

ГЛАВА I

ПАРАМЕТРЫ СОСТОЯНИЯ
ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ. УРАВНЕНИЕ
СОСТОЯНИЯ ИДЕАЛЬНОГО ГАЗА*

1.1. Определить барометрическое давление при 0 °С в гектопаскалях (гПа), если ртутный барометр при 30 °С показывает 755 мм рт. ст.

Решение. При измерении давления высотой столба жидкости необходимо учитывать изменение ее плотности в зависимости от температуры среды. При отклонении температуры среды (следовательно, жидкости в приборе) от 0 °С следует вводить поправку на показание прибора. Для ртути эти поправки имеют следующие значения:

Температура среды, °С	±5	±10	±15	±20	±25	±30
Поправка в мм на						
1000 мм рт. ст.	0,87	1,72	2,59	3,45	4,31	5,17

Если ртутным барометром измерено давление при температуре среды t , °С, то

$$B_0 = B (1 \mp x/1000),$$

где B_0 — барометрическое давление при температуре 0 °С, мм рт. ст.; B — барометрическое давление при температуре t , °С; x — поправка, мм рт. ст. (Примечание. В тех задачах, в которых температура среды не указывается, барометрическое давление следует считать уже приведенным к 0 °С).

Для данной задачи $B_0 = 755 (1 - 5,17/1000) = 751,1$ мм рт. ст. Так как 1 гПа = 100 Па, то 1 гПа соответствует $750,06 \cdot 10^{-3}$ мм рт. ст. (табл. 1.1). Следовательно, барометрическое давление, приведенное к 0 °С и выраженное в гектопаскалях, составляет $751,1/(750,06 \cdot 10^{-3}) = 1001,4$ гПа.

1.2. Для условий задачи 1.1 выразить приведенное барометрическое давление в следующих единицах: ат, атм, мм вод. ст., кгс/м², бар.

* При расчете параметров состояния реальных газов целесообразно использовать ЭВМ. В Приложении приведена библиотека ФОРТРАН-программ для расчета термодинамических и теплофизических свойств азота в диапазоне температур 65—1500 К и давлений 0,1—100 МПа.

Единица	Килограмм-сила на квадратный метр (кгс/м ²)	Паскаль (Па)	Техническая атмосфера (ат)	Физическая атмосфера (атм)
1 кгс/м ²	1	9,80665	$1 \cdot 10^{-4}$	$0,96783 \cdot 10^{-4}$
1 Па	0,101972	1	$0,101972 \cdot 10^{-4}$	$0,986923 \cdot 10^{-5}$
1 ат	$1 \cdot 10^4$	$9,80665 \cdot 10^4$	1	0,96783
1 атм	$1,03323 \cdot 10^4$	$1,01235 \cdot 10^5$	1,03323	1
1 бар	10197,2	$1 \cdot 10^5$	1,01972	1,01972
1 мм рт. ст.	13,595	133,322	$13,56 \cdot 10^{-4}$	$13,16 \cdot 10^{-4}$
1 мм вод. ст.	1	9,80665	$1 \cdot 10^{-4}$	$0,96784 \cdot 10^{-4}$

Продолжение табл. 1.1

Единица	Бар	Миллиметр ртутного столба (мм рт. ст.)	Миллиметр водяного столба (мм вод. ст.)
1 кгс/м ²	$9,80665 \cdot 10^{-5}$	$735,55 \cdot 10^{-4}$	1
1 Па	$1 \cdot 10^{-5}$	$750,06 \cdot 10^{-4}$	0,101972
1 ат	0,980665	735,55	$1 \cdot 10^4$
1 атм	1,01325	760	$1,03323 \cdot 10^4$
1 бар	1	750,06	10197,2
1 мм рт. ст.	0,001333	1	13,595
1 мм вод. ст.	$0,980665 \cdot 10^{-4}$	$735,55 \cdot 10^{-4}$	1

1.3. В процессе сжатия в компрессоре давление воздуха в некоторые моменты составляло $4 \cdot 10^3$ кгс/м², 6000 кгс/м² и 0,8 кгс/см². Выразить наибольшее из указанных давлений в мегапаскалях (МПа), а наименьшее — в мм рт. ст. Вычислить среднее арифметическое трех значений давления и выразить его в физических атмосферах и барах.

