающаяся при сжигании 1 кг мазута в топке парового котла, имеет следующий состав, определенный парциальными объемами составляющих: $V_{\text{CO}_2} = (1,7 + 0,1n) \text{ м}^3$, $V_{\text{O}_2} = (0,77 + 0,01n) \text{ м}^3$, $V_{\text{N}_2} = (13,78 - 0,1n) \text{ м}^3$. Определить весовые доли и парциальные давления составляющих, если общее давление $p = 1,018 \text{ кГ/см}^2$.

10 (22, 34). Сосуд разделен перегородкой на две части, объемы которых равны $V_1 = (1,2 + 0,01 \cdot n) \text{ м}^3$ и $V_2 = (1,3 - 0,02 \cdot n) \text{ м}^3$. В части V_1 содержится двуокись углерода CO_2 при давлении $p_1 = 5 \text{ кГ/см}^2$ и температуре $t_1 = 30 \text{ }^\circ\text{C}$, а в части V_2 – кислород O_2 при $p_2 = 2 \text{ кГ/см}^2$ и $t_2 = 57 \text{ }^\circ\text{C}$. Определить массовые и объемные доли CO_2 и O_2 , кажущийся молекулярный вес смеси и ее газовую постоянную, после того как перегородка будет убрана и процесс смешивания закончится.

11 (23, 35). Имеется два сосуда, соединенных между собой трубкой, на которой установлен кран, разобщающий их. В первом сосуде, емкость которого $V_1 = (1,6 + 0,2 \cdot n) \text{ м}^3$, находится воздух при $p_1 = 10 \text{ кГ/см}^2$ и $t_1 = (25 + 0,5 \cdot n) \text{ }^\circ\text{C}$. Второй ($V_2 = (0,5 + 0,2 \cdot n) \text{ м}^3$) содержит также воздух при $p_2 = 2 \text{ кГ/см}^2$ и $t_2 = (55 + 0,5 \cdot n) \text{ }^\circ\text{C}$. Кран при этом закрыт. Затем кран открывается, и система переходит в равновесное состояние. Определить давление и температуру образовавшейся смеси. Теплоемкость считать не зависящей от температуры.

12 (24, 36). Объемные доли влажного воздуха:

компонента	№ варианта		
	12	24	36
кислород, %	21	15	30,5
азот, %	78,1	83,8	67,6
водяной пар, %	0,9	1,2	1,9

Определить массовые доли, состав и парциальные давления компонентов воздуха при давлении смеси 01, МПа, газовую постоянную воздуха и плотность при н.у.

1.4 Первый закон термодинамики

1. Углекислый газ (CO_2), занимающий объем 450 см^3 и имеющий в начале процесса давление $0,1 \text{ МПа}$, нагревается при постоянном объеме от 100 до $500 \text{ }^\circ\text{C}$. Определить давление в конце нагревания, подведенное количество теплоты и изменение энтальпии, если изобарная средняя молярная теплоемкость углекислого газа равна $49,7 \text{ кДж}/(\text{кмоль} \cdot \text{град})$.
2. От воздуха массой 5 кг при постоянном объеме отводится 1800 кДж теплоты, при этом давление воздуха уменьшается в 3 раза. Определить температуру воздуха после охлаждения, приняв $c_v = 0,718 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{град})$.
3. Пусковой баллон двигателя внутреннего сгорания заполняется продуктами сгорания так, что в конце заполнения они имеют давление $2,4 \text{ МПа}$ при температуре $220 \text{ }^\circ\text{C}$. Определить давление газа в баллоне, когда его температура сравняется с температурой окружающей среды, равной $15 \text{ }^\circ\text{C}$, и выделенное количество теплоты, если вместимость баллона равна 100 л , теплоемкость продуктов сгорания $c_v = 0,735 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{град})$, показатель адиабаты $1,38$.
4. В баллоне вместимостью 40 л избыточное давление воздуха должно иметь значение $12,43 \text{ МПа}$. Температура и давление в помещении, где установлен баллон, $18 \text{ }^\circ\text{C}$ и $0,102 \text{ МПа}$. Какую массу воздуха следует выпустить из баллона для поддержания в нем заданного давления, если за счет солнечной радиации температура сжатого воздуха повысилась на 10 К ? Определить также избыточное давление в баллоне, если при указанных условиях массу воздуха в нем не уменьшать.
5. Воздух расширяется в процессе $p = 0,5 \text{ МПа} = \text{const}$, при этом его объем изменяется от $0,35$ до $1,8 \text{ м}^3$. Температура в конце расширения равна $1500 \text{ }^\circ\text{C}$. Определить температуру воздуха в начале процесса расширения, подведенное количество теплоты, работу, совершенную в этом процессе, изменения внутренней энергии и энтальпии воздуха.
6. В цилиндре ДВС к воздуху подводится количество теплоты $8120 \text{ кДж}/\text{кмоль}$ при постоянном давлении. Определить расстояние поршня от верхней мертвой точки в конце этого процесса и работу, совершенную воздухом, если объем камеры сжигания составляет 250 см^3 , диаметр цилиндра 80 мм , начальная температура воздуха $t_1 = 540 \text{ }^\circ\text{C}$.
7. На сжатие 5 кг азота (N_2) при $t = 100 \text{ }^\circ\text{C}$ затрачена работа 1800 кДж . Определить давление и объем, занимаемый азотом в конце сжатия, если начальное давление $p_1 = 0,25 \text{ МПа}$.
8. В процессе подвода теплоты рабочее тело (CO_2) расширяется в 3 раза при температуре $t_1 = 650 \text{ }^\circ\text{C} = \text{const}$ до давления 5 МПа . Определить начальное давление и плотность рабочего тела, а также подведенное количество теплоты, если массовый расход углекислого газа составляет $1000 \text{ кг}/\text{ч}$.

9. В компрессоре сжимается $300 \text{ м}^3/\text{ч}$ (н.у.) воздуха при температуре $t_1 = 30 \text{ }^\circ\text{C} = \text{const}$. Начальное давление воздуха $0,2 \text{ МПа}$, мощность, потребляемая компрессором, 12 кВт . Определить давление и плотность воздуха в конце сжатия и расход воды на охлаждение цилиндров, если вода нагревается на 20 К .
10. При изотермическом расширении $0,25 \text{ кг}$ кислорода в цилиндре поршневой машины давление понижается от $12,5$ до $5,6 \text{ МПа}$, а поршень перемещается на 50 мм . Определить температуру кислорода, подведенное количество теплоты и произведенную работу, если диаметр цилиндра 220 мм .
11. Воздух массой 1 кг при давлении $p_1 = 0,1 \text{ МПа}$ и температуре $t_1 = 30 \text{ }^\circ\text{C}$ сначала сжимается изотермически до давления $p_2 = 1 \text{ МПа}$, затем расширяется при постоянном давлении до десятикратного объема, после чего, охлаждаясь при постоянном объеме, принимает первоначальное состояние. Определить параметры воздуха в начале и в конце каждого процесса, а также для каждого процесса изменение внутренней энергии и энтальпии, работу и количество теплоты. Изобразить изменение состояния воздуха в координатах p, v, T и s .
12. Воздух массой $0,5 \text{ кг}$ при давлении $p_1 = 0,2 \text{ МПа}$ занимает объем $V_1 = 0,4 \text{ м}^3$. Воздух изотермически расширяется, а затем изохорически нагревается так, что в конечном состоянии его давление становится равным первоначальному. Суммарное количество теплоты, подводимое к газу в процессах $T = \text{const}$ и $v = \text{const}$, равно $370,5 \text{ кДж}$. Определить работу, совершенную воздухом в указанном процессе и параметры воздуха в конце изотермического расширения.
13. Воздух массой 1 кг при температуре $t_1 = -20 \text{ }^\circ\text{C}$ и давлении $p_1 = 0,1 \text{ МПа}$ адиабатно сжимается до давления $p_2 = 0,8 \text{ МПа}$. Определить удельный объем воздуха и его температуру в конце сжатия и затраченную работу.
14. Воздух массой 1 кг при температуре $t_1 = 25 \text{ }^\circ\text{C}$ и давлении $p_1 = 0,102 \text{ МПа}$ адиабатно сжимается до давления $p_2 = 2 \text{ МПа}$. Определить удельные изменения внутренней энергии и энтальпии воздуха, работу деформации и располагаемую работу.
15. Процесс расширения гелия (He) в турбине протекает адиабатно. Параметры гелия ($\mu_{\text{He}} = 4$) на входе $p_1 = 1 \text{ МПа}$ и $t_1 = 700 \text{ }^\circ\text{C}$; давление за турбиной $p_2 = 0,1 \text{ МПа}$. Внутренний относительный КПД турбины $\eta_{oiT} = 0,86$. Действительная (на лопатках) мощность турбины $N = 40 \text{ МВт}$. Определить температуру гелия на выходе из турбины t_2 и массовый расход гелия. Теплоемкость гелия $\mu c_p = 20,8 \text{ кДж}/(\text{кмоль} \cdot \text{град})$.
16. В газовой турбине адиабатно расширяется 1000 кг/ч воздуха от состояния $p_1 = 0,8 \text{ МПа}$, $t_1 = 650 \text{ }^\circ\text{C}$ до $p_2 = 0,1 \text{ МПа}$. Определить температуру воздуха на выходе из турбины, изменение внутренней энергии воздуха, проходящего через турбину за 1 с , и теоретическую мощность турбины.

