

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

---

Д.С. Исаченко, М.С. Кузнецов, А.О. Семенов

## **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.
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 |

# 1 Первое начало термодинамики

## 1.1 Параметры состояния тела

1 (13, 25). В конденсаторе паровой турбины поддерживается абсолютное давление  $p = (0,04 + n)$  кГ/см<sup>2</sup>. Каковы показания вакуумметров, градуированных в кН/м<sup>2</sup> 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  $(0,2 + 0,1 \cdot n)$  м<sup>3</sup>, температура воздуха в баллоне до пуска 18 °С, а после пуска 10 °С.

4 (16, 28). В баллоне вместимостью  $(0,10 + 0,1 \cdot n)$  м<sup>3</sup> 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  $(0,0055 + 0,001 \cdot n)$  м<sup>3</sup> наполнен углекислым газом (СО<sub>2</sub>). Давление сжатого газа по манометру  $p_{\text{изб}} = 15$  МПа. Определить температуру сжатого газа, если его объем при н.у. составляет  $V = (7,5 + 0,1 \cdot n)$  м<sup>3</sup>.

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/м<sup>3</sup>?

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 м<sup>3</sup>.

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  $25 \text{ }^\circ\text{C}$ , а высота столба воды над ртутью равна  $(150 + 2 \cdot n)$  мм. Атмосферное давление по ртутному барометру  $(770 + 8 \cdot n)$  мм при  $t = 25 \text{ }^\circ\text{C}$ .

12 (24, 36). В трубке вакуумметра высота столбика ртути составляет  $(570 + 5 \cdot n)$  мм при температуре ртути  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ . Над ртутью находится столбик воды высотой  $(37 + n)$  мм. Барометрическое давление воздуха  $728$  мм. рт. ст. при  $t = 15 \text{ }^\circ\text{C}$ . 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  $5 \text{ м}^3$  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  $\mu c_v$  [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  $T = 473 \text{ K}$ :  $\mu c_p$  [кДж/(кмоль·град)],  $c'_p$  и  $c'_v$  [кДж/(м<sup>3</sup>·град)].

4 (16, 28). Найти изменение внутренней энергии  $20 \text{ кг}$  ацетилена при изменении его температуры от  $300$  до  $600 \text{ }^\circ\text{C}$ , 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  $100 \text{ }^\circ\text{C}$ . Подсчитать изменение внутренней энергии газа при увеличении его температуры до  $200 \text{ }^\circ\text{C}$ , если известны следующие значения средних молярных теплоемкостей углекислого газа:

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

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

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  $2 \text{ м}^3$  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  $(\mu_{c_{pm}})|_0^{1200} = 32,192 \text{ кДж}/(\text{кмоль}\cdot\text{град})$ . Сопоставить полученные результаты с данными таблицы В.7.

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

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

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

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

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).  $(0,5 - 0,01 \cdot n)$  м<sup>3</sup> 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/см<sup>2</sup> 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  $h'_{cm}$  этих газов, отнесенную к 1 м<sup>3</sup> при температуре  $t = 800$  °С.

4 (16, 28). Определить удельный объем и массовую теплоемкость ср пара натрия при  $p = 1$  Мн/м<sup>2</sup> 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/см<sup>2</sup>.

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:  $V_{\text{CO}_2} = (1,7 + 0,1 \cdot n)$  м<sup>3</sup>,  $V_{\text{O}_2} = (0,77 + 0,01 \cdot n)$  м<sup>3</sup>,  $V_{\text{N}_2} = (13,78 - 0,1 \cdot n)$  м<sup>3</sup>. Определить весовые доли и парциальные давления составляющих, если общее давление  $p = 1,018$  кГ/см<sup>2</sup>.

10 (22, 34). Сосуд разделен перегородкой на две части, объемы которых равны  $V_1 = (1,2 + 0,01 \cdot n)$  м<sup>3</sup> и  $V_2 = (1,3 - 0,02 \cdot n)$  м<sup>3</sup>. В части  $V_1$  содержится двуокись углерода  $\text{CO}_2$  при давлении  $p_1 = 5$  кГ/см<sup>2</sup> и температуре  $t_1 = 30$  °С, а в части  $V_2$  – кислород  $\text{O}_2$  при  $p_2 = 2$  кГ/см<sup>2</sup> и  $t_2 = 57$  °С. Определить массовые и объемные доли  $\text{CO}_2$  и  $\text{O}_2$ , 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  $V_1 = (1,6 + 0,2 \cdot n)$  м<sup>3</sup>, находится воздух при  $p_1 = 10$  кГ/см<sup>2</sup> и  $t_1 = (25 + 0,5 \cdot n)$  °С. Вторым ( $V_2 = (0,5 + 0,2 \cdot n)$  м<sup>3</sup>) содержит также воздух при  $p_2 = 2$  кГ/см<sup>2</sup> и  $t_2 = (55 + 0,5 \cdot n)$  °С. 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 ( $\text{CO}_2$ ), занимающий объем  $450 \text{ см}^3$  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  $5 \text{ кг}$  при постоянном объеме отводится  $1800 \text{ кДж}$  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  $100 \text{ л}$ , теплоемкость продуктов сгорания  $c_v = 0,735 \text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{град})$ , показатель адиабаты  $1,38$ .