1.4. В трубке манометра 1 (рис. 1.1), соединяющейся с окружающей средой, имеется столб воды высотой 50 мм (избыточное давление). Определить давление p в ресивере 2 и выразить его в килопаскалях (кПа), если разность уровней ртути в манометре составляет 120 мм, а барометрическое давление $B = 0,95$ атм.

1.5. Из ресивера 1 (рис. 1.2) воздух поступает в коллектор двигателя 2. Разрежение в ресивере измеряется вакуумметром с наклонной трубкой. Угол наклона трубки к горизонтالي 30°, вакуумметр заполнен водой. Определить давление p (Па) в ресивере, если показание вакуумметра

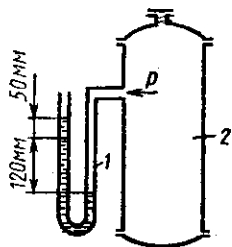


Рис. 1.1

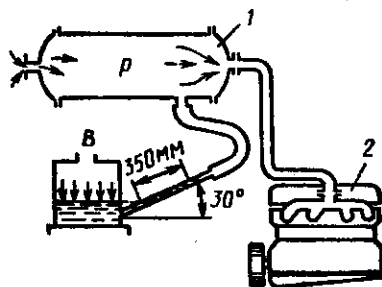


Рис. 1.2

$p_{\text{вак}} = 350$ мм вод. ст. (разрежение), а давление окружающей среды $B = 1000$ гПа.

1.6. Для пуска двигателя внутреннего сгорания (ДВС) используется сжатый воздух, хранящийся в баллоне. Определить отношение давлений в баллоне до и после пуска ДВС, если до пуска показание манометра было $p_{1\text{изб}} = 54 \cdot 10^5$ Па, а после пуска $p_{2\text{изб}} = 29,4 \cdot 10^5$ Па. Барометрическое давление 742 мм рт. ст. при температуре 293,15 К.

1.7. Давление пара на входе в турбину 2 (рис. 1.3) атомной электростанции (АЭС) по паспортным данным $p_0 = 6,65$ МПа. Давление пара на выходе из реактора 1

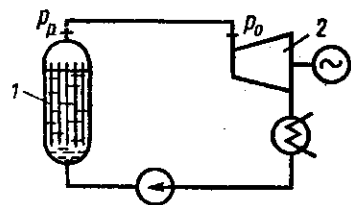


Рис. 1.3

измерено манометром, градуированным в технических атмосферах, и равно $p_{\text{изб}} = 68,6$ ат при показании барометра в помещении АЭС $B = 745$ мм рт. ст. Для обеспечения соблюдения паспортных данных турбины оценить максимально допустимую потерю давления Δp (МПа) в трубопроводе.

1.8. Определить давление на днище контейнера ракеты, установленной на подводной лодке, если днище находится на глубине 15,5 м, барометрическое давление при температуре 253,15 К составляет 0,1 МПа.

1.9. По данным испытаний паровой турбины, разрежение в ее конденсаторе составляет 94 % при барометрическом давлении 97 кПа и 0 °С. Каково давление в конденсаторе?

1.10. Давление в конденсаторе паровой турбины по паспортным данным 4 кПа. Каково значение разрежения

(%), если турбина работает при условиях: $B = 96$ кПа при $t = 25$ °С?

1.11. В машинном отделении атомохода давление по водяному манометру 100 мм вод. ст. Барометр на палубе показывает 750 мм рт. ст. Показание манометра на выходе из парогенератора 19 ат, показание вакуумметра конденсатора 640 мм рт. ст. (парогенератор и конденсатор расположены в машинном отделении). Определить давление (Па) в машинном отделении, на выходе из парогенератора и в конденсаторе.

1.12. Определить барометрическое давление, плотность и температуру воздуха на высоте 9500 м, если известно, что на уровне моря давление составляет 101 325 Па, а температура 273,15 К.

