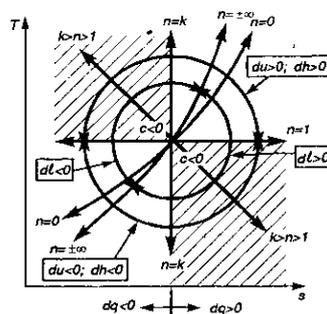


Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего профессионального образования
«Владимирский государственный университет имени
Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых»
(ВлГУ)

СБОРНИК ЗАДАЧ
ПО ТЕХНИЧЕСКОЙ ТЕРМОДИНАМИКЕ
И ТЕПЛОМАССОБМЕНУ

Электронная версия



Владимир, 2015

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего профессионального образования
«Владимирский государственный университет имени
Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых»
(ВлГУ)
Кафедра «Тепловые двигатели и энергетические установки»

СБОРНИК ЗАДАЧ
ПО ТЕХНИЧЕСКОЙ ТЕРМОДИНАМИКЕ
И ТЕПЛОМАССООБМЕНУ

Составители:
В.М.Басуров
А.Ю.Абляев

Владимир 2015

УДК 621.43 (07)

Б27

Рецензент

Кандидат технических наук, профессор
Владимирского государственного университета имени
Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых
В.И.Тарасенко

Печатается по решению редакционно-издательского совета Владимирского государственного университета

Басуров В.М., Абаляев А.Ю.

Б27 Сборник задач по технической термодинамике и тепломассообмену /
Владим. гос.ун-т; Владимир, 2014. 45 с, ISBN 5-89368-488-5.

Содержит задачи по дисциплинам «Техническая термодинамика» и «Тепломассообмен». Даны необходимые сведения и рекомендательный библиографический список, которые помогут студентам при работе над задачами. Предназначен для студентов направлений 140100, 141100, 190100, 190600, 190700, 270800 (Направление – Теплогазоснабжение и вентиляция) при проведении практических занятий и для самостоятельной работы по изучению названных дисциплин.

Разделы задачника 10,11,12 и 13 заимствованы из сборника задач по технической термодинамике и теории теплообмена авторов В.М. Басурова и Ю.Г. Горнушкина. Владимир – 2004 г.

Ил. 1. Библиогр.: 6 назв.

УДК 621. 43.(07)

ISBN 5-89368-488-5

© Владимирский государственный
университет, 2015

ВВЕДЕНИЕ

Основой процесса обучения в университете является самостоятельная работа студентов над материалом, соответствующего содержания.

Считается, что цель обучения достигнута, если студент научился правильно и творчески применять основные положения теории, о чем с наибольшей достоверностью может свидетельствовать умение студента решать учебные задачи.

В издании приведено 180 задач, охватывающих практически все разделы дисциплин "Техническая термодинамика" и "Тепломассобмен". Степень трудности задач каждого раздела различна: от простых до более сложных, однако даже наиболее трудные задачи вполне по силам для любого студента.

В сборнике не даны элементы теории, не приводятся расчетные уравнения и формулы, отсутствуют примеры решения задач. Это сделано с целью проявления студентами самостоятельной, творческой работы. Все необходимые для решения задач теоретические положения, расчетные формулы, таблицы и прочие материалы имеются в литературе, приведенной в библиографическом списке. Данная литература находится в библиотеке университета.

В условиях некоторых задач встречаются размерности, выраженные в старых единицах. Это сделано специально для того, что бы студенты умели их переводить в международную систему СИ.

1. Основные понятия, идеальный газ, смеси идеального газа

1.1. Из ресивера воздух поступает в коллектор двигателя. Разрежение в ресивере измеряется вакуумметром с наклонной трубкой (угол наклона 30°). Вакуумметр заполнен водой. Определить давление в ресивере, если показание вакуумметра 350 мм. вод.ст., а давление окружающей среды равно 1 бар.

Ответ: $P_{\text{рес}} = 0,983 \text{ бар}$.

1.2. Определить барометрическое давление, плотность и температуру атмосферного воздуха на высоте 9500 метров, если известно, что на уровне моря давление составляет $101325 \frac{\text{Н}}{\text{м}^2}$, а температура 273,15 К.

Ответ: $P_h = 28494,37 \text{ Па}$, $T_h = 211,4 \text{ К}$, $\rho_h = 0,462287 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$.

1.3. В помещении, где установлена барокамера давление по водяному манометру равно 50 мм. вод. ст. Барометр, установленный вне помещения, показывает 750 мм. рт. ст. при температуре, равной 30°C . В барокамере создан вакуум, равный 180 мм. рт. ст. Найти абсолютное давление в барокамере.

Ответ: $P_{\text{абс}} = 0,759668 \cdot 10^5 \text{ Па}$.

1.4. Абсолютное давление в конденсаторе паровой турбины равно 0,04 бар. Каково при этом значение вакуума в процентах, если барометрическое давление равно $96 \frac{\text{кН}}{\text{м}^2}$ при температуре равной 25°C ?

Ответ: $P_{\text{вак}} = 95,8 \%$.

1.5. В трубке манометра, соединяющейся с окружающей средой, имеется столб воды высотой 50 мм. Определить абсолютное давление в ресивере, если разность уровней ртути манометра составляет 120 мм, а давление окружающей среды равно 0,95 атм.

Ответ: $P_{\text{абс}} = 1,13 \cdot 10^5 \text{ Па}$.

1.6. Барометр, находящийся при температуре $T_1 = 293 \text{ К}$, показывает, что давление на уровне моря составляет $P_1 = 1 \cdot 10^5 \text{ Па}$. Определить высоту полета самолета и температуру воздуха за бортом, если барометр, установленный на его борту, показывает давление в 3,7 раза меньше давления на уровне моря.

Ответ: $H = 9746 \text{ м}$, $T_h = 229,65 \text{ К}$.

1.7. Определить давление на днище контейнера ракеты, установленной на подводной лодке, если днище находится на глубине 15,5 м, а атмосферное давление, измеренное ртутным барометром, составляет 1 бар.

Ответ: $P = 2,52055 \cdot 10^5$ Па.

1.8. По данным испытаний паровой турбины разрежение в её конденсаторе составляет 94% при барометрическом давлении $97 \frac{\text{кН}}{\text{м}^2}$ и 0°C . Чему равно абсолютное давление в конденсаторе?

Ответ: $P_{\text{абс}} = 0,06$ бар.

1.9. Двести семьдесят три м^3 идеального газа нагревается при постоянном давлении от 546 К до 547 К. Определить приращение объема.

Ответ: $\Delta V = 0,5 \text{ м}^3$.

1.10. Определить подъемную силу шара-зонда, наполненного водородом и имеющего объем 1 м^3 . Абсолютное давление окружающего воздуха $0,1 \frac{\text{МН}}{\text{м}^2}$. Абсолютное давление в шаре $0,0333 \frac{\text{МН}}{\text{м}^2}$. Температура водорода и температура воздуха равны 288 К. Изменением температуры и давлением при подъеме пренебречь. (Подъемной силой называется разность удельных весов окружающей среды и газа, заполняющего шар).

Ответ: $P = 11,595$ Н.

1.11. Воздуходувка должна поставлять для доменной печи при нормальных физических условиях $300 \frac{\text{м}^3}{\text{мин}}$ воздуха. Атмосферный воздух имеет температуру 298 К и абсолютное давление $0,0958 \frac{\text{МН}}{\text{м}^2}$. Какой объем всасываемого воздуха должна подавать воздуходувка, чтобы обеспечить доменную печь?

Ответ: $V_2 = 346,3 \frac{\text{м}^3}{\text{мин}}$.

1.12. Определить количество пороха в пороховом аккумуляторе давления для ракеты с массовым секундным расходом $10 \frac{\text{кг}}{\text{с}}$ и временем работы 60 с, работающей на 90% перекиси водорода (плотность $\text{H}_2\text{O}_2 = 1390 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$) и твердом катализаторе, если абсолютное давление подачи $2,96 \frac{\text{МН}}{\text{м}^2}$. Температура поступающих в бак газов не должна превышать 1000 К, газовая постоянная пороховых газов $R_{\text{г}} = 290 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$.

Ответ: $m = 4,4$ кг.

1.13. Влажный воздух состоит из 23,0% кислорода, 76% азота и 1% водяного пара. Определить молекулярную массу, объемный состав, газовую постоянную, парциальное давление кислорода, азота и водяного пара, если давление воздуха равно 750 мм. рт. ст.

Ответ: $r_{\text{O}_2} = 0,206$; $r_{\text{N}_2} = 0,778$; $r_{\text{H}_2\text{O}} = 0,016$;
 $\mu = 28,7 \frac{\text{кг}}{\text{кмоль}}$; $R = 289,7 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$;
 $P_{\text{O}_2} = 154,5$ мм. рт. ст.; $P_{\text{N}_2} = 583,5$ мм. рт. ст.; $P_{\text{H}_2\text{O}} = 12$ мм. рт. ст.

1.14. Газовая смесь из водорода H_2 и метана CH_4 в количестве $67,2\text{ м}^3$ имеет газовую постоянную $R_{см} = 2550 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}\cdot\text{К}}$, давление смеси $0,98$ бар и температура 15°С . Определить массовые и объёмные доли, массу водорода и метана в смеси.

$$\text{Ответ: } r_{H_2} = 0,911; \quad r_{CH_4} = 0,089; \quad g_{H_2} = 0,562; \\ g_{CH_4} = 0,438; \quad m_{H_2} = 5,035 \text{ кг}; \quad m_{CH_4} = 3,924 \text{ кг}.$$

1.15. Начальное состояние азота задано параметрами: $t = 200^\circ\text{С}$, $v = 1,9 \frac{\text{м}^3}{\text{кг}}$. Азот нагревается в процессе при постоянном давлении, причем объём азота увеличивается до $5,7 \frac{\text{м}^3}{\text{кг}}$. Определить конечную температуру азота (в град. С).

$$\text{Ответ: } t_2 = 1146^\circ\text{С}.$$

1.16. В сосуде находится смесь газов, образовавшаяся в результате смешения 10 кг азота, 13 кг аргона и 27 кг двуокиси углерода. Определить мольный состав смеси, её удельный объём при нормальных условиях, кажущийся молекулярный вес смеси и газовую постоянную.

$$\text{Ответ: } \mu_{см} = 38,586 \frac{\text{кг}}{\text{кмоль}}; \quad R_{N_2} = 296,7 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}\cdot\text{К}}; \\ R_{Ar} = 207,7 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}\cdot\text{К}}; \quad R_{CO_2} = 188,8 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}\cdot\text{К}}; \quad v = 0,4345 \frac{\text{м}^3}{\text{кг}}; \quad R'_{см} = 161,29 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}\cdot\text{К}}.$$

1.17. Определить плотность метана CH_4 при нормальных физических условиях.

$$\text{Ответ: } \rho = 0,714 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}.$$

1.18. Влажный воздух представляет собой смесь сухого воздуха и водяного пара. Известно, что на каждый килограмм сухого воздуха во влажном приходится $d \frac{\text{г}}{\text{кг с.в.}}$ водяного пара. Определить массовые и объёмные доли сухого воздуха и водяного пара, плотность при нормальных условиях, газовую постоянную, отнесённую к одному килограмму, и кажущийся молекулярный вес смеси, если $d = 10 \frac{\text{г}}{\text{кг с.в.}}$.

$$\text{Ответ: } g_{H_2O} = 0,9901; \quad r_{H_2O \text{ в.п.}} = 0,0144; \quad r_{с.в.} = 0,9841; \\ R_{см} = 288,434 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}\cdot\text{К}}; \\ \mu_{см} = 28,82 \frac{\text{кг}}{\text{кмоль}}; \quad \rho_{см,н} = 1,286 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}.$$

1.19. Сколько кг свинца можно нагреть от температуры 15°С до температуры его плавления $t = 327^\circ\text{С}$ посредством удара молотом массой 200 кг при падении его с высоты 2 м? Предполагается, что вся энергия падения молота превращается в тепло, полностью поглощаемое свинцом. Теплоемкость свинца $C_p = 0,1256 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}\cdot\text{К}}$.

Ответ: $m_c = 0,10$ кг.

1.20. Определить удельный объём кислорода при давлении 32 бара и температуре 280°C . Задачу решать в системе СИ.

Ответ: $v = 0,625 \frac{\text{м}^3}{\text{кг}}$.

1.21. Определить массу воздуха, находящуюся в комнате площадью 25 м^2 и высотой $3,2 \text{ м}$. Принять, что температура воздуха в комнате 22°C , а барометрическое давление равно $986,5 \text{ мбар}$.

Ответ: $m = 93,218$ кг.

1.22. Определить потери тепла (кВт) с отработавшими газами ДВС, если их количество, выходящее за час, равно: $m_{\text{H}_2\text{O}} = 0,2 \frac{\text{кмоль}}{\text{час}}$, $m_{\text{N}_2\text{O}_2} = 1,5 \frac{\text{кмоль}}{\text{час}}$, $m_{\text{CO}_2} = 0,15 \frac{\text{кмоль}}{\text{час}}$. Температура отработавших газов $t = 500^{\circ}\text{C}$, количество всасываемого воздуха в час $L_0 = 1,6 \frac{\text{кмоль}}{\text{час}}$, а его температура $t_0 = 20^{\circ}\text{C}$.

Ответ: $\Delta Q = 7,862$ кВт.

1.23. Энергетическая установка, работающая по парогазовому циклу, в качестве рабочего тела использует смесь водяного пара и горячих продуктов сгорания. Массовая доля продуктов сгорания топлива $g = 0,7$. Принять, что продукты сгорания обладают свойствами воздуха. Определить массовую изобарную теплоёмкость смеси при температуре 500°C и 800°C , а так же удельный объём смеси при температуре 500°C и давлении $P = 10$ бар.

Ответ: $C_{p\ 500} = 1,405 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}\cdot\text{K}}$; $C_{p\ 800} = 1,510 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}\cdot\text{K}}$; $v = 0,221 \frac{\text{м}^3}{\text{кг}}$;

1.24. Двадцать кг газовой смеси, состоящей по массе из 14% CO_2 , 10% O_2 и 76% N_2 имеют начальные параметры $P_1 = 0,2 \text{ мПа}$ и $t_1 = 10^{\circ}\text{C}$. В результате расширения при постоянном давлении температура газа повышается до $t_2 = 200^{\circ}\text{C}$. Определить начальный и конечный объём, подведённую теплоту, работу расширения, изменение внутренней энергии и изменение энтропии. (Бережан.)