17. Углекислый газ расширяется по адиабате в турбине, мощность которой равна 1000 кВт. Определить массовый расход углекислого газа, если его давление и температура на входе в турбину 0,32 МПа и 827 °С, а давление на выходе 0,15 МПа. Какой будет мощность турбины, если вместо углекислого газа ($c_p = 1,13$ кДж/(кг·град)) в ней будет расширяться то же количество гелия ($c_p = 5,2$ кДж/(кг·град)) при тех же исходных данных?
18. В цилиндре ДВС воздух, имеющий температуру $t_1 = 17$ °С и давление $p_1 = 0,1$ МПа, сжимается по адиабате, а затем при $p = \text{const}$; к нему подводится количество теплоты 150 кДж. В конце изобарного процесса температура $t_3 = 650$ °С. Определить степень адиабатного сжатия $\varepsilon = v_1/v_2$, давление $p_2 = p_3$ и работу адиабатного сжатия. Каким будет максимальное давление, если при полученной степени сжатия то же количество теплоты подвести по изохоре?
19. В поршневом детандере установки глубокого охлаждения политропно расширяется воздух от начального давления $p_1 = 20$ МПа и температуры $t_1 = 20$ °С до конечного давления $p_2 = 1,6$ МПа. Показатель политропы $n = 1,25$. Определить параметры воздуха в конце расширения, удельные значения изменения внутренней энергии и энтальпии, количества теплоты, работы процесса и располагаемой работы.
20. Воздух, расширяясь, проходит через следующие состояния: 1) $p_1 = 1000$ гПа, $t_1 = 0$ °С; 2) $p_2 = 1000$ кПа, $v_2 = 0,1$ м³/кг; 3) $v_3 = 0,13$ м³/кг, $t_3 = 180$ °С; 4) $p_4 = 1,5$ МПа, $v_4 = 0,087$ м³/кг. Для процессов 1–2, 2–3 и 3–4 определить значения показателя политропы и указать название процесса и алгебраический знак работы.
21. Два процесса характеризуются показателями политропы: 1) $n = 1,7$; 2) $n = 0,7$. Какому значению n соответствует повышение температуры газа при сжатии и какому – понижение? Во сколько раз понизится температура в одном из указанных процессов сжатия при изменении давления в 5 раз?
22. Определить показатель политропы, отведенное количество теплоты, среднюю массовую теплоемкость процесса, изменение внутренней энергии и затраченную работу, если в результате сжатия 18 м³ воздуха от давления $p_1 = 0,1$ МПа до давления $p_2 = 0,8$ МПа объем его уменьшился в 6 раз.
23. В политропном процессе заданы начальные параметры 1 кг воздуха: $p_1 = 0,1$ МПа, $t_1 = 0$ °С, и конечные: $p_2 = 0,8$ МПа и $v_2 = 0,14$ м³/кг. Определить показатель политропы n , количество теплоты q , изменение внутренней энергии Δu , изменение энтальпии Δh , работу деформации l , располагаемую работу l_0 и изменение энтропии Δs .
24. В некотором политропном процессе кислород был нагрет от $T_1 = 300$ К до $T_2 = 500$ К, при этом его объем увеличился в 2,5 раза. Найти теплоемкость кислорода в этом процессе, если его изобарная теплоемкость $c_p = 0,94$ кДж/(кг·К). Как организовать дальнейшее нагревание газа, чтобы при подводе количества теплоты

170 кДж/кг его температура увеличилась в 1,5 раза? Изобразить процессы в координатах p, v .

25. В политропном процессе, совершаемом количеством вещества гелия $n_{\text{He}} = 2$ кмоль, отводится количество теплоты 3000 кДж. Начальные параметры процесса: $p_1 = 0,15$ МПа, $t_1 = 227$ °С; конечная температура 127 °С. Молярная теплоемкость гелия $\mu c_v = 12,5$ кДж/(кмоль·град). Определить показатель политропы, начальные и конечные параметры газа, изменение внутренней энергии и энтальпии, работу процесса и располагаемую работу, изменение энтропии. Изобразить процессы в координатах p, v, T, s .

26. Компрессор сжимает воздух от 0,1 до 1,0 МПа. Сначала сжатие протекает по политропе с показателем $n_1 = 1,38$; после очистки рубашек цилиндров и усиленного отвода теплоты компрессор стал работать по политропе с показателем $n_2 = 1,16$. Определить экономию работы компрессора после очистки рубашек.

27. В цилиндре карбюраторного ДВС после сжатия горючей смеси оказывается давление $p_1 = 15$ кг/см² и температура $t_1 = 365$ °С. В этот момент смесь поджигается при помощи электрической свечи, после чего происходит весьма быстрый процесс горения, протекающий практически при постоянном объеме. Определить давление и температуру в конце процесса, условно заменяя процесс горения смеси обратимым изохорическим процессом, в котором к рабочему телу подводится тепло $q = 110$ ккал/кг. Рабочее тело считать обладающим свойствами воздуха. Теплоемкость c_v считать зависящей от температуры.

28. В цилиндре, площадь поперечного сечения которого равна 1 дм², под поршнем находится $\frac{1}{2}$ кмоль азота N_2 при температуре $t_1 = 63$ °С. Поршень находится под постоянной внешней нагрузкой $F = 2$ кН. Газу извне сообщается тепло $Q = 1500$ ккал, вследствие чего он расширяется. Отодвигая поршень. Определить параметры p, v, t в конце процесса, изменение внутренней энергии Δu , изменение энтальпии Δh и величину работы расширения l , совершенной газом.

29. 0,5 м³ окиси углерода находится в состоянии при $p_1 = 25$ кг/см² и $t_1 = 350$ °С. В изотермическом процессе к газу подведено тепло $Q = 20$ ккал. Найти параметры p, v начального и конечного состояний, работу расширения, совершенную газом, изменение внутренней энергии и энтальпии.

30. Во сколько раз изменится абсолютное значение работы изотермического сжатия 1 кг идеального газа, имеющего температуру T К и давление $p_1 = 1$ бар, если конечное давление p_2 в первом процессе равно 10 бар, а в других увеличивается в 10, 100 и 1000 раз? Как изменится величина работы, если абсолютная температура увеличится в 10 раз?

31. Применив первый закон термодинамики. Показать, что кривая изображающая адиабату идеального газа в p - v -координатах, проходит всегда круче, чем кривая изотермического процесса.

32. При адиабатическом расширении 1 кг воздуха ($k = 1,4 = \text{const}$) температура его падает на 120°C . Какова полученная в процессе расширения работа и сколько тепла следовало бы подвести к воздуху, чтобы ту же по величине работу получить в изотермическом процессе.

33. Какова начальная температура t_1 азота, если его конечная температура после совершения процесса адиабатического сжатия $t_2 = 750^\circ\text{C}$? Известная степень сжатия $\varepsilon = v_1/v_2 = 10$. Теплоемкости c_p и c_v постоянны.

34. В поршневом компрессоре сжимается воздух, имеющий давление $p_1 = 1 \text{ кг/см}^2$ и температуру $t_1 = 20^\circ\text{C}$. Процесс сжатия политропный с показателем политропы $n = 1,3$. Давление в конце сжатия $p_2 = 7 \text{ кг/см}^2$. Определить работу сжатия для 1 кг воздуха и количество отнятого тепла.

35. При политропном расширении газа его объем увеличивается на 20%, а абсолютная температура уменьшается на 12%. Показать примерный ход процесса для двухатомного газа в координатах $p\nu$ и подсчитать величину работы μl , если $t_1 = 227^\circ\text{C}$.

36. В политропном процессе расширения окиси углерода энергия, выделяемая газом в форме работы, составляет за счет подводимого тепла (25%) и за счет уменьшения внутренней энергии газа (75%). Определить показатель политропы и теплоемкость процесса. Представить ход процесса в $p\nu$ -диаграмме.

2 Второй закон термодинамики

2.1 Энтропия

1 (19). Определить энтропию 1 кг кислорода при $p = 0,8 \text{ МПа}$ и $t = 250^\circ\text{C}$. Теплоемкость считать постоянной.

2 (20). Определить энтропию 6,4 кг азота при $p = 0,5 \text{ МПа}$ и $t = 300^\circ\text{C}$. Теплоемкость считать постоянной.

3 (21). Определить энтропию 1 кг кислорода при $p = 0,8 \text{ МПа}$ и $t = 250^\circ\text{C}$. Теплоемкость считать переменной, приняв зависимость ее от температуры линейной.

4 (22). 1 кг кислорода при температуре $t_1 = 127^\circ\text{C}$ расширяется до пятикратного объема, температура его при этом падает до $t_2 = 27^\circ\text{C}$. Определить изменение энтропии, теплоемкость считать постоянной.

5 (23). 1 кг воздуха сжимается от $p_1 = 0,1 \text{ МПа}$ и $t_1 = 15^\circ\text{C}$ до $p_2 = 0,5 \text{ МПа}$ и $t_2 = 100^\circ\text{C}$. Определить изменение энтропии. Теплоемкость считать постоянной.

6 (24). 1 кг воздуха сжимается по адиабате так, что объем его уменьшается в 6 раз, а затем при $\nu = \text{const}$ давление повышается в 1,5 раза. Найти общее изменение энтропии воздуха. Теплоемкость считать постоянной.

7 (25). В Ts -диаграмме для идеального газа (рис. 1) нанесены 3 изобары. Две крайние изобары относятся к давлениям соответственно 0,1 и 10 МПа. Определить, какое давление соответствует средней изобаре.

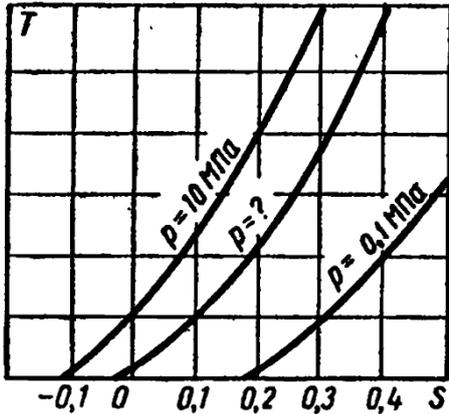


Рис. 1. К задаче 2.1.7 (25).

8 (26). 10 м^3 воздуха, находящегося в начальном состоянии при н.у., сжимают до конечной температуры $400 \text{ }^\circ\text{C}$. Сжатие производится: 1) изохорно, 2) изобарно, 3) адиабатно и 4) политропно с показателем политропы $n = 2,2$. Считая значение энтропии при н.у. равным нулю и принимая теплоемкость воздуха постоянной, найти энтропию воздуха в конце каждого процесса.