4. В баллоне вместимостью  $40 \text{ л}$  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  $10 \text{ К}$ ? 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  $250 \text{ см}^3$ , диаметр цилиндра  $80 \text{ мм}$ , начальная температура воздуха  $t_1 = 540 \text{ }^\circ\text{C}$ .

7. На сжатие  $5 \text{ кг}$  азота ( $\text{N}_2$ ) при  $t = 100 \text{ }^\circ\text{C}$  затрачена работа  $1800 \text{ кДж}$ . 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 ( $\text{CO}_2$ ) 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 кг/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 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 кг кислорода в цилиндре поршневой машины давление понижается от 12,5 до 5,6 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 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 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 ( $\text{He}$ ) 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  $\eta_{\text{от}} = 0,86$ . 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  $p_1 = 0,8$  МПа,  $t_1 = 650$  °С до  $p_2 = 0,1$  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,  $v_2 = 0,1$  м<sup>3</sup>/кг; 3)  $v_3 = 0,13$  м<sup>3</sup>/кг,  $t_3 = 180$  °С; 4)  $p_4 = 1,5$  МПа,  $v_4 = 0,087$  м<sup>3</sup>/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 м<sup>3</sup> 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  $v_2 = 0,14$  м<sup>3</sup>/кг. Определить показатель политропы  $n$ , количество теплоты  $q$ , изменение внутренней энергии  $\Delta u$ , изменение энтальпии  $\Delta h$ , работу деформации  $l$ , располагаемую работу  $l_0$  и изменение энтропии  $\Delta s$ .

24. В некотором политропном процессе кислород был нагрет от  $T_1 = 300 \text{ К}$  до  $T_2 = 500 \text{ К}$ , при этом его объем увеличился в 2,5 раза. Найти теплоемкость кислорода в этом процессе, если его изобарная теплоемкость  $c_p = 0,94 \text{ кДж/(кг·К)}$ . Как организовать дальнейшее нагревание газа, чтобы при подводе количества теплоты  $170 \text{ кДж/кг}$  его температура увеличилась в 1,5 раза? Изобразить процессы в координатах  $p, v$ .

25. В политропном процессе, совершаемом количеством вещества гелия  $n_{\text{He}} = 2 \text{ кмоль}$ , отводится количество теплоты  $3000 \text{ кДж}$ . Начальные параметры процесса:  $p_1 = 0,15 \text{ МПа}$ ,  $t_1 = 227 \text{ °С}$ ; конечная температура  $127 \text{ °С}$ . Молярная теплоемкость гелия  $\mu c_v = 12,5 \text{ кДж/(кмоль·град)}$ . 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  $1,0 \text{ МПа}$ . 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  $p_1 = 15 \text{ кг/см}^2$  и температура  $t_1 = 365 \text{ °С}$ . 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  $q = 110 \text{ ккал/кг}$ . Рабочее тело считать обладающим свойствами воздуха. Теплоемкость  $c_v$  считать зависящей от температуры.

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

29.  $0,5 \text{ м}^3$  окиси углерода находится в состоянии при  $p_1 = 25 \text{ кг/см}^2$  и  $t_1 = 350 \text{ °С}$ . В изотермическом процессе к газу подведено тепло  $Q = 20 \text{ ккал}$ . 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  $1 \text{ кг}$  идеального газа, имеющего температуру  $T \text{ К}$  и давление  $p_1 = 1 \text{ бар}$ , если конечное давление  $p_2$  в первом процессе равно  $10 \text{ бар}$ , 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  $120^\circ\text{C}$ . 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  $p$ - $v$  и подсчитать величину работы  $\mu l$ , 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  $p$ - $v$ -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  $p_1 = 0,1$  МПа и  $t_1 = 15$  °С до  $p_2 = 0,5$  МПа и  $t_2 = 100$  °С. 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  $v = \text{const}$  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.

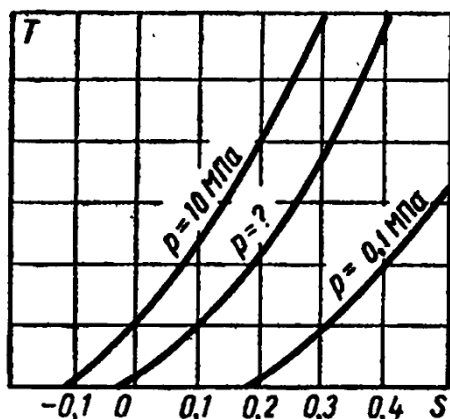


Рис. 1. К задаче 2.1.7 (25).