Ответ: $v_1 = 0,39 \frac{\text{м}^3}{\text{кг}}$; $v_2 = 0,655 \frac{\text{м}^3}{\text{кг}}$; $l_{1-2} = 1052,22 \text{ кДж}$;

$$q_{1-2} = 3831,1 \text{ кДж};$$

$$s_{1-2} = 0,52 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}\cdot\text{K}}; \quad u_{1-2} = 2779,3 \text{ кДж}.$$

2. Процессы изменения состояния идеального газа в закрытой системе.

2.1. На сжатие трех кг метана затрачено 300 кДж работы, при этом внутренняя энергия газа увеличилась на 595 кДж. Определить количество тепла и указать, подводится оно или отводится; определить изменение температуры и энтальпии газа, если молярная теплоемкость CH_4 при $v = \text{const}$ равна $26,48 \frac{\text{кДж}}{\text{кмоль} \cdot \text{К}}$.

$$\text{Ответ: } q = -205 \text{ кДж; } \Delta T = 120 \text{ К; } \Delta h = 784 \text{ кДж.}$$

2.2. Определить изменение Δu стального стержня диаметром 20 мм и длиной 200 мм, нагруженного постоянной растягивающей силой равной 0,3 мН, при изменении его температуры от 0°C до 20°C . Теплоемкость равна $0,46 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$, плотность $7800 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$. Пренебречь работой стержня против сил атмосферного давления.

$$\text{Ответ: } \Delta u = 4,5065 \text{ кДж.}$$

2.3. ДВС приводит в движение генератор, который отдаёт в сеть ток силой 235 ампер при напряжении 110 В. КПД генератора $\eta_t = 0,95$. Определить КПД ДВС, если он потребляет в час 7 кг топлива с теплотворной способностью $42300 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$.

$$\text{Ответ: } \eta_t = 0,3334.$$

2.4. Чему равна работа расширения и увеличения внутренней энергии 1 кг ртути, испаряемой при постоянной внешнем давлении 3,98 бар, если для испарения необходимо подвести $293 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$ тепла, а удельный объем ртути и её пара при температуре кипения соответственно равны $0,0798 \cdot 10^{-4} \frac{\text{м}^3}{\text{кг}}$ и $0,0756 \frac{\text{м}^3}{\text{кг}}$?

$$\text{Ответ: } l = 30085,62 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}; \Delta u = 262914,38 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}.$$

2.5. До какого давления следует заряжать пусковой баллон ДВС продуктами сгорания из цилиндров ДВС, если температура в баллоне при зарядке 420 К, а после остывания до температуры 288 К давление должно быть 32 бара. Определить количество тепла, теряемое газами при охлаждении, если объём баллона 90 литров, теплоемкость продуктов сгорания $C_v = 0,732 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$, а $R = 280 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$.

$$\text{Ответ: } P_1 = 4,66 \text{ МПа; } Q = -345 \text{ кДж.}$$

2.6. В калориметрической бомбе ёмкостью 300 см^3 , заполненной кислородом при давлении 25 бар и температуре 293 К сгорает 0,3 г топлива, имеющего теплотворную способность $25100 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$. Определить повышение давления и температуру в конце сгорания, пренебрегая тепловыми потерями.

$$\text{Ответ: } T_2 = 1420 \text{ К; } P_2 = 121 \text{ бар.}$$

2.7. Определить работу, затраченную на изотермическое сжатие 2 кг азота от давления 3 бара до давления 9,4 бара, если сжатие происходит при температуре 450 К, как изменится работа, если снизить температуру газа, поступающую в компрессор, с 450 до 300 К?

$$\text{Ответ: } L_{300} = -202 \text{ кДж}; \quad \frac{L_{450}}{L_{300}} = 1,5 \text{ раза.}$$

2.8. Определить минимально необходимую степень сжатия $\varepsilon = \frac{v_1}{v_2}$ в ДВС, что бы топливо, впрыснутое в цилиндр в конце такта сжатия, воспламенилось. Температура воспламенения топлива 970К, температура воздуха перед сжатием 300К, сжатие считать адиабатным. Чему равно давление в конце сжатия, если начальное равно 0,91 бар?

$$\text{Ответ: } \varepsilon = 18,798; \quad P_2 = 55,3 \text{ бар.}$$

2.9. При внезапном открывании вентиля на баллоне высокого давления, присоединенным к трубе, другой конец которой закрыт, газ, заключённый в трубе, подвергается быстрому сжатию, которое можно считать адиабатным. Определить повышение температуры, которое при этом произойдёт, если линия заполнена кислородом при давлении 1,05 бар и температуре 300 К, а давление в баллоне 150 бар. Мольная теплоёмкость кислорода при постоянном давлении $\mu C_p = 33,1 \frac{\text{кДж}}{\text{кмоль} \cdot \text{К}}$.

$$\text{Ответ: } T_2 = 1044,9 \text{ К.}$$

2.10. В цилиндре с удельным объёмом воздуха, равным $0,2 \frac{\text{м}^3}{\text{кг}}$, закрытым пробкой-поршнем, находится воздух при давлении 100 бар и температуре 293 К. Определить скорость вылета крышки при её внезапном освобождении, если масса крышки 1 кг, а воздух расширяется по адиабате в 3 раза, прежде, чем перестанет действовать на крышку. Какова будет температура воздуха после вылета крышки?

$$\text{Ответ: } T_2 = 188,8 \text{ К}; \quad W = 1885,7 \frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

2.11. Осевой компрессор газовой турбины всасывает воздух при давлении 1,013 бар и температуре 303 К и подаётся в камеру сгорания под давлением 7,3 бар и температуре 640 К. Определить показатель политропы процесса сжатия, теплоёмкость, количество тепла, изменение внутренней энергии, энтальпии и работу сжатия 1 кг воздуха в компрессоре.

Ответ:

$$n = 1,609; \quad C = 0,247 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}; \quad q = 83,2 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}; \quad \Delta u = 242,3 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}; \quad \Delta h = 339 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}; \quad l = -151,9 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}.$$

3. Сжатие газа в компрессоре

3.1. Идеальный одноступенчатый компрессор сжимает воздух от давления $P_{1абс} = 1$ бар при температуре $t_1 = 20^{\circ}\text{C}$ до давления $P_{2абс} = 3$ бар. Определить работу, затраченную на сжатие 1 кг воздуха и конечную температуру, если сжатие происходило: а) по изотерме, в) по политропе при $n = 1,3$, с) по адиабате.

$$\text{Ответ: } l_{из} = 92,38 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}; \quad l_{адиаб} = 108,5 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}; \quad l_{пол.} = 108 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}};$$

$$T_{1из} = T_{2из} = 293\text{K}; \quad T_{2пол} = 377\text{K}; \quad T_{2ад} = 401\text{K}.$$

3.2. Идеальный одноступенчатый компрессор, рабочий объём цилиндра которого равен $V_h = 5 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$, а частота вращения компрессора $n' = 20 \text{ с}^{-1}$, сжимает воздух от давления $P_{1абс} = 1$ бар и температуры $t_1 = 20^{\circ}\text{C}$ до давления $P_{2абс} = 3$ бар. Определить производительность компрессора для следующих относительных величин вредного пространства: а). $\epsilon_0 = 5,0\%$, б). $\epsilon_0 = 10,0\%$, с). $\epsilon_0 = 15,0\%$. Показатель политропы расширения воздуха из вредного пространства $m = 1,2$.

Ответ:

$$V_1 = 92,5 \cdot 10^{-3} \frac{\text{м}^3}{\text{с}}; \quad V_2 = 85 \cdot 10^{-3} \frac{\text{м}^3}{\text{с}}; \quad V_3 = 77,5 \cdot 10^{-3} \frac{\text{м}^3}{\text{с}}.$$

3.3. Идеальный одноступенчатый компрессор, рабочий объём цилиндра которого равен $V_h = 5 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$, сжимает воздух от давления $P_{1абс} = 1$ бар до давления $P_{2абс} = 3$ бар. Определить работу, затрачиваемую на один оборот коленчатого вала компрессора, если сжатие происходит по политропе с показателем $n = 1,3$.

$$\text{Ответ: } l = 625,15 \text{ Дж}.$$

3.4. Определить отношение давлений конечного P_2 к начальному P_1 , при котором компрессор с относительным объёмом вредного пространства $\epsilon_0 = \frac{V_0}{V_h} = 0,1$, прекратит подачу, если показатель политропы при расширении воздуха из вредного пространства $m = 1,2$.

$$\text{Ответ: } \frac{P_2}{P_1} = 17,769.$$

3.5. Воздух сжимается в первом случае в идеальном одноступенчатом компрессоре, во втором – в двух ступенчатом от давление $P_{1абс} = 1$ бар и температуры $t_1 = 20^{\circ}\text{C}$ до $P_{2абс} = 9$ бар. Процесс сжатия политропный, $n = 1,3$. Определить: а) на сколько процентов уменьшится, затрачиваемая работа на сжатие в двух ступенчатом компрессоре, если промежуточное многоступенчатое давление $P_{абс} = 3$ бар, а охлаждение воздуха после сжатия в первой ступени производится до начальной температуры $t_1 = 20^{\circ}\text{C}$, в) конечные температуры воздуха в первом и втором случаях T_1' и T_2' .

$$\text{Ответ: } \Delta l = 12,6\%; \quad T_1' = 486,5\text{K}; \quad T_2' = 377,5\text{K}.$$

3.6. Центробежный компрессор сжимает $100 \frac{\text{кг}}{\text{ч}}$ азота. При сжатии энтальпия азота увеличивается на $200 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$. Какова должна быть мощность привода компрессора, если пренебречь теплообмен с окружающей средой и изменением кинетической и потенциальной энергиями азота?

Ответ: $N = 5,55 \text{ кВт}$.

3.7. Осевой компрессор газовой турбины всасывает воздух при давлении 1,013 бар и температуре 303 К и подает его в камеру сгорания при давлении 7,3 бар и температуре 640 К. Определить показатель политропы процесса сжатия, его теплоёмкость, количество тепла, изменение внутренней энергии, энтальпии и работу сжатия 1 кг воздуха в компрессоре.

Ответ: $n=1,609$; $c=0,247 \frac{\text{кДж}}{\text{кг К}}$; $q=83,23 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$; $\Delta = 242,3 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$;
 $\Delta h=339 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$; $l=159,07 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$

4. Процессы идеального газа

4.1. Окись углерода, имеющая объём, приведенный к нормальным условиям, равный $0,5 \text{ м}^3$, имеет давление $p_1 = 25$ бар и температуру $t_1 = 350^\circ\text{C}$. В изотермическом процессе к газу подводится тепло $Q = 85 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$. Найти параметры: p, v начального и конечного состояния, работу расширения, изменение внутренней энергии и энтальпии.

Ответ: $l = Q = 85 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$; $\Delta u = 0$; $\Delta h = 0$; $v_1 = 0,0471 \frac{\text{м}^3}{\text{кг}}$;
 $v_2 = 0,51 \frac{\text{м}^3}{\text{кг}}$; $P_2 = 2,3 \cdot 10^5 \text{ Па}$.

4.2. Азот, приведенный к нормальным физическим условиям, имеющий объём $V_n = 3,5 \text{ м}^3$, находится в первоначальном состоянии при $P_1 = 1,1 \cdot 10^5 \text{ Па}$ и температуре $t_1 = 25^\circ\text{C}$. Его подвергают изотермическому сжатию до давления $P_2 = 24,2 \cdot 10^5 \text{ Па}$. Найти удельный объём в начальном и конечном состоянии, работу, затрачиваемую на сжатие и тепло, отведенное от газа.

Ответ: $v_1 = 0,805 \frac{\text{м}^3}{\text{кг}}$; $v_2 = 0,038 \frac{\text{м}^3}{\text{кг}}$;
 $Q = L = -273711,8 \text{ Дж}$.

4.3. 25 кг воздуха изотермически сжимается при $t_1 = 27^\circ\text{C}$ до тех пор, пока давление не становится равным $P_2 = 41,5 \cdot 10^5 \text{ Па}$. На сжатие затрачивается работа $L = -8,000 \text{ МДж}$. Найти начальное давление и объём, конечный объём и тепло, отведённое от воздуха.

Ответ: $L = Q = -8,000 \text{ МДж}$; $P_1 = 1,013 \text{ бар}$;
 $v_2 = 0,472 \frac{\text{м}^3}{\text{кг}}$; $v_1 = 19,3 \frac{\text{м}^3}{\text{кг}}$.

4.4. Во сколько раз измениться абсолютное значение работы адиабатного сжатия 1 кг воздуха ($k=1,4$), имеющего начальную температуру $T_1 = 293 \text{ К}$ 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 начальная абсолютная температура газа увеличится в 10 раз?

Ответ: при $P_2 = 10$ бар; $l = 195,65$ Дж;

при $P_2 = 100$ бар; $\Delta l =$ в 2,93 раза

при $P_2 = 1000$ бар; $\Delta l =$ в 6,66 раз

при $P_2 = 10000$ бар; $\Delta l =$ в 13,85 раз

4.5. При адиабатном расширении 1 кг воздуха температура его падает на 120 град. Чему равна полученная в процессе его расширения работа и сколько тепла следовало бы подвести к воздуху, что бы ту же по величине работу получить в изотермическом процессе?

Ответ: $l = 86,1 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$.

4.6. Чему равна начальная температура азота, если его конечная температура после совершения процесса адиабатного сжатия равна 750°C . Степень сжатия $\varepsilon = \frac{v_1}{v_2} = 10$.

Теплоёмкости C_p и C_v – постоянные.

Ответ: $T_1 = 407,3$ К.

4.7. Из баллона ёмкостью $0,05\text{м}^3$, наполненного азотом, газ выпускается в атмосферу настолько быстро, что теплообмен не успевает совершиться между окружающей средой и азотом. До выпуска давление в баллоне было $P_1 = 12 \frac{\text{МН}}{\text{м}^2}$ и температура $t_1 = 27^\circ\text{C}$. После закрытия вентиля температура в баллоне стала равной $t_2 = 0^\circ\text{C}$. Чему равна масса выпущенного азота и давление в баллоне после выпуска?

Ответ: $P_2 = 8,61 \cdot 10^6 \frac{\text{Н}}{\text{м}^2}$; $m_2 = 5,32$ кг; $\Delta m = 1,51$ кг.