9 (27). Найти приращение энтропии 3 кг воздуха: а) при нагревании его по изобаре от 0 до $400 \text{ }^\circ\text{C}$; б) при нагревании его по изохоре от 0 до $880 \text{ }^\circ\text{C}$; в) при изотермическом расширении с увеличением объема в 16 раз. Теплоемкость считать постоянной.

10 (28). 1 кг воздуха сжимается по политропе от 0,1 МПа и $20 \text{ }^\circ\text{C}$ до 0,8 МПа при $n = 1,2$. Определить конечную температуру, изменение энтропии, количество отведенной теплоты и затраченную работу.

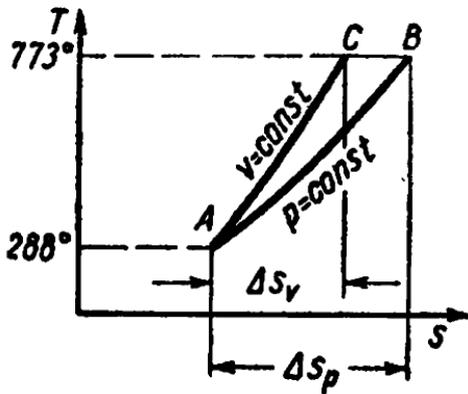


Рис. 2. К задаче 2.1.11 (29).

11 (29). 1 кг воздуха, находящемуся в состоянии А (рис. 2), сообщается теплота один раз при $p = \text{const}$ и другой – при $v = \text{const}$ так, что в обоих случаях конечные температуры одинаковы. Сравнить изменение энтропии в обоих процессах, если $t_1 = 15 \text{ }^\circ\text{C}$ и $t_2 = 500 \text{ }^\circ\text{C}$. Теплоемкость считать переменной, приняв зависимость ее от температуры линейной.

12 (30). В процессе политропного расширения воздуха температура его уменьшилась от $t_1 = 25 \text{ }^\circ\text{C}$ до $t_2 = -37 \text{ }^\circ\text{C}$. Начальное давление воздуха $p_1 = 0,4 \text{ МПа}$, количество его $M = 2 \text{ кг}$. Определить изменение энтропии в этом процессе, если известно, что количество подведенной к воздуху теплоты составляет $89,2 \text{ кДж}$.

13 (31). Построить в диаграмме Ts для 1 кг воздуха в пределах от 0 до $200 \text{ }^\circ\text{C}$ изохоры: $v_1 = 0,2 \text{ м}^3/\text{кг}$, $v_2 = 0,4 \text{ м}^3/\text{кг}$, $v_3 = 0,6 \text{ м}^3/\text{кг}$. Теплоемкость считать постоянной.

14 (32). Построить в Ts -диаграмме для воздуха, в пределах от 0 до $500 \text{ }^\circ\text{C}$, изобары: $p_1 = 0,2 \text{ МПа}$, $p_2 = 0,6 \text{ МПа}$ и $p_3 = 1,8 \text{ МПа}$.

15 (33). 1 кг воздуха при $p_1 = 0,9$ МПа и $t_1 = 10$ °С сжимается по адиабате до $p_2 = 3,7$ МПа. Пользуясь Ts -диаграммой, найти конечную температуру, а также давление, до которого нужно сжать воздух, чтобы температура его стала $t_3 = 80$ °С.

16 (34). 1 кг воздуха расширяется по адиабате от $p_1 = 0,6$ МПа и $t_1 = 130$ °С до $p_2 = 0,2$ МПа. Определить конечную температуру, пользуясь Ts -диаграммой.

17 (35). 1 кг воздуха при $p_1 = 0,09$ МПа и $t_1 = 100$ °С сжимается по адиабате так, что его объем уменьшается в 16 раз. Найти конечную температуру и конечное давление, пользуясь Ts -диаграммой.

18 (36). В сосуде объемом 300 л заключен воздух при давлении $p_1 = 5$ МПа и температуре $t_1 = 20$ °С. Параметры среды: $p_0 = 0,1$ МПа, $t_0 = 20$ °С. Определить максимальную полезную работу, которую может произвести сжатый воздух, находящийся в сосуде. Представить процесс в диаграмме $p\nu$.

2.2 Термодинамические циклы

1 (19). 1 кг воздуха совершает цикл Карно в пределах температур $t_1 = 627$ °С и $t_2 = 27$ °С, причем наивысшее давление составляет 6 МПа, а наименьшее – 0,1 МПа. Определить параметры состояния воздуха в характерных точках цикла, работу, термический КПД цикла и количество подведенной и отведенной теплоты.

2 (20). 1 кг воздуха совершает цикл Карно в пределах температур $t_1 = 327$ °С и $t_2 = 27$ °С, причем наивысшее давление составляет 2 МПа, а наименьшее – 0,12 МПа. Определить параметры состояния воздуха в характерных точках цикла, работу, термический КПД цикла и количество подведенной и отведенной теплоты.

3 (21). 1 кг воздуха совершает цикл Карно в пределах температур $t_1 = 250$ °С и $t_2 = 30$ °С, причем наивысшее давление составляет 1 МПа, а наименьшее – 0,12 МПа. Определить параметры состояния воздуха в характерных точках цикла, работу, термический КПД цикла и количество подведенной и отведенной теплоты.

4 (22). Для идеального цикла поршневого двигателя внутреннего сгорания с подводом теплоты при $\nu = \text{const}$ определить параметры в характерных точках, полученную работу, термический КПД, количество подведенной и отведенной теплоты, если дано: $p_1 = 0,1$ МПа, $t_1 = 20$ °С, степень сжатия $\varepsilon = 3,6$, степень увеличения давления $\lambda = 3,33$, $k = 1,4$. Рабочее тело – воздух. Теплоемкость принять постоянной.

5 (23). Для цикла поршневого ДВС с подводом теплоты при $\nu = \text{const}$ определить параметры характерных для цикла точек, полученную работу, термический КПД, количество подведенной и отведенной теплоты, если дано: $p_1 = 0,1$ МПа, $t_1 =$

$= 100\text{ }^{\circ}\text{C}$, степень сжатия $\varepsilon = 6$, степень увеличения давления $\lambda = 1,6$, $k = 1,4$. Рабочее тело – воздух. Теплоемкость принять постоянной.

6 (24). В цикле поршневого двигателя внутреннего сгорания с подводом теплоты при $\nu = \text{const}$ степень сжатия $\varepsilon = 5$, степень увеличения давления $\lambda = 1,5$. Определить термический КПД этого цикла, а также цикла Карно, совершающегося при тех же предельных температурах. Рабочее тело – воздух. Теплоемкость принять постоянной.

7 (25). построить график зависимости термического КПД от степени сжатия для цикла поршневого двигателя внутреннего сгорания с подводом теплоты при $\nu = \text{const}$ для значений ε от 2 до 10 при $k = 1,37$.

8 (26). 1 кг воздуха работает по циклу, представленному на рис. 3. Начальное давление воздуха $p_1 = 0,1\text{ МПа}$, начальная температура $t_1 = 27\text{ }^{\circ}\text{C}$, а степень сжатия $\varepsilon = 5$. Количество теплоты, подводимой во

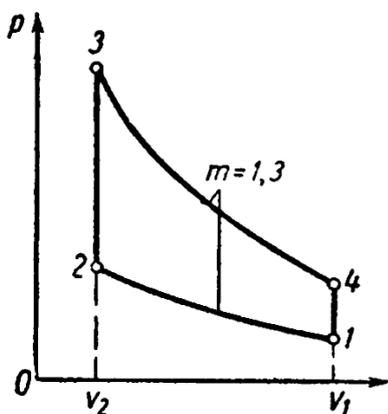


Рис. 3. К задаче 2.2.8 (26).

время изохорного сжатия равно 1300 кДж/кг . Определить параметры воздуха в характерных точках и полезную работу цикла. Теплоемкость воздуха считать постоянной.

9 (27). Температура воспламенения топлива, подаваемого в цилиндр двигателя с изобарным подводом теплоты, равна $800\text{ }^{\circ}\text{C}$. Определить минимально необходимое значение степени сжатия ε , если начальная температура $t_1 = 77\text{ }^{\circ}\text{C}$. Сжатие считать адиабатным, $k = 1,4$.

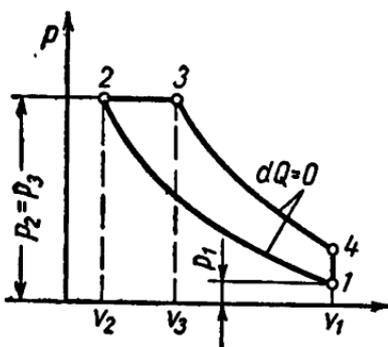


Рис. 4. К задаче 2.2.10 (28).

10 (28). Для цикла с подводом теплоты при $p = \text{const}$ (рис. 4) найти параметры в характерных точках, полезную работу, термический КПД, количество подведенной и отведенной теплоты, если $p_1 = 0,1\text{ МПа}$, $t_1 = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$, степень сжатия $\varepsilon = 12,7$, показатель адиабаты $k = 1,4$. Рабочее тело – воздух. Теплоемкость считать постоянной.

11 (29). Для цикла поршневого двигателя внутреннего сгорания с подводом теплоты при постоянном давлении определить параметры в характерных точках, полезную работу, количество подведенной и отведенной теплоты и термический КПД, если дано $p_1 = 100\text{ кПа}$, $t_1 = 70\text{ }^{\circ}\text{C}$, степень сжатия $\varepsilon = 12$, показатель адиабаты $k = 1,4$, степень предварительного расширения $\rho = 1,67$. Рабочее тело – воздух. Теплоемкость считать постоянной.