8 (26).  $10 \text{ м}^3$  воздуха, находящегося в начальном состоянии при н.у., сжимают до конечной температуры 400 °С. 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 °С; б) при нагревании его по изохоре от 0 до 880 °С; 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 °С до 0,8 МПа при  $n = 1,2$ . Определить конечную температуру, изменение энтропии, количество отведенной теплоты и затраченную работу.

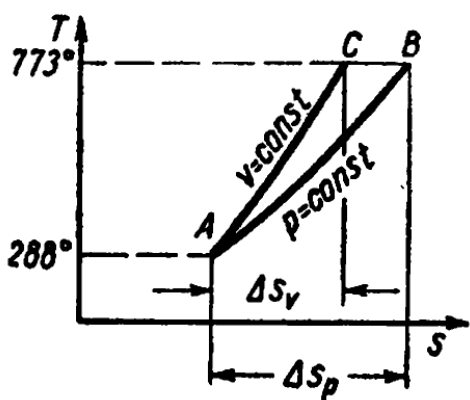


Рис. 2. К задаче 2.1.11 (29).

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  $t_1 = 15$  °С и  $t_2 = 500$  °С. Теплоемкость считать переменной, приняв зависимость ее от температуры линейной.

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

13 (31). Построить в диаграмме  $Ts$  для 1 кг воздуха в пределах от 0 до 200 °С 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 °С, 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  $p_1 = 0,9 \text{ МПа}$  и  $t_1 = 10 \text{ °С}$  сжимается по адиабате до  $p_2 = 3,7 \text{ МПа}$ . Пользуясь  $Ts$ -диаграммой, найти конечную температуру, а также давление, до которого нужно сжать воздух, чтобы температура его стала  $t_3 = 80 \text{ °С}$ .

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

17 (35). 1 кг воздуха при  $p_1 = 0,09 \text{ МПа}$  и  $t_1 = 100 \text{ °С}$  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  $p_1 = 5 \text{ МПа}$  и температуре  $t_1 = 20 \text{ °С}$ . Параметры среды:  $p_0 = 0,1 \text{ МПа}$ ,  $t_0 = 20 \text{ °С}$ . 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  $t_1 = 627 \text{ °С}$  и  $t_2 = 27 \text{ °С}$ , 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  $t_1 = 327 \text{ °С}$  и  $t_2 = 27 \text{ °С}$ , 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  $t_1 = 250 \text{ °С}$  и  $t_2 = 30 \text{ °С}$ , 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:  $p_1 = 0,1 \text{ МПа}$ ,  $t_1 = 20 \text{ °С}$ , 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  $v = \text{const}$  определить параметры характерных для цикла точек, полученную работу, термический КПД, количество подведенной и отведенной теплоты, если дано:  $p_1 = 0,1$  МПа,  $t_1 = 100$  °С, 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  $v = \text{const}$  степень сжатия  $\varepsilon = 5$ , степень увеличения давления  $\lambda = 1,5$ . Определить термический КПД этого цикла, а также цикла Карно, совершавшегося 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  $v = \text{const}$  для значений  $\varepsilon$  от 2 до 10 при  $k = 1,37$ .

8 (26). 1 кг воздуха работает по циклу, представленному на рис. 3. Начальное давление воздуха  $p_1 = 0,1$  МПа, начальная температура  $t_1 = 27$  °С, а степень сжатия  $\varepsilon = 5$ . Количество теплоты, подводимой во время изохорного сжатия равно 1300 кДж/кг. Определить параметры воздуха в характерных точках и полезную работу цикла. Теплоемкость воздуха считать постоянной.

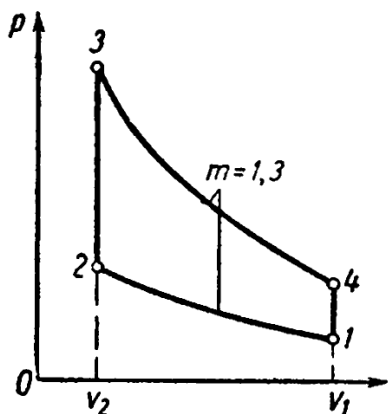


Рис. 3. К задаче 2.2.8 (26).

9 (27). Температура воспламенения топлива, подаваемого в цилиндр двигателя с изобарным подводом теплоты, равна 800 °С. Определить минимально необходимое значение степени сжатия  $\varepsilon$ , если начальная температура  $t_1 = 77$  °С. Сжатие считать адиабатным,  $k = 1,4$ .