4.8. В баллоне объёмом 40 л находится сжатый кислород при давлении 140 бар и температуре окружающей среды. После быстрого открытия выпускного вентиля кислород вытекает в атмосферу; затем вентиль снова зарывается. Теплообмен не успевает совершиться между содержимым в баллоне и средой. Давление в баллоне после выпуска $p_2 = 70 \cdot 10^5 \frac{\text{Н}}{\text{м}^2}$. Через некоторое время температура кислорода становится вновь равной температуре среды $t_1 = 20^\circ\text{C}$. Чему равна температура кислорода в баллоне сразу после выпуска? Какое количество кислорода вышло из баллона? Чему стало равно давление в баллоне после восстановления первоначальной температуры? Какое количество кислорода вышло бы, если бы выпуск производился очень медленно при неизменной при этом температуре газа и конечным давлением $p_2 = 70 \cdot 10^5 \frac{\text{Н}}{\text{м}^2}$?

Ответ: $t_2 = -32,79^\circ\text{C}$; $P_3 = 85,33$ бар; $\Delta m_{\text{ад}} = 18,77$ г;

$\Delta m_{\text{изот}} = 0,001$ г.

4.9. В двигателе Дизеля топливо, впрыскиваемое в цилиндр самовоспламеняется при соприкосновении со сжатым воздухом, имеющим большую температуру, чем температура самовоспламенения топлива. Определить минимально необходимую степень сжатия $\varepsilon = \frac{V_1}{V_2}$ и давление в конце сжатия P_2 , если температура воспламенения топлива равна 630°C . Перед началом сжатия воздух в цилиндре имеет параметры $P_1 = 0,97$ бар, $t_1 = 60^\circ\text{C}$. Сжатие считать обратимым адиабатным, $k = 1,4$.

Ответ: $P_2 = 32,49$ бар; $\varepsilon = 12,35$.

4.10. В соплах и на лопатках газовой турбины расширяется по адиабате масса $m = 1500 \frac{\text{кг}}{\text{ч}}$ двуокиси углерода CO_2 . Параметры газа на входе в турбину: $P_1 = 7 \cdot 10^5$ Па, $t_1 = 700^\circ\text{C}$; на выходе: $P_2 = 0,98 \cdot 10^5$ Па. Определить параметры CO_2 на выходе, часовую полезную внешнюю работу газа $l = -m \int_{P_1}^{P_2} v \cdot dp$ и теоретическую (без учета потерь) мощность турбины N_0 . Расчет сделать с учетом зависимости теплоёмкости от температуры (см. приложение).

Ответ: $v_2 = 1,173 \frac{\text{м}^3}{\text{кг}}$; $l = 753,9 \frac{\text{МДж}}{\text{ч}}$; $N_0 = 209,4$ кВт;

$t_1 = 335^\circ\text{C}$.

4.11. В регенеративном подогревателе газовой турбины воздух нагревается при постоянном давлении от $t_1 = 130^\circ\text{C}$ до $t_2 = 500^\circ\text{C}$. Определить количество тепла, сообщенное воздуху в единицу времени, если расход его составляет $250 \frac{\text{кг}}{\text{ч}}$. Дать ответ в $\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$ и кВт. Для решения воспользоваться табличными данными.

Ответ: $Q = 26,92 \frac{\text{кДж}}{\text{с}} = 26,92$ кВт.

4.12. Монооксид углерода, массой 1 кг, при давлении $p_1 = 0,2$ мПа и температуре $t_1 = 25^\circ\text{C}$ сначала сжимается по адиабате до давления $p_2 = 1,2$ мПа, затем расширяется по изотерме, после чего, в изобарном процессе возвращается в исходное состояние. Определить параметры газа в начале и в конце каждого процесса, изменение внутренней энергии, энтальпии и энтропии в каждом процессе, работу, располагаемую работу и количество теплоты, участвующих в процессах. Изобразить изменение состояния газа на диаграммах $p-v$ и $T-s$. Рабочее тело считать идеальным газом.

Ответ:

$$v_1 = 0,442 \frac{\text{м}^3}{\text{кг}}; v_2 = 0,123 \frac{\text{м}^3}{\text{кг}}; T_2 = 497,22\text{K}; v_3 = 0,738 \frac{\text{м}^3}{\text{кг}}; \Delta u_{1-2} = l_{1-2} = 147,9 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}; \Delta h_{1-2} = \dot{l}_{1-2} = 207 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}; q_{2-3} = l_{2-3} = 264,5 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}; \Delta s_{2-3} = 532 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}\cdot\text{K}}; \Delta u_{3-1} = 147,9 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}; \Delta h_{3-1} = 207 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}; \Delta s_{3-1} = 532 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}\cdot\text{K}}; l_{3-1} = 59,3 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$$

4.13. От воздуха массой 1 кг при постоянном давлении отводится 275 кДж теплоты, при этом объем воздуха уменьшается в два раза. Определить температуру воздуха в конце процесса охлаждения. $\left(R = 287 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}\cdot\text{К}}\right), k = 1,4$.

Ответ: $T_2 = 274\text{К}$.

5. Второе начало термодинамики. Теория циклов. Циклы ДВС

5.1. Определить КПД и работу цикла с подводом тепла по изохоре если даны $P_{1\text{ аБс}} = 1\text{ бар}$, $t_1 = 0^\circ\text{С}$, $P_{3\text{ аБс}} = 53\text{ бар}$, $P_{4\text{ аБс}} = 3,5\text{ бар}$. Рабочим телом является 1 кг сухого воздуха.

Ответ: $\eta_t = 0,56$; $l_{\text{ц}} = 626,45 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$.

5.2. Чему будет равен термический КПД цикла, приведенного в задаче 5.1, если процесс адиабатного расширения продолжить до давления $P_{5\text{ аБс}} = 1\text{ бар}$ и на сколько процентов увеличиться работа цикла?

Ответ: $\eta_t = 0,685$; $x = 15,1\%$.

5.3. Определить термический КПД цикла с подводом тепла по изобаре, если: $P_{1\text{ аБс}} = 1\text{ бар}$, $t_1 = 0^\circ\text{С}$, $P_{3\text{ аБс}} = 55\text{ бар}$, $P_{4\text{ аБс}} = 3,5\text{ бар}$. Рабочее тело – 1 кг сухого воздуха.

Ответ: $\eta_t = 0,6$.

5.4. Для цикла из задачи 5.3 определить полезно затраченное и подведённое тепло.

Ответ: $q_1 = 1241,5 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$, $q_{\text{п}} = 744,9 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$.

5.5. Чему равен термический КПД цикла приведённого в задаче 5.3, если процесс адиабатного расширения продолжить до давления $P_{5\text{ аБс}} = 1\text{ бар}$ и во сколько раз увеличится работа цикла?

Ответ: $\eta_t = 0,887$; $\frac{L_{\text{ц2}}}{L_{\text{ц1}}} = 3\text{ раза}$.

5.6. Для идеального цикла со смешанным подводом теплоты определить КПД и давление $P_{2\text{ аБс}}$, если известны $P_{1\text{ аБс}} = 1\text{ бар}$, $t_1 = 0^\circ\text{С}$, $P_{3\text{ аБс}} = 70\text{ бар}$, $P_{4\text{ аБс}} = 3,5\text{ бар}$, теплота, подведённая в изохорном процессе 2-2 $q'_1 = 27,16 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$, рабочее тело – 1 кг сухого воздуха.

Ответ: $P_{2\text{ аБс}} = 64,4\text{ бар}$; $\eta_t = 0,63$.

5.7. Определить эксергию 1 кмолья воздуха, находящегося при температуре окружающей среды и давлении 100 бар по отношению к окружающей среде с параметрами $T_0 = 293\text{ К}$ и давлении $P_0 = 1\text{ бар}$.

Ответ: $ex = 14591,4 \frac{\text{кДж}}{\text{кмоль}}$.

5.8. Определить увеличение эксергии 1 кг воздуха, который находится в окружающей среде, имеющей параметры $P_0 = 1$ бар, $T_0 = 293$ К, если его сжать по адиабате до $T = 500$ К.

$$\text{Ответ: } ex = 207,86 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}.$$

5.9. Определить эксергетический КПД регенеративного теплообменника газовой турбины, в котором воздух нагревается от $T'_в = 400$ К до $T''_в = 535$ К, а отработавшие газы охлаждаются от $T'_г = 615$ К до $T''_г = 480$ К. Принять теплоёмкость для газов и воздуха $C_p = 1,005 \frac{\text{кДж}}{\text{кг К}}$, а температуру окружающей среды $T_0 = 275$ К.

$$\text{Ответ: } \eta_{ex} = 0,826.$$

5.10. Определить эксергетический КПД средней части паровой турбины, если пар в ней расширяется по адиабате от $P_1 = 20,5$ бар и $T_1 = 838$ К до $P_2 = 1,6$ бар и $T_2 = 508$ К.

$$\text{Ответ: } \eta_{ex} = 0,934.$$

5.11. Определить изменение энтропии 3 кг азота в политропном процессе при изменении температуры от $t_1 = 100^\circ\text{C}$ до $t_2 = 300^\circ\text{C}$. Показатель политропы $n = 1,2$. Теплоёмкость принять по молекулярно-кинетической теории. Изобразить процессы в $P - v$ и $T - s$ диаграммах.

$$\text{Ответ: } \Delta s = -0,956 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}\cdot\text{К}}.$$

5.12. Один кг азота и 1 кг водорода сжимаются изотермически при $t_1 = 15^\circ\text{C}$ от 1 до 10 бар. Для какого газа изменение энтропии будет больше и во сколько раз (по отношению к энтропии другого газа).

$$\text{Ответ: } \frac{\Delta s_{\text{H}_2}}{\Delta s_{\text{N}_2}} = 14.$$

5.13. Определить изменение энтропии в процессе испарения 1 кг воды при температуре 100°C , если известно, что теплота парообразования равна $r = 2257 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$.

$$\text{Ответ: } \Delta s = 6,05 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}\cdot\text{К}}.$$

5.14. Пятьдесят кг льда, имеющего начальную температуру -5°C , помещено в воздух с температурой $+15^\circ\text{C}$. Считая, что образующаяся при таянии вода нагревается до температуры воздуха, определить увеличение энтропии в результате этого процесса. Теплота таяния льда равна $\lambda = 333 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$, теплоёмкость льда $C_p = 2,03 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}\cdot\text{К}}$, теплоёмкость воды $C_p = 4,187 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}\cdot\text{К}}$.

$$\text{Ответ: } \Delta s = 74 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}\cdot\text{К}}.$$

5.15. Стальной шар, массой 10 кг при 500°C погружается в сосуд с 18 кг воды, температура которой равна 15°C . Определить изменение энтропии системы в этом процессе. Считать, что тепловые потери отсутствуют, теплоёмкость стали $C_p = 0,5129 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}\cdot\text{K}}$, теплоёмкость воды $C_p = 4,187 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}\cdot\text{K}}$.

$$\text{Ответ: } \Delta s = 3,41 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}\cdot\text{K}}.$$

5.16. Определить эксергию (максимально полезную работоспособность) воздуха в баллоне. Давление воздуха 150 бар, температура равна температуре окружающей среде. Параметры окружающей среды (воздуха) $P_0 = 1 \text{ бар}$, $t_0 = 20^{\circ}\text{C}$. Объём баллона 40 дм^3 . Воздух считать идеальным газом.

$$\text{Ответ: } E_x = 2411 \text{ кДж}.$$

5.17. Определить эксергию воздуха в баллоне. Давление и температура воздуха $P = 130 \text{ бар}$, $t = 200^{\circ}\text{C}$. Параметры окружающей среды $P_0 = 1 \text{ бар}$, $t_0 = 15^{\circ}\text{C}$. Объём баллона 20 дм^3 . Воздух считать идеальным газом.

$$\text{Ответ: } E_x = 849 \text{ кДж}.$$

5.18. Определить эксергию азота, находящегося в пьезометре экспериментальной установки, с параметрами $P = 250 \text{ бар}$, $t = 700^{\circ}\text{C}$. Параметры окружающей среды $P_0 = 1 \text{ бар}$, $t_0 = 20^{\circ}\text{C}$. Объём пьезометра 500 см^3 . Азот считать идеальным газом.

$$\text{Ответ: } E_x = 24 \text{ кДж}.$$

5.19. Определить эксергию 100 кДж тепла при температуре 700°C . Температура окружающей среды 0°C . Определить потерю эксергии этого тепла, если оно будет передано тепловому источнику с температурой 500°C .

$$\text{Ответ: } E_x = 71,9 \text{ кДж}; \Delta E_x = 7,2 \text{ кДж}.$$

5.20. Определить эксергию 1 кг горячих газов в котельном агрегате. Известно, что температура пламени равна 1500°C , давление газов близко к атмосферному. Параметры окружающего воздуха равны $P_0 = 1 \text{ бар}$, $t_0 = 0^{\circ}\text{C}$. Принять, что термодинамические свойства газов аналогичны свойствам воздуха. Задачу решать с использованием таблиц.

$$\text{Ответ: } e_x = 1139 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}.$$

5.21. Азот протекает через местное гидравлическое сопротивление. Параметры азота при этом изменяются от $P_1 = 40 \text{ бар}$ и $t_1 = 300^{\circ}\text{C}$ до $P_2 = 10 \text{ бар}$ и $t_2 = 280^{\circ}\text{C}$. Определить изменение эксергии 1 кг азота в этом процессе и количество отведенного тепла. Азот считать идеальным газом. Параметры среды $P = 1 \text{ бар}$, $t_0 = 10^{\circ}\text{C}$.

$$\text{Ответ: } \Delta e_x = -93 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}.$$

5.22. В трубе течет азот с начальными параметрами $P_1 = 25$ бар и $t_1 = 80^\circ\text{C}$. В результате гидравлического сопротивления давление азота вдоль трубы падает и в конце трубы становится равным $P_2 = 17$ бар. Определить потерю эксергии 1 кг азота в результате этого процесса. Считать, что процесс течения адиабатный, а газ идеальный. Параметры окружающей среды: $P_0 = 1$ бар и $t_0 = 20^\circ\text{C}$.

$$\text{Ответ: } \Delta e_x = -25,7 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}.$$

5.23. Температура газов, выходящих из земли у некоторых горячих источников доходит до 180°C (давление атмосферное). Определить эксергию 1 кг газа. Температура среды $t_0 = 20^\circ\text{C}$. Газ считать идеальным и идентичным углекислому газу. Определить максимальный термический КПД, который имел бы тепловой двигатель, превращающий тепло этого источника в работу.

$$\text{Ответ: } e_x = 26,7 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}; \eta = 0,353.$$

5.24. В регенеративном теплообменнике газотурбинной установки воздух нагревается за счет отработавших газов, выходящих из турбины от $t_1 = 140^\circ\text{C}$ до $t_2 = 270^\circ\text{C}$, вследствие чего отработавшие газы охлаждаются $t_3 = 340^\circ\text{C}$ до $t_4 = 210^\circ\text{C}$. Определить потерю эксергии ГТУ в результате такого теплообмена в расчете на 1 кг проходящего газа. Газ считать идеальным, обладающим свойством воздуха. Теплоёмкость принять по молекулярно - кинетической теории. Температура окружающей среды 20°C . Теплообменник не имеет тепловых потерь. Гидросопротивлением теплообменника пренебречь. Определить эксергетический КПД теплообменника.

$$\text{Ответ: } \Delta e_x = 10,25 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}; \eta_{e_x} = 0,949.$$

5.25. Определить потерю работоспособности в тепловыделяющем элементе атомного реактора, где выделяющееся в процессе ядерной реакции тепло, поглощается водой, протекающей при давлении 100 бар. Вода нагревается от $t_1 = 190^\circ\text{C}$ до $t_2 = 280^\circ\text{C}$, температура тепловыделяющего элемента постоянна по высоте и равна $t_3 = 380^\circ\text{C}$. Расчет тепла вести на 100 ккал переданного тепла. Температура окружающей среды $t_0 = 20^\circ\text{C}$. Тепловыми и гидравлическими потерями пренебречь.

$$\text{Ответ: } \Delta L = 12,86 \text{ ккал.}$$

5.26. Определить потерю эксергии в процессе конденсации водяного пара в конденсаторе паровой турбины. Процесс конденсации происходит при давлении $P = 0,04$ бар, температура конденсации при этом равна 29°C . Тепло, выделяющееся в процессе конденсации пара передаётся окружающей среде, температура которой 10°C . Расчет провести на 1 кг конденсирующегося пара. Считать, что в конденсатор поступает сухой насыщенный пар. Гидравлическими потерями пренебречь.