12 (30). Найти давление и объем в характерных точках цикла поршневого двигателя внутреннего сгорания с подводом теплоты при постоянном давлении, а

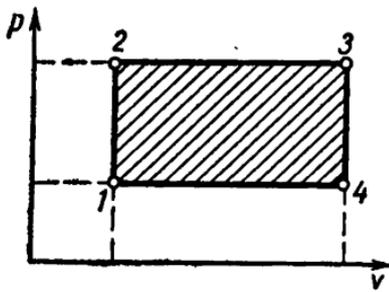


Рис. 5. К задаче 2.2.15 (33).

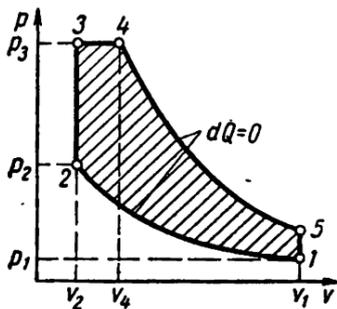


Рис. 6. К задаче 2.2.16 (34).

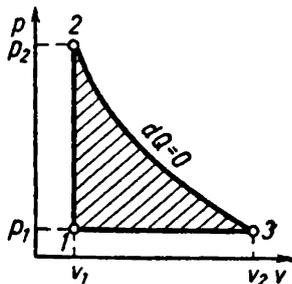


Рис. 7. К задаче 2.2.17 (35).

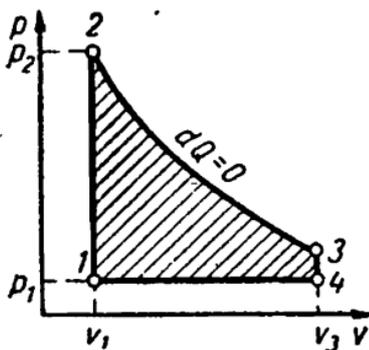


Рис. 8. К задаче 2.2.18 (36).

также термический КПД и полезную работу, если дано $p_1 = 100$ кПа, степень сжатия $\varepsilon = 14$, показатель адиабаты $k = 1,4$, степень предварительного расширения $\rho = 1,5$. Диаметр цилиндра $d = 0,3$ м, ход поршня $S = 0,45$ м. Рабочее тело – воздух. Теплоемкость считать постоянной.

13 (31). Построить график зависимости термического КПД цикла с подводом теплоты при постоянном давлении от степени предварительного расширения для значений его от 1,5 до 3,5 при $\varepsilon = 16$ и $k = 1,4$.

14 (32). В цикле с подводом теплоты при постоянном давлении начальное давление воздуха $p_1 = 0,09$ МПа, температура $t_1 = 47$ °С, степень сжатия $\varepsilon = 12$, степень предварительного расширения $\rho = 2$ и $V_1 = 1$ м³. Определить параметры в характерных точках цикла, количество подведенной и отведенной теплоты, работу цикла и его термический КПД. Рабочее тело – воздух. Теплоемкость принять постоянной.

15 (33). Определить термический КПД цикла, состоящего из двух изохор и двух изобар (рис. 5). Рабочее тело – воздух. Теплоемкость принять постоянной.

16 (34). Найти термический КПД цикла, изображенного на рис. 6. Пользоваться при выводе следующими обозначениями: $v_1/v_2 = \varepsilon$, $p_3/p_2 = \lambda$, $v_4/v_3 = \rho$, $v_5/v_4 = \delta$. Теплоемкость принять постоянной.

17 (35). Определить термический КПД цикла (рис. 7), состоящего из изохоры, адиабаты и изобары.

18 (36). Найти термический КПД цикла, изображенного на рис. 8. Рабочее тело – воздух. Теплоемкость принять постоянной.

2.3 Цикл Карно

1 (19). Идеальный газ совершает цикл Карно. Температура охладителя равна 290 К. Во сколько раз увеличится КПД цикла, если температура нагревателя повысится от 400 К до 600 К?

2 (20). Идеальный газ совершает цикл Карно. Температура нагревателя в три раза выше температуры охладителя. Нагреватель передал газу количество теплоты $Q_1 = 42$ кДж. Какую работу совершил газ?

3 (21). Идеальный газ совершает цикл Карно. Температура нагревателя равна 470 К, температура охладителя равна 280 К. При изотермическом расширении газ совершает работу 100 Дж. Определить термический КПД цикла, а также количество теплоты Q_2 , которое газ отдает охладителю при изотермическом сжатии.

4 (22). Идеальный газ совершает цикл Карно. Температура нагревателя в четыре раза выше температуры охладителя. Какую долю ω количества теплоты, получаемого за один цикл от нагревателя, газ отдает охладителю?

5 (23). Идеальный газ, совершающий цикл Карно, получив от нагревателя количество теплоты $Q_1 = 4,2$ кДж, совершил работу 590 Дж. Найти термический КПД этого цикла. Во сколько раз температура нагревателя больше температуры охладителя?

6 (24). Идеальная тепловая машина, работающая по циклу Карно, за цикл получает от нагревателя количество теплоты $Q_1 = 2,512$ кДж. Температура нагревателя 400 К, температура холодильника 300 К. Найти работу A , совершаемую машиной за один цикл и количество теплоты Q_2 , отдаваемое холодильнику за один цикл.

7 (25). Идеальная тепловая машина, работающая по циклу Карно, совершает за один цикл работу $A = 2,94$ кДж и отдает за один цикл холодильнику количество теплоты $Q_2 = 13,4$ кДж. Найти КПД цикла.

8 (26). Идеальная тепловая машина, работающая по циклу Карно, совершает за один цикл работу $A = 73,5$ кДж. Температура нагревателя 100 °С, температура холодильника 0 °С. Найти КПД цикла, количество теплоты Q_1 , получаемой машиной за один цикл от нагревателя и количество теплоты Q_2 , отдаваемое за один цикл холодильнику.

9 (27). Идеальная тепловая машина работает по циклу Карно. При этом 80% количества теплоты, получаемого от нагревателя, передается холодильнику. Машина получает от нагревателя количество теплоты $Q_1 = 6,28$ кДж. Найти КПД цикла и работу A , совершаемую за один цикл.

10 (28). Идеальная тепловая машина работает по циклу Карно. Воздух при давлении $p_1 = 708$ кПа и температуре $t_1 = 127$ °С занимает объем $V_1 = 2$ л. После изотермического расширения воздух занял объем $V_2 = 5$ л; после адиабатического расширения объем стал равным $V_3 = 8$ л. Найти: а) координаты пересечения изотерм и адиабат; б) работу A , совершаемую на каждом участке цикла; в) полную работу A , совершаемую за весь цикл; г) КПД цикла; д) количество

теплоты Q_1 , полученное от нагревателя за один цикл и количество теплоты Q_2 , отданное холодильнику за один цикл.

11 (29). Количество $\nu = 1$ кмоль идеального газа совершает цикл, состоящий из двух изохор и двух изобар. При этом объем газа изменяется от $V_1 = 25 \text{ м}^3$ до $V_2 = 50 \text{ м}^3$ и давление изменяется от $p_1 = 100 \text{ кПа}$ до $p_2 = 200 \text{ кПа}$. Во сколько раз работа, совершаемая при таком цикле, меньше работы, совершаемой в цикле Карно, изотермы которого соответствуют наибольшей и наименьшей температурам рассматриваемого цикла, если при изотермическом расширении объем увеличился в 2 раза?

12 (30). Идеальная холодильная машина, работающая по обратному циклу Карно, совершает за один цикл работу $A = 37 \text{ кДж}$. При этом она берет тепло от тела с температурой $t_2 = -10 \text{ }^\circ\text{C}$ и передает тепло телу с температурой $t_1 = 17 \text{ }^\circ\text{C}$. Найти КПД цикла, количество теплоты Q_1 , переданное более горячему телу за один цикл.

13 (31). Идеальная холодильная машина работает как тепловой насос по обратному циклу Карно. При этом она берет тепло от воды с температурой $t_2 = 2 \text{ }^\circ\text{C}$ и передает его воздуху с температурой $t_1 = 27 \text{ }^\circ\text{C}$. Найти: а) коэффициент η_1 – отношение количества теплоты, переданного воздуху за некоторый промежуток времени, к количеству теплоты, отнятому за это же время от воды; б) коэффициент η_2 – отношение количества теплоты, отнятого за некоторый промежуток времени от воды, к затраченной на работу машины энергии за этот же промежуток времени (холодильный коэффициент машины); в) коэффициент η_3 – отношение затраченной на работу машины энергии к количеству теплоты, переданному за это же время воздуху (КПД цикла). Найти соотношение между коэффициентами η_1 , η_2 и η_3 .

14 (32). Идеальная холодильная машина, работающая по обратному циклу Карно, передает тепло от холодильника с водой при температуре $t_2 = 0 \text{ }^\circ\text{C}$ кипятивнику с водой при температуре $t_1 = 100 \text{ }^\circ\text{C}$. Какую массу m_2 воды нужно заморозить в холодильнике, чтобы превратить в пар массу $m_1 = 1 \text{ кг}$ воды в кипятивнике?

15 (33). Помещение отапливается холодильной машиной, работающей по обратному циклу Карно. Во сколько раз количество теплоты Q , получаемое помещением от сгорания дров в печке, меньше количества теплоты Q' , переданного помещению холодильной машиной, которая приводится в действие тепловой машиной, потребляющей ту же массу дров? Тепловой двигатель работает между температурами $t_1 = 100 \text{ }^\circ\text{C}$ и $t_2 = 0 \text{ }^\circ\text{C}$. Помещение требуется поддерживать при температуре $t'_1 = 16 \text{ }^\circ\text{C}$. Температура окружающего воздуха $t'_2 = -10 \text{ }^\circ\text{C}$.

16 (34). Идеальный газ, совершающий цикл Карно, $2/3$ количества теплоты Q_1 , полученного от нагревателя, отдает охладителю. Температура охладителя равна 280 К. Определить температуру нагревателя.