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  $p_1 = 0,1$  МПа,  $t_1 = 20$  °С, 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  $p_1 = 100$  кПа,  $t_1 = 70$  °С, 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 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  $V_1 = 1$  м<sup>3</sup>. 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  $\omega$  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  $V_1 = 25$  м<sup>3</sup> до  $V_2 = 50$  м<sup>3</sup> и давление изменяется от  $p_1 = 100$  кПа до  $p_2 = 200$  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  $A = 37$  кДж. При этом она берет тепло от тела с температурой  $t_2 = -10$  °С и передает тепло телу с температурой  $t_1 = 17$  °С. 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  $t_2 = 2$  °С и передает его воздуху с температурой  $t_1 = 27$  °С. Найти: а) коэффициент  $\eta_1$  – отношение количества теплоты, переданного воздуху за некоторый промежуток времени, к количеству теплоты, отнятому за это же время от воды; б) коэффициент  $\eta_2$  – 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  $\eta_3$  – отношение затраченной на работу машины энергии к количеству теплоты, переданному за это же время воздуху (КПД цикла). Найти соотношение между коэффициентами  $\eta_1$ ,  $\eta_2$  и  $\eta_3$ .

14 (32). Идеальная холодильная машина, работающая по обратному циклу Карно, передает тепло от холодильника с водой при температуре  $t_2 = 0$  °С кипятильнику с водой при температуре  $t_1 = 100$  °С. Какую массу  $m_2$  воды нужно заморозить в холодильнике, чтобы превратить в пар массу  $m_1 = 1$  кг воды в кипятильнике?

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  $t_1 = 100$  °С и  $t_2 = 0$  °С. Помещение требуется поддерживать при температуре  $t'_1 = 16$  °С. Температура окружающего воздуха  $t'_2 = -10$  °С.

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 м<sup>3</sup>/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 м<sup>3</sup>/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 м<sup>3</sup>. Найти температуру и давление насыщения.
11. Сухой насыщенный пар объемом 1,5 м<sup>3</sup> 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  $175\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Каково было бы показание манометра на этом паропроводе?
19. Манометр парового котла показывает давление  $0,2\text{ МПа}$ . Показание барометра  $0,103\text{ МПа}$ . Считая пар сухим насыщенным, определить его температуру, удельный объем и энтальпию.
20. Манометр парового котла показывает давление  $0,15\text{ МПа}$ . Показание барометра равно  $1,01\text{ МПа}$ . Считая пар сухим насыщенным, найти его температуру и удельный объем.
21. Определить состояние водяного пара, если давление его  $0,5\text{ МПа}$ , а температура  $172\text{ }^{\circ}\text{C}$ .
22. Определить состояние водяного пара, если давление его  $0,6\text{ МПа}$ , а удельный объем  $0,3\text{ м}^3/\text{кг}$ .
23. Определить состояние водяного пара при давлении  $2,2\text{ МПа}$  и температуре  $240\text{ }^{\circ}\text{C}$ .
24. Найти состояние водяного пара, если давление его  $1,2\text{ МПа}$ , а удельный объем  $0,18\text{ м}^3/\text{кг}$ .
25. Определить состояние водяного пара, если давление его  $1,5\text{ МПа}$ , а температура  $198,28\text{ }^{\circ}\text{C}$ .
26. Найти состояние водяного пара, если его давление  $2,9\text{ МПа}$ , а удельный объем  $0,079\text{ м}^3/\text{кг}$ .
27. Определить состояние водяного пара, если давление его  $0,9\text{ МПа}$ , а энтропия  $6,52\text{ кДж}(\text{кг}\cdot\text{К})$ .
28. Найти удельный объем влажного пара при давлении  $2\text{ МПа}$  и степени сухости пара  $0,9$ .
29. Определит внутреннюю энергию сухого насыщенного пара при давлении  $1,5\text{ МПа}$ .
30. Определить энтальпию и внутреннюю энергию влажного насыщенного пара при давлении  $1,3\text{ МПа}$  и степени сухости пара  $0,98$ .
31. Найти энтропию влажного насыщенного пара при давлении  $2,4\text{ МПа}$  и степени сухости пара  $0,8$ .
32. Найти массу, внутреннюю энергию, энтальпию и энтропию  $6\text{ м}^3$  насыщенного водяного пара при давлении  $1,2\text{ МПа}$  и сухости пара  $0,9$ .
33. Водяной пар имеет параметры:  $p = 3\text{ МПа}$ ,  $t = 400\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Определить остальные параметры.
34. Водяной пар имеет параметры:  $p = 9\text{ МПа}$ ,  $t = 500\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Определить остальные параметры.
35. Найти массу  $10\text{ м}^3$  пара при давлении  $1,4\text{ МПа}$  и степени сухости  $96\%$ .
36. Найти массу  $9\text{ м}^3$  пара при давлении  $0,8\text{ МПа}$  и степени влажности  $10\%$ .