Ответ: $\Delta e_x = 72,4 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$; 2,98%

5.27. Средняя температура подвода тепла для водяного пара в паротурбинной установке равна 330°C , температура отвода тепла равна 29°C . Определить термический КПД ПТУ, а также эксергический КПД теоретического цикла ПТУ. При расчёте эксергического КПД считать, что в топке котла сжигается топливо при атмосферном давлении, максимальная температура пламени равна $t_{\text{пл}} = 1350^{\circ}\text{C}$, теплоёмкость продуктов сгорания постоянная. Температуру среды принять равной $t_{\text{ср}} = 29^{\circ}\text{C}$. Тепловые потери в котельном агрегате отсутствуют.

Ответ: $\eta_t = 0,499$; $\eta_{\text{ex}} = 0,811$.

5.28. Двигатель работает по циклу с подводом тепла в процессе $v = \text{const}$. Начальное состояние рабочего тела: $P_1 = 0,9$ бар и $t_1 = 20^{\circ}\text{C}$. Степень сжатия $\varepsilon = 4,6$. При сгорании выделяется энергия в количестве $1287 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$. Определить термический КПД и мощность двигателя, если диаметр цилиндра двигателя $D = 250$ мм, ход поршня $S = 340$ мм, $n = 200 \text{min}^{-1}$ и за каждые два оборота совершается один цикл. Рабочее тело – воздух.

Ответ: $\eta_t = 0,457$; $N = 5,58$ кВт.

5.29. Определить полезную работу, совершенную за цикл с подводом тепла в процессе $v = \text{const}$, если известно, что расход топлива составляет 44 г на 1 кг воздуха, степень сжатия равна 6, теплота сгорания топлива $Q_{\text{н}}^{\text{в}} = 29260 \cdot 10^3 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}$, показатель адиабаты равен 1,37.

Ответ: $A_{\text{пол}} = 623985,7 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}$.

5.30. Для цикла с подводом тепла при $v = \text{const}$ определить среднее индикаторное (цикловое) давление. Начальное давление $P_1 = 0,98 \cdot 10^5 \frac{\text{Н}}{\text{м}^2}$, $t_1 = 20^{\circ}\text{C}$, $\varepsilon = 3,6$, $\lambda = 3,33$, $\kappa = 1,4$

Ответ: $P = 5,29 \cdot 10^5$ Па.

5.31. Для цикла с подводом тепла в процессе $P = \text{const}$ определить полезную работу и термический КПД, если $P_1 = 0,98 \cdot 10^5 \frac{\text{Н}}{\text{м}^2}$, $t_1 = 50^{\circ}\text{C}$, $\varepsilon = 14$, $\kappa = 1,4$, $\rho = 1,67$.

Ответ: $\eta_t = 0,61$; $l = 381238 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}$.

5.32. Определить эксергию 1 кг текущей по трубе воды при давлении, близком к атмосферному. Температура воды и окружающего воздуха равны соответственно $t_1 = 90^{\circ}\text{C}$ и $t_2 = 20^{\circ}\text{C}$. Теплоёмкость воды принять равной $4,187 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$.

Ответ: $e_x = 28,3 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$

5.33. В установке, используемой для определения показателя адиабаты k , находится испытуемый газ, сжатый до $P_{абс} = 2,94$ бар. Определить показатель адиабаты k этого газа, если при быстром перемещении поршня на 9 мм давление в сосуде повышается на 0,01 бар. Объем сосуда (a) равен 0,3 л, диаметр поршня 10 мм, а испытуемый газ можно считать идеальным.

Ответ: 1,44.

5.34. Для цикла поршневого двигателя внутреннего сгорания с изохорным подводом теплоты известны: термический КПД $\eta_t = 0,55$ и количество отведенной теплоты $q_2 = 500 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$. Давление и температура рабочего тела в начальной точке цикла равны $p_1 = 0,1$ мПа и $t_1 = 20^\circ\text{C}$. Определить:

- степень сжатия ε ;
- количество подведенной теплоты q_1 ;
- степень повышения давления λ ;
- максимальное давление цикла p_3 .

Для цикла с изобарным подводом теплоты, осуществляемом в том же диапазоне давлений, при тех же начальных условиях и при том же количестве отводимой теплоты, найти:

- степень сжатия ε_p ;
- степень предварительного расширения ρ ;
- количество подведенной теплоты q_{1p} ;
- термический КПД η_t .

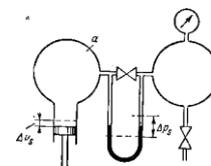
Максимальная температура какого из двух циклов будет выше, почему?

Рабочее тело — воздух ($R = 287 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}\cdot\text{К}}$, $k = 1,41$).

Ответ: $\varepsilon = 7,36$; $q_1 = 1111 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$; $\lambda = 3,34$; $p_3 = 5,53$ мПа;
 $\varepsilon_p = 17,56$; $\rho = 2,39$; $q_{1p} = 1283 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$; $\eta_t = 0,61$; $\Delta T_3 = 0$ К.

5.35. На орбитальной космической станции для дыхания используется смесь кислорода (25% по массе) и гелия под давлением 43,5 кПа. В результате столкновения с метеоритом произошла разгерметизация станции. За время работ по устранению причин аварии давление упало на 10 кПа. На сколько изменилась температура на космической станции, если в обычных условиях ее величина составляет 18°C .

Ответ: $\Delta T = -28,45$ К.



5.36. Для цикла Карно с термическим КПД равным 70% известны давление 0,1 мПа и температура в начале процесса отвода теплоты и количество теплоты, подводимой от высшего источника

$q_1 = 200 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$. Найти: параметры состояния рабочего тела в характерных точках цикла, работу цикла, количество отводимой к низшему источнику теплоты. Рабочее тело — воздух, ($R = 287 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}\cdot\text{К}}$, $\kappa = 1,4$).

Ответ: $T_1 = 977 \text{ K}$; $T_2 = 293,15 \text{ K}$; $P_1 = 13,8 \text{ мПа}$;
 $v_1 = 0,0203 \frac{\text{м}^3}{\text{кг}}$; $P_2 = 6,76 \text{ мПа}$; $v_2 = 0,0415 \frac{\text{м}^3}{\text{кг}}$; $P_3 = 0,1 \text{ мПа}$; $v_3 = 0,841 \frac{\text{м}^3}{\text{кг}}$;
 $P_4 = 0,2 \text{ мПа}$; $v_4 = 0,412 \frac{\text{м}^3}{\text{кг}}$; $q_2 = 60 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$; $l = 140 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$.

6. Реальные газы и пары. Циклы холодильных установок

6.1. Для термической воздушной холодильной машины, служащей для охлаждения складского помещения до -5°C найти: 1.Работу, затраченную на охлаждение 1 кг воздуха, 2.Холодильный коэффициент, 3.Удельную холодопроизводительность, если сжатие в компрессоре происходит до $P_{2а\delta\epsilon} = 3 \text{ бар}$ и расширение в пневматическом двигателе до $P_{1а\delta\epsilon} = 1 \text{ бар}$. Температура охлаждающей воды 20°C . Массовую теплоемкость воздуха принять равной $C_p = 1,005 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$, $\kappa = 1,41$.

Ответ: $l_{\text{ц}} = 21,1 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$, $\epsilon = 2,62$, $q_0 = 2620 \frac{\text{кДж}}{\text{МДж}}$. (тепло, отводимое от охлаждаемого тела на 1 МДж работы, затраченной в цикле - удельная холодопроизводительность).

6.2. Найти коэффициент трансформации тепла в тепловом насосе, работающему по обратному циклу Карно, если потребителю необходимо подавать горячую воду с температурой 40°C . В качестве холодильного источника используется водоём с температурой 15°C . На сколько процентов уменьшится расход электроэнергии в установке с тепловым насосом по сравнению со случаем непосредственного электрообогрева воды, подаваемой потребителю.

Ответ: $\epsilon = 12,5$; $\chi = 91,7\%$.

6.3. Тепловой насос выполнен на базе аммиачной компрессионной холодильной установки. Определить коэффициент трансформации тепла теплового насоса, если в компрессоре холодильной машины осуществляется сухой ход при начальном давлении $P_{1а\delta\epsilon} = 0,081 \text{ бар}$, а сжатие аммиака до $P_{2а\delta\epsilon} = 11,8 \text{ бар}$ происходит по адиабате. Переохлаждение жидкого аммиака в конденсаторе отсутствует. Привести схему решения задачи в T-S диаграмме.

Ответ : $\epsilon = 3,68$.

6.4. В баллоне ёмкостью 40 л заключён азот под давлением 75 бар и температурой 20⁰С. Пользуясь уравнением для идеального и реального газов, определить удельный объём азота и сравнить полученные результаты.

Ответ: $v_{ид} = 0,0116 \frac{м^3}{кг}$; $v_{реал} = 0,0111 \frac{м^3}{кг}$; с учетом коэффициента сжимаемости $v_{коэф} = 0,01135 \frac{м^3}{кг}$. Табличное значение $v_{таб} = 0,0113 \frac{м^3}{кг}$.

6.5. Воздушный компрессор сжимает $129 \frac{кг}{час}$ воздуха. Установлено, что при сжатии энтальпия воздуха увеличивается на $190000 \frac{кДж}{час}$, а энтальпия окружающей компрессор воды – на $10\ 000 \frac{кДж}{час}$. Пренебрегая потерями и изменением кинетической и потенциальной энергии, найти мощность привода компрессора.

Ответ: $N = 50$ кВт.

6.6. Рассчитать изменение температуры при необратимом процессе расширения реального газа, описываемого уравнением $(P + \frac{a}{v^2})(v - b) = RT$. Принять, что удельная теплоёмкость C_v не зависит от температуры. В качестве реального газа принимается диоксид углерода, для которого $C_v = 29,5 \frac{Дж}{кг К}$; $a = 0,368 \frac{м^6}{кг^2}$. Расширение осуществляется от начального объёма $v_1 = 2,2 \cdot 10^{-3} \frac{м^3}{кг}$ до конечного $v_2 = 22 \cdot 10^{-3} \frac{м^3}{кг}$.

Ответ: $\Delta T = -5,1$ К.

6.7. Резервуар объёмом 8 м³ заполнен гелием. Определить количество газа, содержащегося в резервуаре с давлением 0,5 бар и температурой –180⁰С. Задачу решить по уравнению состояния идеального и реального газов.

Ответ: $m_{ид} = 2,075$ кг; $m_{реал} = 2,070$ кг.

6.8. Воздушная холодильная машина должна обеспечить температуру в охлаждаемом помещении $t_{охл} = -5^0$ С при температуре окружающей среды $t_0 = +20^0$ С. Холодопроизводительность машины $200000 \frac{ккал}{час}$. Давление воздуха на выходе из компрессора $P_2 = 5$ бар, в холодильной камере $P_1 = 1$ бар. Определить мощность двигателя для привода машины, расход воздуха, холодильный коэффициент и количество тепла, передаваемое окружающей среде. Подсчитать холодильный коэффициент машины, работающей по циклу Карно в том же интервале температур. Представить цикл в T-S диаграмме.

Ответ: $\epsilon = 1,77$; $m = 10050$ кг; $N = 131,4$ кВт;
 $Q_1 = 1210725,5 \frac{кДж}{час}$; $\epsilon_{Карно} = 10,72$.