17 (35). Идеальный газ совершает цикл Карно. Работа A_1 изотермического расширения газа равна 5 Дж. Определить работу A_2 изотермического сжатия, если термический КПД цикла равен 0,2.

18 (36). Наименьший объем газа V_1 , совершающего цикл Карно, равен 153 л. Определить наибольший объем V_3 , если объем V_2 в конце изотермического расширения и объем V_4 в конце изотермического сжатия равны соответственно 600 и 189 л.

3 Водяной пар и паровые процессы

3.1 Состояние водяного пара

1. Сухой насыщенный пар имеет давление 10,2 МПа. Определить все остальные параметры пара.

2. Определить состояние водяного пара, если температура его 300 °С, а давление 6,0 МПа.

3. Определить состояние водяного пара, если его давление 4,5 МПа, а удельный объем 0,0707 м³/кг.

4. Состояние водяного пара характеризуется давлением 9 МПа и влажностью 20%. Найти удельный объем, внутреннюю энергию, энтропию и энтальпию пара.

5. Вода нагрета до 150,96 °С (при давлении 1,2 МПа). На сколько градусов необходимо еще нагреть воду, чтобы началось кипение.

6. Определить состояние водяного пара, если его температура 263,37 °С, а давление 2,0 МПа.

7. Определить состояние водяного пара, если его давление 7,5 МПа, а удельный объем 0,019 м³/кг.

8. В верхней половине барабана парового котла находится сухой насыщенный пар, а в нижней – вода в состоянии насыщения. Во сколько раз масса воды больше массы пара, если давление пара в барабане $p = 11,5$ МПа.

9. Состояние водяного пара определяется давлением 14 МПа и температурой 813 К. Найти значения остальных параметров состояния.

10. Сухой насыщенный пар массой 16 кг занимает объем, равный 4 м³. Найти температуру и давление насыщения.

11. Сухой насыщенный пар объемом 1,5 м³ при давлении в 1 МПа подогревается так, что давление в конце процесса увеличивается вдвое при неизменном объеме. Найти количество теплоты, затраченное на нагревание.

12. Определить температуру, удельный объем, плотность, энтальпию и энтропию сухого насыщенного пара при давлении 1 МПа.

13. Сухой насыщенный пар имеет давление 1,4 МПа. Определить остальные параметры пара.
14. Вода, находящаяся под давлением 1,5 МПа, нагрета до 190 °С. Наступило ли кипение?
15. При давлении 0,9 МПа вода нагрета до 150 °С. На сколько градусов нужно еще нагреть воду, чтобы началось кипение?
16. Температура воды, находящейся в закрытом сосуде, равна 190 °С. Под каким давлением находится вода?
17. Найти давление, удельный объем и плотность воды, если она находится в состоянии кипения и температура ее равна 250 °С.
18. На паропроводе насыщенного пара установлен термометр, показывающий температуру 175 °С. Каково было бы показание манометра на этом паропроводе?
19. Манометр парового котла показывает давление 0,2 МПа. Показание барометра 0,103 МПа. Считая пар сухим насыщенным, определить его температуру, удельный объем и энтальпию.
20. Манометр парового котла показывает давление 0,15 МПа. Показание барометра равно 1,01 МПа. Считая пар сухим насыщенным, найти его температуру и удельный объем.
21. Определить состояние водяного пара, если давление его 0,5 МПа, а температура 172 °С.
22. Определить состояние водяного пара, если давление его 0,6 МПа, а удельный объем 0,3 м³/кг.
23. Определить состояние водяного пара при давлении 2,2 МПа и температуре 240 °С.
24. Найти состояние водяного пара, если давление его 1,2 МПа, а удельный объем 0,18 м³/кг.
25. Определить состояние водяного пара, если давление его 1,5 МПа, а температура 198,28 °С.
26. Найти состояние водяного пара, если его давление 2,9 МПа, а удельный объем 0,079 м³/кг.
27. Определить состояние водяного пара, если давление его 0,9 МПа, а энтропия 6,52 кДж/(кг·К).
28. Найти удельный объем влажного пара при давлении 2 МПа и степени сухости пара 0,9.
29. Определить внутреннюю энергию сухого насыщенного пара при давлении 1,5 МПа.
30. Определить энтальпию и внутреннюю энергию влажного насыщенного пара при давлении 1,3 МПа и степени сухости пара 0,98.

31. Найти энтропию влажного насыщенного пара при давлении 2,4 МПа и степени сухости пара 0,8.
32. Найти массу, внутреннюю энергию, энтальпию и энтропию 6 м³ насыщенного водяного пара при давлении 1,2 МПа и сухости пара 0,9.
33. Водяной пар имеет параметры: $p = 3$ МПа, $t = 400$ °С. Определить остальные параметры.
34. Водяной пар имеет параметры: $p = 9$ МПа, $t = 500$ °С. Определить остальные параметры.
35. Найти массу 10 м³ пара при давлении 1,4 МПа и степени сухости 96%.
36. Найти массу 9 м³ пара при давлении 0,8 МПа и степени влажности 10%.

3.2 Паровые процессы

Примечание к задачам: все процессы необходимо изобразить в диаграммах $p\nu$, Ts , hs .

- 1 (19). Определить количество теплоты, которое нужно сообщить 6 кг водяного пара, занимающего объем 0,6 м³ при давлении 0,6 МПа, чтобы при постоянном объеме повысить его давление до 1 МПа. Определить конечную сухость пара.
- 2 (20). 1 м³ пара при давлении 0,981 МПа и температуре 300 °С охлаждается при постоянном объеме до 100 °С. Определить количество теплоты, отданной паром.
- 3 (21). В баллоне емкостью 1 м³ находится пар при давлении 0,981 МПа и степени сухости 0,78. Сколько теплоты нужно сообщить баллону, чтобы пар перевести в сухой насыщенный.
- 4 (22). Влажный пар имеет при давлении 1,5 МПа паросодержание 0,8. Какое количество теплоты нужно сообщить 1 кг данного пара, чтобы довести его степень сухости при постоянном давлении до 0,95.
- 5 (23). Влажный пар имеет при давлении 0,8 МПа степень сухости 0,9. Какое количество теплоты нужно сообщить 1 кг этого пара, чтобы перевести его при постоянном давлении в сухой насыщенный пар?
- 6 (24). 1 кг водяного пара при давлении 1 МПа и температуре 240 °С нагревается при постоянном давлении до 320 °С. Определить затраченное количество теплоты, работу расширения и изменение внутренней энергии пара.
- 7 (25). 1 кг водяного пара при давлении 1,6 МПа и температуре 300 °С нагревается при постоянном давлении до 400 °С. Определить затраченное количество теплоты, работу расширения и изменение внутренней энергии пара.
- 8 (26). Энтальпия влажного насыщенного пара при давлении 1,4 МПа составляет 2705 кДж/кг. Как изменится степень сухости пара, если к 1 кг его будет подведено 40 кДж теплоты при постоянном давлении?

9 (27). К 1 кг пара при давлении 0,8 МПа и степени влажности 70% подводится при постоянном давлении 820 кДж теплоты. Определить степень сухости, объем, энтальпию пара в конечном состоянии.

10 (28). 1 кг влажного пара при давлении 1,8 МПа и влажности 3% перегревается при постоянном давлении до $t = 400$ °С. Определить работу расширения, количество сообщенной теплоты и изменение внутренней энергии.

11 (29). 1 м³ водяного пара при давлении $p_1 = 1$ МПа и $x = 0,65$ расширяется при постоянном давлении до тех пор, пока его удельный объем не станет равным $v_2 = 0,19$ м³/кг. Найти конечные параметры, количество теплоты, участвующей в процессе, работу и изменение внутренней энергии.

12 (30). От 1 кг водяного пара с начальными параметрами $p_1 = 1,6$ МПа и $v_1 = 0,15$ м³/кг отводится теплота при постоянном давлении. При этом в одном случае конечный объем $v_2 = 0,13$ м³/кг, а в другом – $v_2 = 0,10$ м³/кг. Определить конечные параметры, количество теплоты, участвующей в процессе, работу и изменение внутренней энергии.

13 (31). Отработавший пар из паровой машины направляется в конденсатор. Состояние отработавшего пара: $p = 0,01$ МПа и $x = 0,83$. Какое количество воды для охлаждения необходимо подавать в конденсатор, если температура ее повышается на $\Delta t = 15$ °С, а конденсат забирается из конденсатора при температуре $t = 35$ °С?

14 (32). 2 кг пара, занимающие при $p = 0,8$ МПа объем $V_1 = 0,15$ м³, изотермически расширяются до $V_2 = 0,35$ м³. Определить работу расширения, количество подведенной теплоты и степень сухости пара.

15 (33). 1 кг пара при давлении $p_1 = 0,6$ МПа и температуре $t_1 = 200$ °С сжимают изотермически до конечного объема $v_2 = 0,11$ м³/кг. Определить конечные параметры и количество теплоты, участвующей в процессе.

16 (34). Сухой насыщенный пар расширяется адиабатно от давления 1 МПа до 0,05 МПа. Определить степень сухости в конце расширения.

17 (35). 1 кг пара расширяется адиабатно от начальных параметров $p_1 = 3$ МПа и $t_1 = 300$ °С до $p_2 = 0,05$ МПа. Найти значения h_1 , h_2 , u_1 , v_2 , x_2 и работу расширения.

18 (36). 1,2 м³ влажного пара со степенью сухости $x = 0,8$ расширяется адиабатно от 0,4 до 0,06 МПа. Определить степень сухости, объем пара в конце расширения и работу, произведенную паром.

3.3 Цикл Ренкина

Примечание к задачам: все процессы необходимо изобразить в диаграммах pv , Ts , hs .