6.9. Компрессор холодильной установки всасывает пар фреона – 12 при $t_1 = -15^{\circ}\text{C}$ и степени сухости $x_1 = 0,972$ и изотермически сжимает его до давления, при котором степень сухости становится равной $x_2 = 1$. Из компрессора фреон – 12 поступает в конденсатор, где охлаждается водой с температурой на входе $t_{1в} = +12^{\circ}\text{C}$, а на выходе $t_{2в} = +20^{\circ}\text{C}$. В дроссельном вентиле жидкий фреон 12 дросселируется до состояния влажного насыщенного пара, после чего направляется в испаритель, из которого выходит со степенью сухости x_1 . Теплота, необходимая для испарения фреона – 12 подводится из охлаждаемой камеры. Определить теоретическую мощность двигателя холодильной установки, часовой расход фреона – 12 и охлаждающей воды, если холодопроизводительность установки $Q_0 = 200 \frac{\text{МДж}}{\text{час}}$.

$$\text{Ответ: } N_{\text{теор}} = 14,258 \text{ кВт}; m_{\text{ф}} = 1556,4 \frac{\text{кг}}{\text{час}}.$$

7. Дифференциальные уравнения термодинамики

7.1. Доказать равенство:

$$\left(\frac{\partial T}{\partial P}\right)_s = \frac{T}{C_p} \left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_p$$

7.2. Доказать равенство:

$$C_p = T \left(\frac{\partial S}{\partial T}\right)_p; \quad C_v = T \left(\frac{\partial S}{\partial T}\right)_v$$

7.3. Доказать равенство:

$$C_v = -T \left(\frac{\partial^2 P}{\partial T^2}\right)_v$$

7.4. Вывести уравнение адиабаты при P и T независимых переменных в дифференциальной форме.

$$\text{Ответ: } dT - \frac{T \left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_p dP}{C_p} = 0; \quad dT + \frac{\left[\left(\frac{\partial h}{\partial T}\right)_v - v\right]_T dP}{C_p} = 0.$$

8. Водяной пар, влажный воздух, циклы паротурбинных установок

8.1. Температура насыщенного пара при некотором давлении равна $305,5^{\circ}\text{C}$. Определить давление этого пара с помощью таблицы.

$$\text{Ответ: } P = 92,14 \text{ бар.}$$

8.2. Используя таблицу для водяного пара, определить для сухого пара внешнюю Ψ и внутреннюю φ теплоту парообразования при $P_{\text{абс}} = 5 \text{ бар}$.

$$\text{Ответ: } \Psi = 186 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}; \varphi = 1923 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}.$$

8.3. Пользуясь таблицами для водяного пара найти удельный объём энтальпию, внутреннюю энергию и энтропию влажного пара при $P_{абс} = 5$ бар и влажности 15%.

$$\text{Ответ: } v_x = 0,3185 \frac{\text{м}^3}{\text{кг}}; \quad h_x = 4541,65 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}; \quad u_x = 4381,65 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}};$$

$$s_x = 6,07 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}.$$

8.4. В сосуде шарообразной формы в верхней половине находится сухой насыщенный пар, в нижней – вода в состоянии насыщения. Во сколько раз масса воды больше массы пара, если внутреннее давление сосуда 1 м, а давление внутри него $P_{абс} = 20$ бар? Решить, пользуясь таблицами.

Ответ: в 84,63 раза.

8.5. Один килограмм влажного пара при давлении $P_{1 абс} = 30$ бар и влажности 10% расширяется при неизменной температуре до $P_{2 абс} = 2$ бар. Определить работу процесса. Решить с помощью h-s диаграммы.

$$\text{Ответ: } l = 660 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}.$$

8.6. Процесс происходит при неизменной влажности 20% от начального давления $P_{1 абс} = 1$ бар до конечного $P_{2 абс} = 20$ бар. Найти по величине и знаку тепло, изменение внутренней энергии и работу процесса. Решить с помощью h-s диаграммы.

$$\text{Ответ: } q = -128,7 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}; \quad \Delta u = 118,7 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}; \quad l = -247,4 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}.$$

8.7. Влажный пар с $P_{1 абс} = 30$ бар и при $x=0,85$ дросселируется до $P_{2 абс} = 5$ бар, после чего направляется на производство. Найти состояние, удельный объём, степень сухости и температуру пара после дросселирования. Решить с помощью h-s диаграммы.

$$\text{Ответ: } v = 0,3372 \frac{\text{м}^3}{\text{кг}}; \quad x = 0,9; \quad T=425 \text{ К}.$$

8.8. Влажный пар с давлением $P_{1 абс} = 50$ бар и $x = 0,98$ дросселируется до $P_{2 абс} = 1$ бар. Найти состояние пара после дросселирования и интегральный дроссель – эффект по величине и знаку. Решить с помощью h-s диаграммы.

Ответ: состояние пара – перегретое; $\Delta t = 165^\circ\text{C}$.

Интегральный дроссель-эффект положителен.

8.9. Найти удельный объём, температуру, энтальпию, энтропию и внутреннюю энергию влажного пара, имеющего давление $P_{абс} = 20$ бар и влажность 20% Решить с помощью h-s диаграммы.

$$\text{Ответ: } h = 2420 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}; \quad v = 0,08 \frac{\text{м}^3}{\text{кг}}; \quad S=5,56 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}; \quad u = 2260 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}};$$

$$t = 213^\circ\text{C}.$$

8.10. Для перегретого пара с давлением $P_{абс} = 50$ бар и температурой перегрева 400°C найти удельный объём, внутреннюю энергию, энтальпию и энтропию пара. Решить с помощью h-s диаграммы.

Ответ: $v = 0,055 \frac{\text{м}^3}{\text{кг}}$;

$$u = 2920 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}; s = 6,655 \frac{\text{кДж}}{\text{кгК}}; h = 3200 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}.$$

8.11. При давлении $P_{абс} = 50$ бар энтальпия пара равна $3160 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$. Определить энтропию, температуру и внутреннюю энергию пара. Решить с помощью h-s диаграммы.

Ответ: $t = 388^{\circ}\text{C}$; $v = 0,06 \frac{\text{м}^3}{\text{кг}}$; $s = 6,52 \frac{\text{кДж}}{\text{кгК}}$; $u = 2860 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}$.

8.12. Найти затраченное тепло, работу и изменение внутренней энергии в процессе $P_{абс} = 30$ бар = const, если в начале процесса пар имел влажность 11%, а в конце стал перегретым и его температуру повысилась до 500°C . Какой процент тепла был затрачен на первоначальном участке процесса, в конце которого пар превратился в сухой насыщенный? Решить с помощью h-s диаграммы.

Ответ: $q = 850 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$; $l = 167 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$; $\Delta u = 683 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$. Для

превращения пара в сухой насыщенный было затрачено 25% тепла.

8.13. Перегретый пар с $P_{1 абс} = 20$ бар и $t_1 = 400^{\circ}\text{C}$ сначала расширяется по адиабате до сухого насыщенного состояния, а затем охлаждается до температуры 115°C при неизменном объёме. Определить для этого процесса теплообмен с внешней средой, работу процесса и располагаемую работу. Решить с помощью h-s диаграммы.

Ответ: $q = -241,1 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$; $l = 407 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$; $l_0 = 554,9 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$.

8.14. При изотермическом сжатии 1 кг перегретого пара, имеющего вначале $P_{1 абс} = 3$ бар и $t_1 = 300^{\circ}\text{C}$, отводится 20 кДж тепла. Каково давление в конце сжатия и на сколько уменьшилась внутренняя энергия пара? Найти затраченную работу на сжатие пара. Решить с помощью h-s диаграммы.

Ответ: $P_2 = 9,8$ бар; $\Delta u = -294,4 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$; $l = -2924 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$.

8.15. Адиабатное расширение сухого (насыщенного) пара происходит от $P_{1 абс} = 10$ бар до $P_{2 абс} = 0,5$ бар. Найти средний показатель кривой процесса и сравнить его с часто применяемым для сухого пара значением $K = 1,135$. Решить с помощью h-s диаграммы. Решить с помощью h-s диаграммы.

Ответ: $K = 1,186 > K = 1,135$.

8.16. Котельная производит пар с давлением $P_{1 абс} = 15$ бар. Каков должен быть перегрев пара, если цех предприятия должен получить пар с давлением $P_{2 абс} = 2$ бар и температуре 200°C ?. Найти значения энтропии в

обоих случаях Снижение давления с 15 до 2 бар происходит в редуционном клапане. Решить с помощью h-s диаграммы.

$$\text{Ответ: } t = 230^{\circ}\text{C}; s_1 = 6,5 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}\cdot\text{К}}; s_2 = 7,45 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}\cdot\text{К}}.$$

8.17. Сравнить удельные расходы пара двух турбин одинаковых начальных параметров $P_{1\text{ а6с}} = 130$ бар, $t_1 = 565^{\circ}\text{C}$, при одинаковых давлениях в конденсаторе $P_{2\text{ а6с}} = 0,035$ бар, если одна из них имеет промежуточный перегрев при $P_{\text{п а6с}} = 30$ бар до начальной температуры, считая процессы расширения адиабатными. Решить с помощью h-s диаграммы.

$$\text{Ответ: } d_1 = 0,645 \frac{\text{кг}}{\text{мДж}}; d_2 = 0,746 \frac{\text{кг}}{\text{мДж}}.$$

8.18. Во сколько раз увеличится термодинамический КПД теоретического паросилового цикла и работа 1 кг пара, если от работы турбины на выпуске в атмосферу перейти к работе на вакуум 94%. Начальные параметры пара $P_{1\text{ а6с}} = 40$ бар $t_1 = 380^{\circ}\text{C}$. При работе на выпуск котельная установка питается водой с температурой $t_2 = 55^{\circ}\text{C}$, барометрическое давление $P_2 = 0,945$ бар. Решить с помощью h-s диаграммы.

$$\text{Ответ: } \frac{\eta'_f}{\eta_t} = 1,508; \frac{l'_c}{l_c} = 1,508.$$

8.19. В паровом поршневом идеальном компрессоре сжимается сухой насыщенный пар с начальном давлением $P_{1\text{ а6с}} = 30$ бар до конечного давления $P_{2\text{ а6с}} = 100$ бар. Какая затрата работы на сжатие 5 кг пара, если сжатие происходит по адиабате. Определить объём цилиндра компрессора. Найти среднее индикаторное давление. Решить с помощью h-s диаграммы.

$$\text{Ответ: } l = 3405 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}; V = 0,335 \text{ м}^3; P_1 = 59,7 \text{ бар}.$$

9. Процессы изменения состояния газа в открытой системе. Циклы газотурбинных и реактивных установок

9.1. В противоточном теплообменнике воздух охлаждается от $t_1 = 240^{\circ}\text{C}$ до $t_2 = 60^{\circ}\text{C}$. Охлаждение происходит за счёт воды, которая нагревается от температуры $t_3 = 15^{\circ}\text{C}$ до $t_4 = 32^{\circ}\text{C}$. Определить изменение энтропии системы вода - воздух в течение 1 часа. Расход охлаждающей воды равен $m = 250 \frac{\text{кг}}{\text{ч}}$. Теплоёмкость воздуха принять постоянной, равной $1,0598 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}\cdot\text{К}}$. Теплоёмкость воды принять постоянной и равной $4,416 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}\cdot\text{К}}$. Принять, что теплообменник не имеет тепловых потерь и гидравлических сопротивлений.

$$\text{Ответ: } \Delta s = 20,94 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}\cdot\text{К}}.$$

9.2. Определить потерю эксергии, происходящую в процессе конденсации водяного пара в конденсаторе паровой турбины. Процесс конденсации пара происходит при давлении $P = 0,04$ бар, температура конденсации при этом равна 29°C . Тепло, выделяющееся в процессе

конденсации пара, передается к окружающей среде, температура которой равна 10°C . Расчет произвести на 1 кг конденсирующегося пара. Считать, что в конденсатор поступает сухой насыщенный пар. Гидравлическими потерями конденсатора пренебречь.

$$\text{Ответ: } \Delta ex = 153,2 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}\cdot\text{К}}.$$

9.3. В трубе течёт пар с начальной скоростью $c_1 = 300 \frac{\text{м}}{\text{с}}$. Его параметры $P_1 = 15 \text{ бар}$, $t_1 = 300^{\circ}\text{C}$. Определить, на сколько действительная температура отличается от температуры пара, фиксируемой термометром, если считать, что термометр показывает температуру торможения.

$$\text{Ответ: } \Delta t = 19^{\circ}\text{C}.$$

9.4. Определить скорость струи пара на выходе из сопла Лавалья и потерю кинетической энергии вследствие трения, если состояние пара на входе в сопло определяется давлением $P_1 = 60 \text{ бар}$ и температурой $t_1 = 450^{\circ}\text{C}$. Давление на выходе из сопла $P_2 = 12 \text{ бар}$. Скоростной коэффициент сопла $\varphi = 0,94$, начальная скорость $c_1 = 200 \frac{\text{м}}{\text{с}}$.

$$\text{Ответ: } c_2 = 879,75 \frac{\text{м}}{\text{с}}; h_{\text{тр}} = 50977,9 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}.$$

9.5. Определить термический КПД простейшей газотурбинной установки, работающей по циклу с подводом тепла при $p = \text{const}$ при степенях давления: 1. $\beta_1 = 5$; 2. $\beta_2 = 10$; $\beta_3 = 20$. Считать, что рабочее тело обладает свойствами воздуха с показателем адиабаты $k = 1,4$.

$$\text{Ответ: } \eta_{t_1} = 0,368; \eta_{t_2} = 0,482; \eta_{t_3} = 0,575.$$

9.6. В турбину газотурбинной установки входит гелий с параметрами $P_3 = 1 \cdot 10^6 \frac{\text{Н}}{\text{м}^2}$ и $t_3 = 700^{\circ}\text{C}$. Внутренний относительный КПД турбины равен 0,86; давление за турбиной $P_4 = 1 \cdot 10^5 \frac{\text{Н}}{\text{м}^2}$. Определить температуру гелия на выходе из турбины. Определить массовый часовой расход гелия D , если действительная мощность турбины равна $N_T = 40 \text{ мВт}$.

$$\text{Ответ: } t_4 = 116^{\circ}\text{C}; D = 67,3 \cdot 10^3 \frac{\text{кг}}{\text{ч}}.$$

9.7. В стенке резервуара, из которого непрерывно воздушным насосом откачивается воздух, просверлено отверстие цилиндрическим сверлом, диаметром 5 мм, благодаря чему воздух втекает в резервуар из атмосферы. Определить скорость и количество втекающего за 1 минуту, если:

а) барометрическое давление 1 бар, а температура наружного воздуха 20°C .

б) коэффициенты сужения и расхода просверленного отверстия равны соответственно 0,8 и 0,72.

с) в резервуаре насосом поддерживается разрежение $80 \frac{\text{кН}}{\text{м}^2}$.

Ответ: $w = 190,6 \frac{м}{с}$; $G = 0,002 \frac{кг}{с}$.

9.8. Сухой насыщенный пар с $P_{1\text{ абс}} = 15$ бар истекает через суживающееся сопло в среду с давлением $P_{2\text{ абс}} = 0,04$ бар. Определить теоретическую скорость истечения и секундный массовый расход пара через сопло, если диаметр устья $d = 5$ мм.

Ответ: $w_{\text{крит}} = 455,2 \frac{м}{с}$; $G = 0,0425 \frac{кг}{с}$.

9.9. Перегретый пар с $P_{1\text{ абс}} = 25$ бар и $t_1 = 450^{\circ}\text{C}$ истекает через сопло в среду с $P_{2\text{ абс}} = 3$ бар. Определить форму сопла для получения максимально возможной скорости истечения, найти эту скорость, задавшись скоростным коэффициентом сопла $\varphi = 0,9$, а также секундный массовый расход пара через сопло, если диаметр сечения, определяющего расход, $d = 5$ мм. Решить аналитически и графически с использованием $h - s$ диаграммы.

Ответ: $w = 952,4 \frac{м}{с}$; $G = 0,049 \frac{кг}{с}$; $w_{\text{кр}} = 576,3 \frac{м}{с}$;

$P_{\text{кр}} = 13,65$ бар.