- 1 (13, 25). Паросиловая установка работает по циклу Ренкина. Параметры начального состояния: $p_1 = 2$ МПа, $t_1 = 300$ °С. Давление в конденсаторе $p_2 = 0,004$ МПа. Определить термический КПД.
- 2 (14, 26). Определить термический КПД цикла Ренкина, если $p_1 = 6$ МПа, $t_1 = 450$ °С и $p_2 = 0,004$ МПа.
- 3 (15, 27). Сравнить термический КПД идеальных циклов, работающих при одинаковых начальных и конечных давлениях $p_1 = 2$ МПа и $p_2 = 0,02$ МПа, если в одном случае пар влажный со степенью сухости $x = 0,9$, в другом сухой насыщенный и в третьем перегретый с температурой $t_1 = 300$ °С.
- 4 (16, 28). Определить работу 1 кг пара в цикле Ренкина, если $p_1 = 2$ МПа, $t_1 = 450$ °С и $p_2 = 0,004$ МПа.
- 5 (17, 29). Найти термический КПД и мощность паровой машины, работающей по циклу Ренкина, при следующих условиях: при впуске пар имеет давление $p_1 = 1,5$ МПа и температуру $t_1 = 300$ °С; давление пара при выпуске $p_2 = 0,01$ МПа; часовой расход пара составляет 940 кг/ч.
- 6 (18, 30). Паровая турбина мощностью $N = 12000$ кВт работает при начальных параметрах $p_1 = 8$ МПа и $t_1 = 450$ °С. Давление в конденсаторе $p_2 = 0,004$ МПа. В котельной установке, снабжающей турбину паром, сжигается уголь с теплотой сгорания $Q_{н}^P = 25120$ кДж/кг. КПД котельной установки равен 0,8. Температура питательной воды $t_{п.в.} = 90$ °С. Определить производительность котельной установки и часовой расход топлива при полной нагрузке паровой турбины и условии, что она работает по циклу Ренкина.
- 7 (19, 31). Определить термический КПД цикла Ренкина для следующих параметров: $p_1 = 3,5$ МПа, $t_1 = 435$ °С, $p_2 = 0,004$ МПа.
- 8 (20, 32). Определить термический КПД цикла Ренкина для следующих параметров: $p_1 = 9,0$ МПа, $t_1 = 500$ °С, $p_2 = 0,004$ МПа.
- 9 (21, 33). Определить термический КПД цикла Ренкина для следующих параметров: $p_1 = 13$ МПа, $t_1 = 565$ °С, $p_2 = 0,0035$ МПа.
- 10 (22, 34). Определить термический КПД цикла Ренкина для следующих параметров: $p_1 = 30$ МПа, $t_1 = 650$ °С, $p_2 = 0,03$ МПа.
- 11 (23, 35). Параметры пара перед паровой турбиной: $p_1 = 9$ МПа, $t_1 = 500$ °С. Давление в конденсаторе $p_2 = 0,004$ МПа. Найти состояние пара после расширения в турбине, если ее относительный внутренний КПД $\eta_{0i} = 0,84$.
- 12 (24, 36). Определить абсолютный внутренний КПД паровой турбины, работающей при начальных: $p_1 = 9$ МПа и $t_1 = 480$ °С и конечном давлении $p_2 = 0,004$ МПа, если известно, что относительный внутренний КПД турбины $\eta_{0i} = 0,82$.

Приложение А – Пример оформления решения задачи

1.1.1. В узкой запаянной с одного конца стеклянной трубке находится воздух, отделенный от наружного воздуха столбиком ртути длиной $l = 2$ см. Когда трубка расположена вертикально открытым концом вниз, длина воздушного столба $l_1 = 0,39$ см; когда же трубка расположена вертикально открытым концом вверх, длина столба воздуха $l_2 = 0,37$ см. Определите атмосферное давление, если температура воздуха $t = 5$ °С.

Дано: $l = 2$ см; $l_1 = 0,39$ см; $l_2 = 0,37$ см; $t = 5$ °С;	Решение: Закрытая часть трубки, отделенная столбиком ртути, заполнена воздухом и насыщающими парами ртути, но при температуре $t = 5$ °С давление насыщающих паров ртути $p_{рт} = 26 \cdot 10^{-5}$ мм рт.ст., им можно пренебречь по сравнению с давлением атмосферного воздуха. Будем считать, что воздух, находящийся в трубке, подчиняется Уравнению состояния идеального газа и что при изменении положения трубки температура и масса воздуха остаются постоянными.
Найти $p_{атм}$ - ?	

Когда столбик ртути неподвижен, давление воздуха в трубке равно внешнему давлению. Если трубка достаточно широкая, то давлением, вызванным кривизной поверхности ртути, можно пренебречь.

Найдем параметры состояния воздуха, когда трубка расположена отверстием вниз, и когда она расположена отверстием вверх, т.е. найдем величины p_1, V_1 и p_2, V_2 :

$$p_1 = p_{атм} - \rho gh, \quad V_1 = S \cdot l_1;$$
$$p_2 = p_{атм} + \rho gh, \quad V_2 = S \cdot l_2;$$

где ρ – плотность ртути;

S – площадь поперечного сечения канала трубки;

h – высота ртутного столба.

Из уравнения состояния идеального газа получаем для изотермического процесса:

$$p_1 V_1 = p_2 V_2.$$

Из этих равенств выражаем атмосферное давление:

$$p_{атм} = \rho gh \frac{l_1 + l_2}{l_1 - l_2},$$

подставляя значения величин, приведенные в условии задачи, получаем:

$$p_{атм} = 13,546 \cdot 10^3 \cdot 9,8 \cdot 2 \cdot 10^{-2} \cdot \frac{0,39 \cdot 10^{-2} + 0,37 \cdot 10^{-2}}{0,39 \cdot 10^{-2} - 0,37 \cdot 10^{-2}} = 1,01 \cdot 10^5 \text{ Па.}$$

Проверим размерность:

$$[p_{атм}] = \frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \cdot \frac{\text{м}}{\text{с}^2} \cdot \text{м} \cdot \frac{\text{м} - \text{м}}{\text{м} - \text{м}} = \frac{\text{кг}}{\text{м} \cdot \text{с}^2} = \left[H = \frac{\text{кг} \cdot \text{м}}{\text{с}^2} \right] \cdot \frac{1}{\text{м}^2} = \frac{\text{Н}}{\text{м}^2} = \text{Па.}$$

Ответ: $p_{атм} = 1,01 \cdot 10^5$ Па.

Размер шрифта при оформлении: 14 пт.

Приложение Б – Титульный лист

Министерство образования и науки Российской Федерации

(шрифт Arial Narrow, 14 pt, выравнивание по центру)

федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования

(шрифт Arial Narrow, 12 pt, выравнивание по центру)

«Национальный исследовательский Томский политехнический университет»

(шрифт Arial Narrow, 12 pt, полужирный, выравнивание по центру)

Институт: физико-технический

Направление: 14.03.02 Ядерная физика и технологии

(шрифт: Times New Roman, 12 pt)

Индивидуальное задание по дисциплине «Термодинамика и теплопередача»

(шрифт: Times New Roman, 20 pt, полужирный, выравнивание по центру)

(шрифт: Times New Roman, 12 pt,
отступ не более 10 см)

Выполнил:

студент: Сидоров Петр Иванович

группа: 0А41

дата сдачи: 25.05.2016

подпись: _____

Проверил:

Исаченко Д.С.

дата: _____

количество баллов: _____

подпись: _____

Томск 2016

(шрифт Arial Narrow, 14 pt, выравнивание по центру)

Приложение В – Справочные данные

Таблица В.1 – Молекулярные массы, плотности и объемы киломолей при нормальных условиях и газовые постоянные

Вещество	Химическое обозначение	Молекулярная масса μ	Плотность ρ в кг/м ³	Объем киломоля μ_v в м ³ /кг	Газовая постоянная в Дж/(кг·К)
Воздух	-	28,96	1,293	22,40	287,0
Кислород	O ₂	32,00	1,429	22,39	259,8
Азот	N ₂	28,026	1,251	22,40	296,8
Атмосферный азот ¹	N ₂	28,16	(1,257)	(22,40)	(295,3)
Гелий	He	4,003	0,179	22,42	2078,0
Аргон	Ar	39,994	1,783	22,39	208,2
Водород	H ₂	2,016	0,090	22,43	4124,0
Оксид углерода	CO	28,01	1,250	22,40	296,8
Двуокись углерода	CO ₂	44,01	1,977	22,26	188,9
Сернистый газ	SO ₂	64,06	2,926	21,89	129,8
Метан	CH ₄	16,032	0,717	22,39	518,8
Этилен	C ₂ H ₄	28,052	1,251	22,41	296,6
Коксовый газ	-	11,50	0,515	22,33	721,0
Аммиак	NH ₃	17,032	0,771	22,08	488,3
Водяной пар ²	H ₂ O	18,016	(0,804)	(22,40)	(461)

¹ Атмосферный азот – условный газ, состоящий из азота воздуха вместе с двуокисью углерода и редкими газами, содержащимися в воздухе.

² Приведение водяного пара к нормальному состоянию является условным.