9.10. В камере сгорания ЖРД сжигается смесь 98% азотной кислоты с керосином при давлении $P_{\text{абс}} = 50$ бар. Температура в камере $T = 3000$ К. Продукты сгорания истекают через расширяющееся сопло с отношением $\frac{C_p}{C_v} = 1,22 = \kappa$, газовая постоянная $R = 0,334 \frac{кДж}{кг \cdot К}$. Полагая, что двигатель работает у земли на расчётном режиме, то есть, давление газа на выходе из сопла равно давлению окружающей среды $P_{0\text{ абс}} = 1$ бар, определить скорость продуктов сгорания на выходе из сопла.

Ответ: $w = 2369,2 \frac{м}{с}$.

9.11. ЖРД работает на расчетном режиме, давление в камере сгорания $P_{\text{абс}} = 36$ бар, температура равна 3200 К, давление окружающей среды $P_{0\text{ абс}} = 0,9$ бар, $\kappa = 1,41$, $R = 0,35 \frac{кДж}{кг \cdot К}$. Определить скорость продуктов сгорания в устье расширяющегося сопла.

Ответ: $w = 2251,2 \frac{м}{с}$.

9.12. Определить, на сколько повысится температура на лобовой поверхности метеорита при входе его в плотные слои атмосферы со скоростью $7500 \frac{м}{с}$. Для воздуха $C_p = 1,005 \frac{кДж}{кг \cdot К}$. Процесс торможения принять адиабатным.

Ответ: $\Delta T = 27985$ К.

9.13. Самолёт с прямоточным воздушно-реактивным двигателем летит со скоростью $400 \frac{м}{с}$ при температуре воздуха $t = -20^{\circ}\text{C}$. Приняв для воздуха $\kappa = 1,41$, $R = 287 \frac{дж}{кг \cdot К}$, определить степень повышения давления в диффузоре ВРД. Процесс торможения считать адиабатным.

Ответ: $\frac{P_2}{P_1} = 2,6$.

9.14. Определить мощность ГТУ, работающей с подводом теплоты при $v = \text{const}$ термический КПД цикла и расход топлива, если $P_1 = 0,1$ МПа, $t_1 = 17^\circ\text{C}$, $P_2 = 0,82$ МПа, мощность, развиваемая турбиной, $N_T = 5000$ кВт, расход воздуха $M_B = 8,3 \frac{\text{кг}}{\text{с}}$, теплотворная способность топлива $Q_p^H = 40000 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$, рабочее тело имеет физические свойства сухого воздуха.

Ответ: $N_{\text{ГТУ}} = 1670$ кВт; $\eta_t = 0,36$; $B = 416,6 \frac{\text{кг}}{\text{ч}}$.

10. Теплопроводность

10.1. Определить тепловой поток, проходящий через стенку поверхности, если её толщина 8 мм, площадь поверхности $0,6 \text{ м}^2$, температура внутри поверхности 75°C , снаружи поверхности 65°C , коэффициент теплопроводности материала равен $56 \frac{\text{Вт}}{\text{м}\cdot\text{К}}$.

Ответ: $\Phi = 42000$ Вт.

10.2. Сколько необходимо сжечь угля в печи, КПД которой 70%, чтобы восполнить потерю тепла в сутки через кирпичную стену, имеющую площадь $F = 20 \text{ м}^2$, толщину $\delta = 0,2 \text{ м}$, коэффициент теплопроводности $\lambda = 0,475 \frac{\text{Вт}}{\text{м}\cdot\text{К}}$, если температуры внутренней и внешней стенок равны соответственно $t_1 = 20^\circ\text{C}$, $t_2 = 10^\circ$ и являются изотермическими. Низшая удельная теплота сгорания угля $H_u = 18000 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$.

Ответ: $G = 9,77$ кг.

10.3. Определить потерю тепла через кирпичную стенку длиной 5 м, высотой 3 м и толщиной 250 мм, если на поверхности стенки поддерживается температура $t_1 = 20^\circ\text{C}$ и $t_2 = -30^\circ\text{C}$. Коэффициент теплопроводности кирпича равен $0,6 \frac{\text{Вт}}{\text{м}\cdot\text{К}}$.

Ответ: $\Phi = 1800$ Вт.

10.4. Определить значение коэффициента теплопроводности материала стенки, если при её толщине, равной 30 мм и $\Delta t = 30^\circ\text{C}$ плотность теплового потока равна $100 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$.

Ответ: $\lambda = 0,1 \frac{\text{Вт}}{\text{м}\cdot\text{К}}$.

10.5. Во сколько раз уменьшится плотность теплового потока через плоскую алюминиевую стенку толщиной 15 мм после нанесения на нее теплоизоляционного покрытия из окиси циркония толщиной 0,3 мм, если температуры на поверхностях поддерживаются постоянными и равными 400 и

200⁰С. Коэффициент теплопроводности окиси циркония принять равным $1,15 \frac{\text{Вт}}{\text{м}\cdot\text{К}}$, а алюминия $262 \frac{\text{Вт}}{\text{м}\cdot\text{К}}$.

Ответ: в 5,56 раза.

10.6. Определить тепловой поток, передаваемый через стенку чугунного цилиндра, внутренний диаметр которого 100 мм, длина 120 мм и толщина стенки 6 мм, если температура внутренних поверхностей равна 150⁰С, а наружной 100⁰С. Принять коэффициент теплопроводности для чугуна равным $56 \frac{\text{Вт}}{\text{м}\cdot\text{К}}$.

Ответ: $\Phi = 18,6 \text{ кВт}$.

10.7. Определить плотность теплового потока через плоскую шамотную стенку толщиной 0,5м и найти действительное распределение температуры, если $t_1 = 1000^0\text{C}$, $t_2 = 0^0\text{C}$, $\lambda = 1,0(1 + 0,001 \cdot T) \frac{\text{Вт}}{\text{м}\cdot\text{К}}$.

Ответ: $q = 3000 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$

10.8. Вычислить плотность теплового потока топочной камеры котла толщиной 625 мм. Стенка состоит из трёх слоёв: одного шамотного кирпича, толщиной $\delta_1 = 250 \text{ мм}$, изоляционной прослойки из мелкого шлака толщиной $\delta_2 = 125 \text{ мм}$ и одного красного кирпича толщиной $\delta_3 = 250 \text{ мм}$. Температура внутренней поверхности топочной камеры $t'_{\text{ст}} = 1527^0\text{C}$, а наружной $t''_{\text{ст}} = 47^0\text{C}$. Теплопроводности: шамотного кирпича $\lambda_1 = 1,28 \frac{\text{Вт}}{\text{м}\cdot\text{К}}$, изоляционной прослойки $\lambda_2 = 0,15 \frac{\text{Вт}}{\text{м}\cdot\text{К}}$, красного кирпича $\lambda_3 = 0,8 \frac{\text{Вт}}{\text{м}\cdot\text{К}}$. Как изменится плотность теплового потока через стенку, если изоляционную прослойку заменить красным кирпичом? На сколько изменится плотность теплового потока в процентах без изоляционной прослойки? Определить температуру между слоями.

Ответ: $q = 1103,5 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$, $\Delta q = 50,48\%$,
 $t'_{\text{сл}} = 1311,5^0\text{C}$, $t''_{\text{сл}} = 392^0\text{C}$, $t_{\text{сл}}^{\text{к}} = 1091^0\text{C}$

Изоляционная прослойка снижает тепловые потери. Кроме того, если вместо неё будет красный кирпич, то он будет разрушаться, так как выдерживает температуру не более 900⁰С.

10.9. Стальная труба, отношение диаметров которой $\frac{d_1}{d_2} = \frac{200}{220}$ мм покрыта двухслойной изоляцией. Толщина первого слоя $\lambda_2 = 0,2 \frac{\text{Вт}}{\text{м}\cdot\text{К}}$ и второго $\lambda_2 = 80$ мм с $\lambda_3 = 0,1 \frac{\text{Вт}}{\text{м}\cdot\text{К}}$. Температура внутренней поверхности трубы $t'_{\text{ст}} = 327^0\text{C}$ и наружной $t''_{\text{ст}} = 47^0\text{C}$. Определить потери теплоты через изоляцию с 1 метра длины трубы и температуру на границе соприкосновения отдельных слоёв.

$$\text{Ответ: } q_l = 296,5 \frac{\text{Вт}}{\text{м}}, \quad t'_{\text{сл}} = 326,9^\circ\text{С},$$

$$t''_{\text{сл}} = 238,25^\circ\text{С}.$$

10.10. Шаровой реактор, внутренний диаметр которого равен 1 м, имеет общую толщину стенки и слоя изоляции 65 мм с эквивалентным коэффициентом теплопроводности $1,2 \frac{\text{Вт}}{\text{м}\cdot\text{К}}$. Определить плотность теплового потока, проходящего через внутреннюю и наружную стенки реактора, если температуры внутренней и внешней поверхностей соответственно равны 160 и 60°С .

$$\text{Ответ: } q_1 = 2086,1 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}, q_2 = 1633,7 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}.$$

10.11. Стенка камеры сгорания реактивного двигателя с внутренним диаметром $d_{\text{в}} = 200$ мм и наружным диаметром $d_{\text{н}} = 206$ мм покрыта с внутренней стороны слоем тугоплавкого материала толщиной 1 мм. Коэффициенты теплопроводности стенки камеры сгорания и покрытия соответственно равны 42 и $1,4 \frac{\text{Вт}}{\text{м}\cdot\text{К}}$, температуры на внутренней и наружной поверхности стенок равны 2500 и 500 К. Определить плотность теплового потока на единицу длины стенки и температуру поверхности стенки в зоне контакта, если термическое сопротивление контакта равно $0,8 \cdot 10^{-3} \frac{\text{МК}}{\text{Вт}}$.

$$\text{Ответ: } q_l = 1446572,6 \frac{\text{Вт}}{\text{м}}, T = 846,4 \text{ К}$$

10.12. Электрический кабель, диаметром $d = 40$ мм зарытый в сухой грунт ($\lambda = 0,29 \frac{\text{Вт}}{\text{м}\cdot\text{К}}$) на глубину $h = 1,5$ м, выделяет тепло $q = 29 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$ на метр квадратный. Определить максимальную температуру на поверхности кабеля, если температура поверхности земли $t_0 = 15^\circ\text{С}$.

$$\text{Ответ: } t = 78,5^\circ\text{С}.$$

10.13. При работе печи с обмуровкой, выполненной из шамотного [$\lambda_1 = 0,84 \left(1 + 0,695 \frac{t}{1000}\right) \frac{\text{Вт}}{\text{м}\cdot\text{К}}$, $\delta_1 = 0,24\text{м}$] и красного [$\lambda_{\text{к}} = 0,70 \frac{\text{Вт}}{\text{м}\cdot\text{К}}$] кирпича, температуры на внутренних поверхностях слоёв составляли t_1 и $t_{\text{к}} = 850^\circ\text{С}$. После замены части слоя красного кирпича (толщиной δ_3) промежуточной засыпкой из диатомовой крошки [$\lambda_2 = 0,113(1 + 0,002 \cdot t) \frac{\text{Вт}}{\text{м}\cdot\text{К}}$, $\delta_2 = 0,092\text{м}$] - без изменения t_1 и плотности теплового потока q - получено, что $t_{\text{к}} = 430^\circ\text{С}$. Определить t_1, q и уменьшение толщины обмуровки $\Delta\delta$.

$$\text{Ответ: } q = -1176 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}, t_1 = 1052^\circ\text{С}, \Delta\delta = 0,58 \text{ м}.$$

10.14. Электрический провод с сопротивлением $R = 10 \frac{\text{Ом}}{\text{м}}$ заключён в цилиндрическую цементную трубу с $\lambda = 0,159 \text{ Вт}/\text{м}\cdot\text{К}$. Внешний и внутренний радиусы трубы: $r_1 = 10$ мм; $r_2 = 5$ мм. По проводу течёт электрический ток $j = 10$ а, создавая на внутренней поверхности изоляции постоянную

температуру в 150°C . Определить: количество теплоты, рассеиваемой с 1 м трубы; средний коэффициент теплопроводности в вычисленном интервале температур.

$$\text{Ответ: } \Phi = 810 \text{ Вт}, \lambda_{\text{ср}} = 0,687 \frac{\text{Вт}}{\text{м}\cdot\text{К}}.$$

10.15. Стальная пластина толщиной $2b = 20$ мм, нагретая до температуры $t_0 = 140^{\circ}\text{C}$ находится в воздушной среде с температурой $t_{\text{ж}} = 15^{\circ}\text{C}$. Определить температуру в центре и на поверхности пластины, а также потерю тепла (в процентном отношении) через $\tau = 20$ мин после начала охлаждения. Коэффициенты теплопроводности и температуропроводности для стали равны соответственно $\lambda = 42 \frac{\text{Вт}}{\text{м}\cdot\text{К}}$ и $a = 1,18 \cdot 10^{-6} \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2\cdot\text{К}}$. Коэффициент теплоотдачи от поверхности пластины к воздуху $\alpha = 65 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2\cdot\text{К}}$.

$$\text{Ответ: } t_{\text{п}} = 115^{\circ}\text{C}; t_{\text{ц}} = 117,5^{\circ}\text{C}; \delta Q = 19\%.$$

11. Конвективный теплообмен

11.1. По трубе диаметром $d = 16$ мм и длиной $l = 2,1$ м течет горячая вода, отдающая теплоту через стенку воздуху, омывающему трубу снаружи. Расход воды через трубу $G = 0,0091 \frac{\text{кг}}{\text{с}}$; температура воды на входе $t_{\text{ж}1} = 90^{\circ}\text{C}$, на выходе $t_{\text{ж}2} = 30^{\circ}\text{C}$, средняя температура стенки трубы $t_{\text{ст}} = 20^{\circ}\text{C}$.

Вычислить значение критериев Нуссельта $N_{\text{и}}$, Рейнольдса R_e и Грасгофа G_r , приняв в качестве определяющей температуры среднеарифметическую температуру жидкости. Коэффициент теплоотдачи отнести к средней арифметической разности температур между водой и стенкой.

$$\text{Ответ: } N_{\text{и}} = 10,6; R_e = 1549,8; G_r = 24165,4.$$

11.2. Плоская пластина толщиной 0,5 м и длиной 0,5 м обдувается воздухом со скоростью $4 \frac{\text{м}}{\text{с}}$. Определить коэффициент теплоотдачи и тепловой поток, если температура стенки 100°C , а температура воздуха 40°C . При решении задачи использовать источник [3] или табл. 1 приложения.

$$\text{Ответ: } \alpha = 20,1 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2\cdot\text{К}}; \Phi = 302 \text{ Вт}.$$

11.3. Гладкая плита шириной $b = 1$ м и длиной $l = 1,2$ м обдувается воздухом со скоростью $w = 0,4 \frac{\text{м}}{\text{с}}$. Определить коэффициент теплоотдачи и тепловой поток, если температуры поверхности плиты $t_{\text{п}} = 60^{\circ}$ и воздуха $t_{\text{в}} = 20^{\circ}\text{C}$.

$$\text{Ответ: } \alpha = 2,77 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2\cdot\text{К}}; \Phi = 133 \text{ Вт}.$$

11.4. Для условия задачи 11.3 определить средний коэффициент теплоотдачи и тепловой поток, приняв, что плита омывается водой.

$$\text{Ответ: } \alpha = 1849,47 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2\cdot\text{К}}; \Phi = 88774,7 \text{ Вт}.$$

11.5. Воздушный поток движется по прямому трубопроводу со скоростью $15 \frac{\text{м}}{\text{с}}$. Определить тепловой поток от воздуха к стенке, если средняя температура воздуха 100°C , а стенки трубопровода 40°C . Диаметр трубопровода $0,08 \text{ м}$, а длина его 1 м .

Ответ: $\Phi = 708 \text{ Вт}$.

11.6. По трубе прямоугольного сечения $b = 200 \cdot 600 \text{ мм}$ и длиной 3 м движется воздух со скоростью $12 \frac{\text{м}}{\text{с}}$. Средние температуры по длине трубы составляют: воздуха 300°C , стенки 100°C . Определить коэффициент теплоотдачи α от воздуха к стенке трубы и тепловой поток.

Ответ: $\alpha = 24 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$; $\Phi = 13565 \text{ Вт}$.

11.7. Определить коэффициент теплоотдачи α и количество передаваемой теплоты при течении воды в горизонтальной трубе диаметром $d = 10 \text{ мм}$ и длиной $l = 1,2$, если средние по длине температуры стенки трубы и воды соответственно равны $t_{\text{ст}} = 60^{\circ}\text{C}$ и $t_{\text{ж}} = 30^{\circ}\text{C}$, а расход воды $G = 7 \cdot 10^{-3} \frac{\text{кг}}{\text{с}}$.

Ответ: $\alpha = 3901,2 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$; $Q = 763,9 \text{ кДж}$.

11.8. Определить, во сколько раз изменится средний коэффициент теплоотдачи при свободной конвекции (ламинарный режим течения) трубопровода диаметром $0,5 \text{ м}$ и длиной 2 м к окружающему воздуху с изменением его горизонтального расположения на вертикальное при прочих равных условиях.

Ответ: $\frac{\alpha_{\text{в}}}{\alpha_{\text{г}}} = 2,83$.

11.9. По медной тонкостенной трубе диаметром 20 мм и длиной $0,5 \text{ м}$, обдуваемой поперечным потоком воздуха с температурой 40°C , движется вода с температурой 100°C . Определить средний коэффициент теплоотдачи α от трубы к воздуху, если скорость его движения $W = 10 \frac{\text{м}}{\text{с}}$.

Ответ: $\alpha = 36,9 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$.

11.10. Для условия задачи 11.9 определить средний коэффициент теплоотдачи трубы, если угол между направлением движения воздушного потока и осью трубы равен 40° .

Ответ: $\alpha_{\phi} = 28,4 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$.

11.11. Определить коэффициент теплоотдачи для шести рядного коридорного пучка труб диаметром 20 мм при движении в нем воздуха, если средняя температура воздуха 150°C , а средняя скорость его движения в узком сечении $15 \frac{\text{м}}{\text{с}}$.

Ответ: $\alpha = 129,9 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$.

11.12. Определить коэффициент теплоотдачи для десяти рядного шахматного пучка труб диаметром 25 мм при течении в нем воздуха, если средняя температура последнего 200°C , а средняя скорость движения в узком сечении $10 \frac{\text{м}}{\text{с}}$.

$$\text{Ответ: } \alpha = 105,3 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}.$$

11.13. Определить коэффициенты теплоотдачи и температурные напоры при пузырьковом кипении воды для давлений 12 бар и 120 бар при плотности теплового потока $q = 1,8 \cdot 10^6 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$.

$$\text{Ответ: } \alpha_1 = 106463 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}; \alpha_2 = 1227235 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}};$$

$$\Delta t_1 = 0,8^{\circ}\text{C}; \Delta t_2 = 1,5^{\circ}\text{C}.$$

11.14. Определить наибольшую плотность теплового потока, проходящего через поверхность нагрева при пузырьковом режиме кипения воды в условиях большого объема при температуре 180°C .

$$\text{Ответ: } q_{\text{кр}} = 47174,7 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}.$$

11.15. Определить коэффициент теплоотдачи, тепловой поток и количество выпадающего конденсата при температуре насыщения 50°C (поверхности горизонтальной грубы длиной 1,6 м, диаметром 22 мм, температура поверхности 30°C).

$$\text{Ответ: } \alpha_1 = 8603 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}; \Phi = 19017,4 \text{ Вт};$$

$$G = 28,74 \frac{\text{кг}}{\text{ч}}.$$

12. Тепловое излучение

12.1. Стальная заготовка с начальной температурой 27°C помещена в печь, температура стенок которой 927°C . Определить величину плотности теплового потока, воспринимаемого заготовкой в начальный период за счет лучистой энергии, если отношение площадей поверхностей заготовки и печи равно $1/30$, степени черноты заготовки и стенок печи соответственно равны 0,7 и 0,85.

$$\text{Ответ: } q = 81,628 \frac{\text{кВт}}{\text{м}^2}.$$

12.2. Какой будет плотность теплового потока, если в условии задачи 12.1 принять отношение площадей поверхностей заготовки и печи равным нулю?

$$\text{Ответ: } q = 81,979 \frac{\text{кВт}}{\text{м}^2}.$$

12.3. В сосуд Дьюара налита жидкость с температурой 87°C . Степень черноты посеребренных стенок сосуда равна 0,02. Температура внешней стенки

сосуда и окружающей среды равны $17\text{ }^{\circ}\text{C}$, а температура внутренней стенки равна температуре жидкости. Определить толщину изоляционного слоя, состоящего из шерстяного войлока с коэффициентом теплопроводности $0,048\text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$, которым можно заменить посеребренные стенки при условии неизменности теплоизоляционных свойств сосуда.

Ответ: $\delta = 0,603\text{ м}$.

12.4. Определить потери тепловой энергии за счет лучеиспускания паропроводом без тепловой изоляции, проходящим внутри помещения. Наружный диаметр паропровода 150 мм , длина 100 м , температура наружной поверхности $127\text{ }^{\circ}\text{C}$, температура воздуха в помещении $27\text{ }^{\circ}\text{C}$. Степень черноты материала трубы равна $0,8$.

Ответ: $\Phi = 37,39\text{ Вт}$.

12.5. Для условий задачи 12.4 определить суммарный коэффициент лучистой конвективной теплоотдачи.

Ответ: $\alpha_{\text{сум}} = 14,22\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2\cdot\text{К}}$.

12.6. Определить количество экранов, позволяющих уменьшить лучистый теплообмен между двумя плоскими параллельными пластинами в 10 раз, если степени черноты поверхностей пластин и экранов равны соответственно $0,8$ и $0,4$.

Ответ: $n = 4$.

12.7. Определить количество экранов, позволяющих уменьшить лучистый теплообмен между двумя плоскими параллельными пластинами в 10 раз, считая, что степень черноты поверхностей пластин и экранов одинакова.

Ответ: $n = 9$.

13. Теплопередача. Теплообменные аппараты

13.1. Определить плотность теплового потока, передаваемого через чугунную гладкую и оребренную стенки. Коэффициент оребрения κ_p стенки равен 10 . Толщина стенки 12 мм . Коэффициенты теплоотдачи от рабочего тела к стенке и от стенки к окружающему воздуху соответственно равны 300 и $12\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2\cdot\text{К}}$. Температуры рабочего тела и воздуха соответственно равны 150 и $40\text{ }^{\circ}\text{C}$. Коэффициент теплопроводности чугуна $57\text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$.

Ответ: $q = 1266\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2\cdot\text{К}}$; $q_p = 9261\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2\cdot\text{К}}$.

13.2. Для условий задачи 13.1 определить величину коэффициента оребрения ребристой стенки, обеспечивающего увеличение коэффициента теплопередачи в $1,3$ раза.

Ответ: $\kappa_p = 15$.

13.3. Масляно-воздушный теплообменник рассеивает 120 Вт теплоты в окружающую среду. Определить необходимое количество алюминиевых труб внутренним диаметром 10 мм и длиной 0,5 м, если коэффициент теплоотдачи от масла к стенке $350 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$, толщина стенки труб 2 мм, коэффициент теплоотдачи от стенки к воздуху $150 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$ средняя температура масла 85°C , а воздуха 30°C . Коэффициент теплопроводности алюминия принять равным $204 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$.

Ответ: $n = 76$.

13.4. В масляно-воздушном теплообменнике температура масла изменяется от 60 до 52°C , воздуха от 20 до 28°C . Определить средне логарифмический напор при прямотоке, противотоке и однократном перекрестном токе без перемешивания одного из теплоносителей и с перемешиванием обоих теплоносителей.

Ответ: $\Delta t_{\text{прям}} = 31,3^\circ\text{C}$; $\Delta t_{\text{прот}} = 32^\circ\text{C}$;

перекрестный ток без перемешивания $\Delta t = 25,6^\circ\text{C}$ и с перемешиванием $\Delta t = 32^\circ\text{C}$.

13.5. В противоточном водяном теплообменнике типа «труба в трубе» определить площадь поверхности нагрева, если горячая вода поступает с температурой 95°C и ее расход равен $12 \frac{\text{кг}}{\text{с}}$. Горячая вода движется по внутренней стальной трубе с внутренним диаметром 37 мм и внешним диаметром 40 мм. Нагреваемая вода движется по кольцевому каналу между трубами и нагревается от 20 до 45°C . Внутренний диаметр внешней трубы 54 мм. Расход нагреваемой воды составляет $1,3 \frac{\text{кг}}{\text{с}}$. Потерями теплоты от теплообмена в окружающую среду пренебречь.

Ответ: $F = 3,04 \text{ м}^2$.

13.6. В теплообменнике необходимо охладить воздух при его расходе 300 кг/ч . Начальная температура воздуха 110°C . Для охлаждения применяют воду, расход которой составляет $0,74 \frac{\text{м}^3}{\text{ч}}$ при температур 60°C . Коэффициент теплопередачи охладителя $k = 100 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$, а его поверхность $0,67 \text{ м}^2$. Определить конечные температуры теплоносителей и тепловую нагрузку охладителя при прямотоке и противотоке.

Ответ: при прямотоке $t_1'' = 83^\circ\text{C}$; $t_2'' = 62,7^\circ\text{C}$ и $Q = 2,268 \text{ кВт}$;

при противотоке $t_1'' = 78,5^\circ\text{C}$, $t_2'' = 91,5,7^\circ\text{C}$ и $Q = 26,6 \text{ кВт}$

13.7. Водовоздушный радиатор, состоящий из прямоугольных оребренных трубок с внутренним сечением $15,4 \cdot 6,4 \text{ мм}$, отводит 35 кДж теплоты в секунду. Определить необходимое количество водяных трубок при их длине $0,65 \text{ м}$, если коэффициент оребрения равен $2,18$, коэффициент теплоотдачи от

воды к стенке $2330 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$, толщина стенок 0,3 мм, коэффициент теплоотдачи от стенки к воздуху $186 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$, средние температуры воды 360 К, воздуха 310 К. Материал стенки — медь ($\lambda_{\text{м}} = 384 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$).

Ответ: $n = 100$.

13.8. Определить коэффициенты теплоотдачи в противоточном теплообменнике тепловой мощностью 100 кВт, с площадью теплопередающей поверхности 9 м^2 при среднелогарифмическом температурном напоре 5°С , если толщина стальной стенки равна 5 мм, скорость движения холодной воды $2,2 \frac{\text{м}}{\text{с}}$, а горячей $1,8 \frac{\text{м}}{\text{с}}$. Режим движения горячей и холодной воды считать турбулентным. Эквивалентные диаметры проходных сечений принять одинаковыми. Для стали коэффициент теплопроводности принять $16 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$.

Ответ: $\alpha_1 = 15807 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$; $\alpha_2 = 13462,6 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$.

13.9. Определить, во сколько раз изменится коэффициент теплопередачи в теплообменнике, у которого медные трубки заменены алюминиевыми, при коэффициентах теплоотдачи $\alpha_1 = 3500 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$ и $\alpha_2 = 150 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$. Толщина металлической стенки 1 мм, а коэффициенты теплопроводности меди и алюминия равны соответственно $\lambda_{\text{м}} = 384 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$, $\lambda_{\text{алюм}} = 204 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$.

Ответ: уменьшится на 0,1 %.

13.10. Тепловая нагрузка водовоздушного автомобильного радиатора составляет 50 кВт. Определить секундный расход воздуха, подаваемого вентилятором двигателя, если коэффициент теплопередачи теплообменника равен $350 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$, площадь поверхности охлаждения составляет 3 м^2 , температура воды на входе в радиатор и на выходе из него равна соответственно 95 и 90°С , температура воздуха на входе в радиатор 40°С .

Примечание. При определении температурного напора использовать среднеарифметическую разность температур теплоносителей. Значение $C_p = 1,005 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$.

Ответ: $G = 5,1 \frac{\text{кг}}{\text{с}}$.

13.11. Определить дополнительную тепловую нагрузку водяного радиатора дизеля при охлаждении водой выпускного коллектора (теплообменника типа «труба в трубе»). Производительность циркуляционного насоса равна $350 \frac{\text{л}}{\text{мин}}$, среднюю температуру воды принять равной 90°С при ее нагреве на 1°С .

Ответ: $\Phi = 23,7 \text{ кВт}$.