Таблица В.2 – Теплоемкость кислорода

Температура	Мольная теплоемкость в кДж/(кмоль·К)				Массовая теплоемкость в кДж/(кг·К)		Объемная теплоемкость в кДж/(м ³ ·К)	
	μc_p	μc_v	μc_{pm}	μc_{vm}	c_{pm}	c_{vm}	c'_{pm}	c'_{vm}
0	29,274	20,959	29,274	20,959	0,9148	0,6548	1,3059	0,9349
100	29,877	21,562	29,538	21,223	0,9232	0,6632	1,3176	0,9466
200	30,815	22,500	29,931	21,616	0,9352	0,6753	1,3352	0,9642
300	31,832	23,517	30,400	22,085	0,9600	0,6900	1,3561	0,9852
400	32,758	24,443	30,878	22,563	0,9651	0,7081	1,3775	1,0065
500	33,549	25,234	31,334	23,019	0,9793	0,7193	1,3980	1,0270
600	34,202	25,887	31,761	23,446	0,9927	0,7327	1,4168	1,0459
700	34,746	26,431	32,150	23,835	1,0048	0,7448	1,4344	1,0634
800	35,203	26,888	32,502	24,187	1,0187	0,7557	1,4499	1,0789
900	35,584	27,269	32,825	24,510	1,0258	0,7658	1,4645	1,0936
1000	35,914	27,599	33,118	24,803	1,0388	0,7750	1,4775	1,1066
1100	36,216	27,901	33,386	25,071	1,0434	0,7834	1,4892	1,1183
1200	36,488	28,173	33,633	25,318	1,0509	0,7913	1,5005	1,1296
1300	36,752	28,437	33,863	25,548	1,0580	0,7984	1,5106	1,1396
1400	36,999	28,684	34,076	25,761	1,0647	0,8051	1,5202	1,1493
1500	37,242	28,927	34,282	25,967	1,0714	0,8114	1,5294	1,1585
1600	37,480	29,165	34,474	26,159	1,0773	0,8173	1,5378	1,1669
1700	37,715	29,400	34,658	26,343	1,0831	0,8231	1,5462	1,1752
1800	37,945	29,630	34,834	26,519	1,0886	0,8286	1,5541	1,1832
1900	38,178	29,860	35,006	26,691	1,0940	0,8340	1,5617	1,1907
2000	38,406	30,091	35,169	26,854	1,0990	0,8390	1,5692	1,1978
2100	38,636	30,321	35,328	27,013	1,1041	0,8441	1,5759	1,2050
2200	39,858	30,543	35,483	27,168	1,1087	0,8491	1,5830	1,2121
2300	39,080	30,765	35,634	27,319	1,1137	0,8537	1,5897	1,2188
2400	39,293	30,978	35,785	27,470	1,1183	0,8583	1,5964	1,2255
2500	39,502	31,187	35,927	27,612	1,1229	0,8629	1,6027	1,2318
2600	39,708	31,393	36,069	27,754	1,1271	0,8675	1,6090	1,2380
2700	39,909	31,594	36,207	27,892	1,1313	0,8717	1,6153	1,2443

Таблица В.3 – Теплоемкость азота

Температура	Мольная теплоемкость в кДж/(кмоль·К)				Массовая теплоемкость в кДж/(кг·К)		Объемная теплоемкость в кДж/(м ³ ·К)	
	t в °С	μс _p	μс _v	μс _{pm}	μс _{vm}	с _{pm}	с _{vm}	с' _{pm}
0	29,115	20,800	29,115	20,800	1,0392	0,7423	1,2987	0,9278
100	29,199	20,884	29,144	20,829	1,0404	0,7427	1,3004	0,9295
200	29,471	21,156	29,228	20,913	1,0434	0,7465	1,3038	0,9328
300	29,952	21,637	29,383	21,068	1,0488	0,7519	1,3109	0,9399
400	30,576	22,261	29,601	21,286	1,0567	0,7599	1,3205	0,9496
500	31,250	22,935	29,864	21,549	1,0660	0,7691	1,3322	0,9613
600	31,920	23,605	30,149	21,834	1,0760	0,7792	1,3452	0,9743
700	32,640	24,225	30,451	22,136	1,0869	0,7900	1,3586	0,9877
800	33,101	24,786	30,748	22,433	1,0978	0,8005	1,3716	1,0006
900	33,599	25,284	31,037	22,722	1,1078	0,8110	1,3845	1,0136
1000	34,039	25,724	31,313	22,998	1,1179	0,8210	1,3971	1,0178
1100	34,424	26,199	31,577	23,262	1,1271	0,8302	1,4089	1,0379
1200	34,773	26,448	31,828	23,513	1,1359	0,8395	1,4202	1,0492
1300	35,070	26,745	32,067	23,752	1,1447	0,8478	1,4306	1,0597
1400	35,330	27,005	32,293	23,978	1,1526	0,8558	1,4407	1,0697
1500	35,556	27,231	32,502	24,187	1,1602	0,8633	1,4499	1,0789
1600	35,757	27,432	32,699	24,384	1,1673	0,8704	1,4587	1,0877
1700	35,937	27,612	32,883	24,568	1,1736	0,8771	1,4671	1,0961
1800	36,100	27,775	33,055	24,740	1,1798	0,8830	1,4746	1,1036
1900	36,247	27,922	33,218	24,903	1,1857	0,8889	1,4821	1,1112
2000	36,377	28,052	33,373	25,058	1,1911	0,8943	1,4888	1,1179
2100	36,494	28,169	33,520	25,205	1,1966	0,8997	1,4955	1,1246
2200	36,603	28,278	33,658	25,343	1,2012	0,9048	1,5018	1,1304
2300	36,703	27,378	33,787	25,472	1,2058	0,9094	1,5072	1,1363
2400	36,795	28,470	33,909	25,594	1,2104	0,9136	1,5127	1,1417
2500	36,879	28,554	34,022	25,707	1,2142	0,9177	1,5177	1,1468

Таблица В.4 – Теплоемкость окиси углерода

Температура	Мольная теплоемкость в кДж/(кмоль·К)				Массовая теплоемкость в кДж/(кг·К)		Объемная теплоемкость в кДж/(м ³ ·К)	
	t в °С	μ_{c_p}	μ_{c_v}	$\mu_{c_{pm}}$	$\mu_{c_{vm}}$	c_{pm}	c_{vm}	c'_{pm}
0	29,123	20,808	29,123	20,808	1,0396	0,7427	1,2992	0,9282
100	29,262	20,947	29,178	20,863	1,0417	0,7448	1,3017	0,9307
200	29,647	21,332	29,303	20,988	1,0463	0,7494	1,3071	0,9362
300	30,254	21,939	29,517	21,202	1,0538	0,7570	1,3167	0,9458
400	30,974	22,659	29,789	21,474	1,0634	0,7666	1,3289	0,9579
500	31,707	23,392	30,099	21,784	1,0748	0,7775	1,3427	0,9718
600	32,402	24,087	30,425	22,110	1,0861	0,7892	1,3574	0,9864
700	33,025	24,710	30,752	22,437	1,0978	0,8009	1,3720	1,0011
800	33,574	25,259	31,070	22,755	1,1091	0,8122	1,3862	1,0153
900	34,055	25,740	31,376	23,061	1,1200	0,8231	1,3996	1,0287
1000	34,470	26,155	31,665	23,350	1,1304	0,8336	1,4126	1,0417
1100	34,826	26,511	31,937	23,622	1,1401	0,8432	1,4248	1,0638
1200	35,140	26,825	32,192	23,877	1,1493	0,8566	1,4361	1,0651
1300	35,412	27,097	32,427	23,112	1,1577	0,8608	1,4465	1,0756
1400	35,646	27,331	32,653	24,338	1,1656	0,8688	1,4566	1,0856
1500	35,856	27,541	32,858	24,543	1,1731	0,8763	1,4658	1,0948
1600	36,040	27,725	33,051	24,736	1,1798	0,8830	1,4746	1,1036
1700	36,203	27,888	33,231	24,916	1,1865	0,8893	1,4825	1,1116
1800	36,350	28,035	33,402	25,087	1,1924	0,8956	1,4901	1,1191
1900	36,480	28,165	33,561	25,246	1,1983	0,9014	1,4972	1,1262
2000	36,597	28,282	33,708	25,393	1,2033	0,9064	1,5089	1,1319
2100	36,706	28,391	33,850	25,535	1,2083	0,9115	1,5102	1,1392
2200	36,802	28,487	33,980	25,665	1,2129	0,9161	1,5160	1,1411
2300	36,894	28,579	34,106	25,791	1,2175	0,9207	1,5215	1,1515
2400	36,978	28,663	34,223	25,908	1,2217	0,9249	1,5269	1,1569
2500	37,053	28,738	34,336	26,021	1,2259	0,9291	1,5320	1,1611

Таблица В.5 – Теплоемкость водорода

Температура t в $^{\circ}\text{C}$	Мольная теплоемкость в кДж/(кмоль·К)				Массовая теплоемкость в кДж/кг·К		Объемная теплоемкость в кДж/м ³ ·К	
	μ_{cp}	μ_{cs}	μ_{cpm}	μ_{csm}	c_{pm}	c_{cm}	c'_{pm}	c'_{cm}
0	28,617	20,302	28,617	20,302	14,195	10,071	1,2766	0,9086
100	29,128	20,813	28,935	20,620	14,353	10,228	1,2908	0,9198
200	29,241	20,926	29,073	20,758	14,421	10,297	1,2971	0,9261
300	29,299	20,984	29,123	20,808	14,446	10,322	1,2992	0,9282
400	29,396	21,081	29,168	20,871	14,477	10,353	1,3021	0,9311
500	29,559	21,244	29,249	20,934	14,509	10,384	1,3050	0,9341
600	29,793	21,478	29,316	21,001	14,542	10,417	1,3080	0,9378
700	30,099	21,784	29,408	21,093	14,587	10,463	1,3121	0,9418
800	30,472	22,157	29,517	21,202	14,641	10,517	1,3167	0,9458
900	30,869	22,554	29,647	21,332	14,706	10,581	1,3226	0,9516
1000	31,284	22,969	29,789	21,474	14,776	10,652	1,3289	0,9579
1100	31,723	23,408	29,944	21,629	14,853	10,727	1,3360	0,9650
1200	32,155	23,840	30,107	21,292	14,934	10,809	1,3431	0,9722
1300	32,590	24,275	30,288	21,973	15,023	10,899	1,3511	0,9801
1400	33,000	24,685	30,467	22,152	15,113	10,988	1,3591	0,9881
1500	33,394	25,079	30,647	22,322	15,202	11,077	1,3674	0,9964
1600	33,762	25,447	30,832	22,517	15,294	11,169	1,3754	1,0044
1700	34,114	25,799	31,012	22,697	15,383	11,258	1,3833	1,0124
1800	34,445	26,130	31,192	22,877	15,472	11,347	1,3917	1,0207
1900	34,763	26,446	31,372	23,057	15,561	11,437	1,3996	1,0287
2000	35,056	26,741	31,548	23,233	15,649	11,524	1,4076	1,0366
2100	35,332	27,017	31,723	23,408	15,736	11,611	1,4151	1,0442
2200	35,605	27,290	31,891	23,576	15,819	11,694	1,4227	1,0517
2300	35,882	27,837	32,058	23,743	15,902	11,798	1,4302	1,0593
2400	36,090	27,775	32,222	23,907	15,989	11,858	1,4373	1,0664
2500	36,316	28,001	32,388	24,070	16,064	11,937	1,4449	1,0739
2600	36,530	28,215	32,540	24,225	16,141	12,016	1,4516	1,0806
2700	36,731	38,416	32,691	24,376	16,215	12,091	1,4583	1,0873

Таблица В.6 – Теплоемкость углекислого газа

Температура	Мольная теплоемкость в	Массовая	Объемная
-------------	------------------------	----------	----------

t в $^{\circ}\text{C}$	кДж/(кмоль·К)				теплоемкость в кДж/кг·К		теплоемкость в кДж/м ³ ·К	
	μ_{c_p}	μ_{c_c}	$\mu_{c_{pm}}$	t в $^{\circ}\text{C}$	μ_{c_p}	μ_{c_c}	$\mu_{c_{pm}}$	t в $^{\circ}\text{C}$
0	35,860	27,545	35,860	27,545	0,8148	0,6259	1,5998	1,2288
100	40,206	31,891	38,112	29,797	0,8658	0,6770	1,7003	1,3293
200	43,689	35,374	40,059	31,744	0,9102	0,7214	1,7373	1,4164
300	46,515	38,200	41,755	33,440	0,9487	0,7599	1,8627	1,4918
400	48,860	40,515	43,250	34,935	0,9826	0,7938	1,9297	1,5587
500	50,816	42,500	44,573	36,258	1,0128	0,8240	1,9887	1,6178
600	52,452	44,137	45,753	37,438	1,0396	0,8508	2,0411	1,6701
700	53,826	45,511	46,813	38,498	1,0639	0,8746	2,0884	1,7174
800	54,977	46,662	47,763	39,448	1,0852	0,8964	2,1311	1,7601
900	55,952	47,637	48,617	40,302	1,1045	0,9157	2,1692	1,7982
1000	56,773	48,458	49,392	41,077	1,1225	0,9332	2,2035	1,8326
1100	57,472	49,157	50,099	41,784	1,1384	0,9496	2,2349	1,8440
1200	58,071	49,756	50,740	42,425	1,1530	0,9638	2,2638	1,8929
1300	58,586	50,271	51,322	43,007	1,1660	0,9772	2,2898	1,9188
1400	59,030	50,715	51,858	43,543	1,1782	0,9893	2,3136	1,9427
1500	59,411	51,096	52,348	44,033	1,1895	1,006	2,3354	1,9644
1600	59,737	51,422	52,800	44,485	1,1995	1,0107	2,3555	1,9845
1700	60,022	51,707	53,218	44,903	1,2091	1,0203	2,3743	2,0034
1800	60,269	52,954	53,604	45,289	1,2179	1,0291	2,3915	2,0205
1900	60,478	52,163	53,959	45,644	1,2259	1,0371	2,4074	2,0365
2000	60,654	52,339	54,290	45,975	1,2334	1,0446	2,4221	2,0511
2100	60,801	52,486	54,596	46,281	1,2405	1,0517	2,4359	2,0649
2200	60,918	52,603	54,881	46,566	1,2468	1,0580	2,4484	2,-775
2300	61,006	52,691	55,144	46,829	1,2531	1,0639	2,4602	2,0892
2400	61,060	52,748	55,391	47,076	1,2586	1,0697	2,4710	2,1001
2500	61,085	52,770	55,617	47,301	1,2636	1,0748	2,4811	2,1101

Таблица В.7 – Теплоемкость водяного пара

Температура t в °С	Мольная теплоемкость в кДж/(кмоль·К)				Массовая теплоемкость в кДж/(кг·К)		Объемная теплоемкость в кДж/(м ³ ·К)	
	μc_p	μc_v	μc_{pm}	μc_{vm}	c_{pm}	c_{vm}	c'_{pm}	c'_{vm}
0	33,499	25,184	33,499	25,184	1,8594	1,398	1,4943	1,1237
100	34,055	25,74	33,741	25,426	1,8728	1,4114	1,5052	1,1342
200	34,964	26,649	34,118	25,803	1,8937	1,4323	1,5223	1,1514
300	36,036	27,721	34,575	26,260	1,9192	1,4574	1,5424	1,1715
400	37,191	28,876	35,090	27,775	1,9477	1,4863	1,5654	1,1945
500	38,406	30,091	35,630	27,315	1,9778	1,5160	1,5897	1,2188
600	39,662	31,347	36,195	27,880	2,0092	1,5474	1,6148	1,2439
700	40,951	32,636	36,789	28,474	2,0419	1,5805	1,6412	1,2703
800	42,249	33,934	37,392	29,077	2,0754	1,6140	1,6680	1,2971
900	43,513	35,198	38,008	29,693	2,1097	1,6483	1,6957	1,3247
1000	44,723	36,408	38,619	30,304	2,1436	1,6823	1,7229	1,3519
1100	45,858	37,543	39,226	30,911	2,1771	1,7158	1,7501	1,3791
1200	46,913	38,598	39,825	31,510	2,2106	1,7488	1,7769	1,4059
1300	47,897	39,582	40,407	32,092	2,2429	1,7815	1,8028	1,4319
1400	48,801	40,486	40,976	32,661	2,2743	1,8129	1,8280	1,4570
1500	49,639	41,324	41,525	33,210	2,3048	1,8434	1,8527	1,4817
1600	50,409	42,094	42,056	33,741	2,3346	1,8728	1,8761	1,5052
1700	51,133	42,818	42,576	34,261	2,3630	1,9016	1,8996	1,5286
1800	51,782	43,467	43,070	34,755	4,3907	1,9293	1,9213	1,5504
1900	52,377	44,062	43,539	35,224	2,4166	1,9552	1,9423	1,5713
2000	52,930	44,615	43,995	35,680	2,4422	1,9804	1,9628	1,5918
2100	53,449	45,134	44,435	36,120	2,4664	2,0051	1,9824	1,6115
2200	53,930	45,615	44,853	36,538	2,4895	2,0281	2,0009	1,6290
2300	54,370	46,055	45,255	36,940	2,5121	2,0503	2,0165	1,6479
2400	54,780	46,465	45,644	37,330	2,5334	2,0720	2,0365	1,6655
2500	55,161	46,846	46,017	37,702	2,5544	2,0926	2,0526	1,6818
2600	55,525	47,210	46,381	38,066	2,5745	2,1131	2,0691	1,6982
2700	55,864	47,549	47,729	38,414	2,5937	2,1323	2,0861	1,7137
2800	56,187	47,872	47,060	38,745	2,6121	2,1508	2,0997	1,7287
2900	56,488	48,173	47,378	39,063	2,6297	2,1683	2,1136	1,7425

Таблица В.8 – Теплоемкость воздуха

Температура t °C	Мольная теплоемкость в кДж/(кмоль·К)				Массовая теплоемкость в кДж/(кг·К)		Объемная теплоемкость в кДж/(м ³ ·К)	
	μc_p	μc_v	μc_{pm}	μc_{vm}	c_{pm}	c_{vm}	c'_{pm}	c'_{vm}
0	29,073	20,758	29,073	20,758	1,0036	0,7164	1,2971	0,9261
100	29,266	20,951	29,152	20,838	1,0061	0,7193	1,3004	0,9295
200	29,676	21,361	29,299	20,984	1,0115	0,7243	1,3071	0,9362
300	30,266	21,951	29,521	21,206	1,0191	0,7319	1,3172	0,9462
400	30,949	22,634	29,789	21,474	1,0283	0,7415	1,3289	0,9579
500	31,640	23,325	30,095	21,780	1,0387	0,7519	1,3427	0,9718
600	32,301	23,986	30,405	22,090	1,0496	0,7624	1,3565	0,9856
700	32,909	24,585	30,723	22,408	1,0605	0,7733	1,3708	0,9998
800	33,432	25,117	31,028	22,713	1,0710	0,7842	1,3842	1,0312
900	33,905	25,590	31,321	23,006	1,0815	0,7942	1,3976	1,0262
1000	34,315	26,000	31,598	23,283	1,0907	0,8039	1,4097	1,0387
1100	34,679	26,394	31,862	23,547	1,0999	0,8127	1,4214	1,0505
1200	35,092	26,687	32,109	23,794	1,1082	0,8215	1,4327	1,0618
1300	35,291	26,976	32,343	24,028	1,1166	0,8294	1,4432	1,0722
1400	35,546	27,231	32,565	24,250	1,1242	0,8369	1,4528	1,0819
1500	35,772	27,457	32,774	24,459	1,1313	0,8441	1,4620	1,0911
1600	35,977	27,662	32,967	24,652	1,1380	0,8508	1,4708	1,0999
1700	36,170	27,855	33,151	24,836	1,1443	0,8570	1,4788	1,1078
1800	36,346	28,031	33,319	25,004	1,1501	0,8633	1,4867	1,1158
1900	36,509	28,194	33,482	25,167	1,1560	0,8688	1,4939	1,1229
2000	36,655	28,340	33,641	25,326	1,1610	0,8742	1,5010	1,1296
2100	36,798	28,483	33,787	25,472	1,1664	0,8792	1,5072	1,1363
2200	36,928	28,613	33,926	25,611	1,1710	0,8843	1,5135	1,1426
2300	37,053	28,738	34,060	25,745	1,1757	0,8889	1,5194	1,1484
2400	37,170	28,855	34,185	25,870	1,1803	0,8930	1,5253	1,1543
2500	37,279	28,964	34,307	25,992	1,1840	0,8972	1,5303	1,1593