Теплоемкость воздуха

Приложение

Таблица 1

Температура, °C	Мольная теплоемкость, Дж/(кмоль·К)				Массовая теплоемкость, кДж/(кг·К)		Объемная теплоемкость, 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	29,151	20,838	1,0061	0,7193	1,3004	0,9295
200	29,676	21,361	29,299	20,984	1,0115	0,7243	1,071	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	211,474	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	32,900	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	31,962	23,547	1,0999	0,8127	1,4214	1,0505
1200	35,002	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

Теплоемкость водяного пара

Температура, t	Мольная теплоемкость, Дж/(кмоль·К)				Массовая теплоемкость, Дж/(кг·К)		Объемная теплоемкость, кДж/(м ³ ·К)	
	μC_p	μC_v	μC_{pm}	μC_{vm}	C_p	C_{vm}	C_{pm}	C_{vm}
0	33,499	25,184	33,499	25,184	1,8594	1,3980	1,4943	1,1237
100	34,055	25,740	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	26,775	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	2,3907	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	1,6299
2300	54,370	46,055	45,255	36,940	2,5121	2,0503	2,0189	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	2,0528	1,6815
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	2,0864	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	2,1135	1,7425

Теплоемкость азота

Таблица 3

Температура, °C	Мольная теплоемкость, Дж/(кмоль·К)				Массовая теплоемкость, кДж/(кг·К)		Объемная теплоемкость, кДж/(м ³ ·К)	
	μC_p	μC_v	μC_{pm}	μC_{vm}	C_p	C_{vm}	C_{pm}	C_{vm}
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	32,540	24,225	30,451	22,136	1,0869	0,7900	1,3586	0,9877
800	33,101	24,786	30,748	22,433	1,0974	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	26,109	31,577	23,262	1,1271	0,8302	1,4089	1,0279
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	28,378	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 4

Свойства воды и сухого пара

P, бар	$t_{\text{н}}^0, \text{C}$	$v', \text{м}^3/\text{кг}$	$v'', \text{м}^3/\text{кг}$	$\rho, \text{кг}/\text{м}^3$	$h', \text{кДж}/\text{кг}$	$h'', \text{кДж}/\text{кг}$	$r, \text{кДж}/\text{кг}$	$S', \text{кДж}/(\text{кг}\cdot\text{K})$	$S'', \text{кДж}/(\text{кг}\cdot\text{K})$
0,04	29,95	0,0010042	34,93	0,02863	121,33	2553,7	2432,3	0,4225	8,4737
0,05	32,89	0,0010054	28,24	0,03541	137,79	2560,9	2423,1	0,4764	8,3943
0,06	36,17	0,0010056	23,77	0,04208	151,49	2567,1	2415,6	0,5209	8,3297
0,08	41,53	0,0010085	18,13	0,05516	173,89	2576,4	2402,5	0,5919	8,2263
0,10	45,82	0,0010102	14,70	0,06805	191,84	2583,9	2392,1	0,6496	8,1494
0,14	52,57	0,0010132	10,69	0,09353	220,05	2596,1	2376,0	0,7368	8,0305
0,18	57,82	0,0010159	8,448	0,1184	242,03	2605,4	2363,3	0,8040	7,9445
0,20	60,08	0,0010171	7,652	0,1307	251,48	2609,2	2357,7	0,8324	7,9075
0,25	64,99	0,0010198	6,201	0,1613	272,03	2617,6	2345,5	0,8934	7,8300
0,30	69,12	0,0010223	5,232	0,1911	289,30	2624,6	2335,3	0,9441	7,7673
0,40	75,87	0,0010264	3,999	0,2501	317,62	2636,3	2318,7	1,0261	7,6710
0,50	81,33	0,0010299	3,243	0,3083	340,53	2645,2	2304,7	1,0912	7,5923
0,60	85,94	0,0010330	2,734	0,3658	359,90	2653,1	2293,2	1,1453	7,5313
0,80	93,50	0,0010385	2,089	0,4787	391,75	2665,3	2273,5	1,2331	7,4342
1,00	99,62	0,0010432	1,696	0,5896	417,47	2674,9	2257,5	1,3026	7,3579
1,2	104,80	0,0010472	1,430	0,6992	439,34	2683,0	2243,6	1,3610	7,2972
1,6	113,31	0,0010543	1,092	0,9160	475,41	2696,3	2220,8	1,4550	7,2017
2,0	120,23	0,0010606	0,8860	1,129	501,74	2706,8	2202,0	1,5306	7,1279
2,6	128,73	0,0010684	0,6929	1,443	541,2	2718,9	21,77,7	1,6213	7,0399
3,0	133,54	0,0010733	0,6055	1,652	561,7	2725,5	2163,9	1,6716	6,9922
4,0	143,62	0,0010836	0,4623	2,163	604,3	2738,7	2134,1	1,7766	6,8969

Окончание табл.4

Р, бар	$t_{\text{н}}^0, \text{C}$	$v', \text{м}^3/\text{кг}$	$v'', \text{м}^3/\text{кг}$	$\rho, \text{кг}/\text{м}^3$	$h', \text{кДж}/\text{кг}$	$h'', \text{кДж}/\text{кг}$	$r, \text{кДж}/\text{кг}$	$S', \text{кДж}/(\text{кг}\cdot\text{K})$	$S'', \text{кДж}/(\text{кг}\cdot\text{K})$
6,0	158,84	0,0011009	0,3156	3,169	670,6	2756,9	2086,3	1,9311	6,7609
8,0	170,41	0,0011149	0,2403	4,161	720,9	2769,0	2048,1	2,0461	6,6630
10,0	179,88	0,0011273	0Д 945	5,143	762,4	2777,8	2015,3	2,1383	6,5867
12,0	187,95	0,0011385	0,1633	6,125	793,4	2764,6	1986,2	2,2156	6,5224
14,0	195,04	0,0011488	0,1408	7,102	830,0	2789,7	1959,7	2,2841	6,4699
16,0	201,36	0,0011587	0,1238	8,080	858,3	2793,5	1935,2	2,3437	6,4221
18,0	207,10	0,0011678	0,1104	9,055	884,2	2796,5	1912,3	2,3975	6,3794
20,0	212,36	0,0011768	0,09961	10,0	908,6	2799,2	1890,7	2,4471	6,3411
24,0	221,77	0,0011932	0,08324	12,01	951,8	2801,8	1850,0	2,5346	6,2727
28,0	230,04	0,0012088	0,07142	14,0	990,2	2803,1	1812,8	2,6101	6,2129
30,0	233,83	0,0012164	0,06663	15,01	1008,4	2803,5	1794,7	2,6455	6,1859
35,0	242,54	0,0012344	0,05706	17,53	1049,8	2802,8	1753,0	2,7251	6,1242
40,0	250,33	0,0012520	0,04977	20,09	1087,5	2800,6	1713,2	2,7965	6,0689
50,0	263,91	0,0012858	0,03943	25,36	1154,2	2793,9	1639,6	2,9210	5,9739
60,0	275,56	0,0013185	0,03243	30,84	1213,9	2784,4	1570,5	3,0276	5,8894
70,0	285,80	0,0013510	0,02738	36,53	1267,6	2772,3	1504,7	3,1221	5,8143
80,0	294,98	0,0013838	0,02352	42,52	1317,3	2758,6	1441,2	3,2079	5,7448
90,0	303,31	0,0014174	0,02049	48,80	1363,9	2742,6	1378,8	3,2866	5,6783
100,0	310,96	0,0014522	0,01803	55,47	1107,9	2724,8	1316,9	3,3601	5,6147
110,0	318,04	0,0014886	0,01597	62,62	1450,2	2705,2	1255,0	3,4297	5,5528
120,0	324,64	0,0015270	0,01426	70,15	1491,1	2684,6	1193,5	3,4966	5,4930
130,0	330,81	0,0015680	0,01278	78,22	1531,3	2662,3	1131,1	3,5606	5,4333
140,0	330,63	0,0016110	0,01149	87,04	1570,8	2637,9	1067,0	3,6233	5,3731

Характеристика газов

Газ	Химическое обозначение	Молекулярная масса (округленно)	Плотность при нормальных физических условиях, кг/м ³	Газовая постоянная, Дж/(кг·К)
Воздух	-	29	1,293	287,0
Азот	N_2	28	1,249	296,9
Кислород	O_2	32	1,429	259,8
Водород	H_2	2	0,089	4157,0
Гелий	He_2	4	0,178	2078,5
Моноксид углерода	CO	28	1,249	296,9
Диоксид углерода	CO_2	44	1,287	188,9
Метан	CH_4	16	0,717	519,6
Аммиак	NH_3	17	0,771	489,0
Ацетилен	C_2H_2	26	1,160	319,8
Водяной пар	H_2O	18	(0,804)	(461,9)

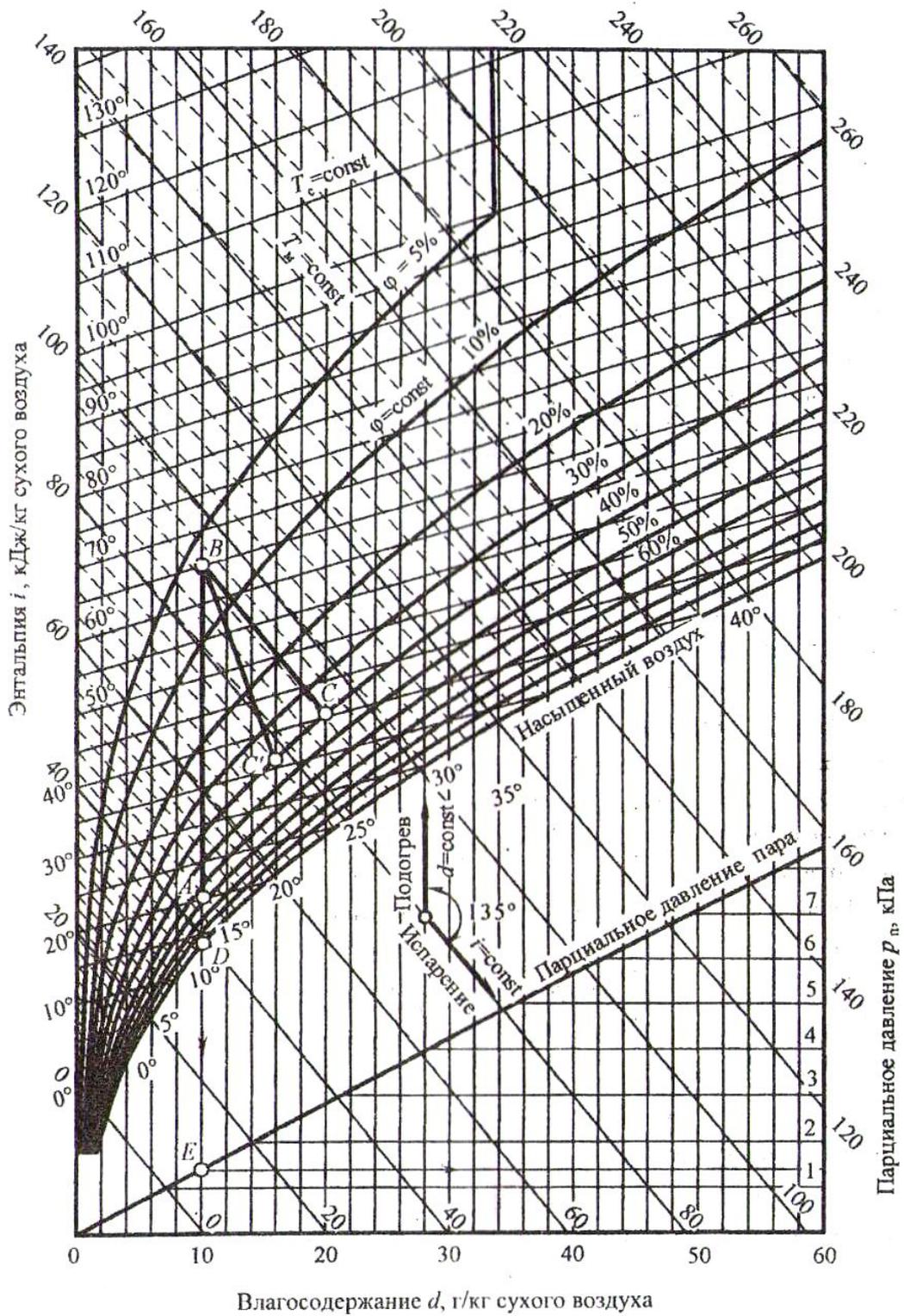


Рис. 4.1. i - d -диаграмма влажного воздуха

РЕКОМЕНДАТЕЛЬНЫЙ БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Техническая термодинамика: Учеб. для машиностроит. спец. вузов / В.И. Крутов, С.И. Исаев, И.А. Кожин и др.; Под ред. В.И. Крутова. 3-е изд., перераб. и доп. - М., Высш. шк., 1991. - 384 с.
2. Теплотехника: Учеб. для вузов. В.Н. Луканин, М.Г. Шатров, Г.М. Камфер и др.; Под ред. В.Н. Луканина.- 3 –е изд., испр. –М.: Высш. шк., 2002. - 671 с.: ил.
3. Нащокин В.В. Техническая термодинамика и теплопередача: Учеб. пособие для вузов. - М.: Высш. шк., 1980. - 496 с.
4. Задачник по технической термодинамике и теории тепломассообмена: Учеб. пособие для энергомашиностроит. спец. вузов / В.Н. Афанасьев, С.И. Исаев, И.А. Кожин и др.; Под. ред. В.И. Крутова и Г.Б. Петражицкого. - М.: Высш. шк., 1986. - 383 с.
5. Теория тепломассообмена: Учеб. для энергомашиностроит. спец. вузов / С.И. Исаев, И.А. Кожин, В.И. Кофанов и др.; Под. ред. А.И. Леонтьева. - М.: Высш. шк., 1979. - 495 с.
6. Теплотехника: учебно-методическое пособие по решению задач / сост.: А.С. Ненишев, А.Л. Иванов. – Омск: СибАДИ, 2009. – 22 с.

Оглавление

Введение.....	4
1. Основные понятия, идеальный газ, смеси идеального газа.....	5-8
2. Процессы изменения состояния идеального газа в закрытой системе.....	8-10
3. Сжатие газа в компрессоре.....	10-11
4. Процессы идеального газа.....	11-14
5. Второе начало термодинамики. Теория циклов. Циклы ДВС	14-19
6. Реальные газы и пары. Циклы холодильных установок.....	19-21
7. Дифференциальные уравнения термодинамики.....	21-22
8. Водяной пар, влажный воздух, циклы паротурбинных установок.....	22-24
9. Процессы изменения состояния газа в открытой системе. Циклы газотурбинных и реактивных установок.....	25-27
10. Теплопроводность.....	27-30
11. Конвективный теплообмен.....	30-32
12. Тепловое излучение.....	32-33
13. Теплопередача. Теплообменные аппараты.....	33-35
14. Приложение	36-43
15.Рекомендательный библиографический список.....	44