Решение. С подъемом на высоту барометрическое давление, плотность и температура понижаются. В пределах тропосферы (до высоты 11 км) законы понижения этих величин могут быть описаны следующими формулами:

$$B_T = B_0' (1 - H/44\,300)^{5,256},$$

где B_T — барометрическое давление в тропосфере при температуре 0 °С, мм рт. ст.; B_0' — барометрическое давление на уровне моря при температуре 0 °С, мм рт. ст.; H — высота над уровнем моря, м;

$$\rho_T = \rho_0 (1 - H/44\,300)^{4,256},$$

где ρ_T — плотность воздуха в тропосфере, кг/м³; ρ_0 — плотность воздуха на уровне моря, кг/м³;

$$T_T = T_0 - 0,0065 H,$$

где T_T — температура воздуха в тропосфере, К; T_0 — температура воздуха на уровне моря, К.

Для данной задачи:

$$B_T = 101\,325 (1 - 9500/44\,300)^{5,256} = 0,285 \cdot 10^5 \text{ Па.}$$

Из уравнения состояния идеального газа:

$$\rho_0 = B_0' / (R T_0) = 101\,325 / (287 \cdot 273,15) = 1,29 \text{ кг/м}^3.$$

Здесь $R = 287$ Дж/(кг·К) — удельная газовая постоянная воздуха.

$$\rho_T = 1,29 (1 - 9500/44\,300)^{4,256} = 0,462 \text{ кг/м}^3;$$

$$T_T = 273,15 - 0,0065 \cdot 9500 = 211,4 \text{ К.}$$

1.13. В помещении летательного аппарата, на борту которого установлена барокамера, давление по водяному манометру 50 мм вод. ст. В барокамере создано разрежение 180 мм рт. ст. Найти давление в барокамере в момент, когда летательный аппарат находится на высоте 6 км над уровнем моря. Давление атмосферы на уровне моря 1013 гПа.

1.14. Избыточное давление в баллоне, заполненном кислородом, составляет $p_{изб} = 40$ ат. Определить избыточное давление кислорода $p_{изб}$ (Па) в баллоне после подъема его на высоту 8000 м, если барометрическое давление на уровне моря 770 мм рт. ст. при температуре 303,15 К.

1.15. После пуска ДВС давление сжатого воздуха в пусковом баллоне понизилось от 3,5 до 2,9 МПа. Определить объем израсходованного воздуха при температуре и давлении окружающей среды 18 °С и 1008 гПа, если вместимость пускового баллона 0,2 м³, температура воздуха в баллоне до пуска 18 °С, а после пуска 10 °С.

Решение. Масса израсходованного воздуха:

$$m_1 = p_1 V / (RT_1) = 3500 \cdot 0,2 / (0,287 \cdot 291) = 8,38 \text{ кг};$$

$$m_2 = p_2 V / (RT_2) = 2900 \cdot 0,2 / (0,287 \cdot 283) = 7,14 \text{ кг};$$

$$m = m_1 - m_2 = 8,38 - 7,14 = 1,24 \text{ кг}.$$

Объем израсходованного воздуха

$$V_0 = mRT_0/p_0 = 1,24 \cdot 0,287 \cdot 291 / 100,8 = 1,028 \text{ м}^3.$$

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

1.17. В резервуар вместимостью 8,5 м³ компрессор подает воздух при температуре 15 °С и давлении 988 гПа. За какое время компрессор, подача которого составляет 3 м³/мин, наполнит резервуар до давления $p_{изб} = 1,8$ МПа, если температура воздуха в резервуаре при указанном давлении 47 °С? Перед накачиванием резервуар был сообщен с атмосферой.

1.18. Баллон вместимостью 0,055 м³ наполнен углекислым газом (CO₂). Давление сжатого газа по манометру $p_{изб} = 15$ МПа. Определить температуру сжатого газа, если его объем при нормальных условиях* составляет $V_n = 7,5$ м³.

* Нормальные условия в дальнейшем обозначены н. у.

1.19. Давление в барокамере, имеющей размеры $2 \times 2 \times 1$ м, измерено манометром и равно $p_{изб} = 200$ гПа, температура 17 °С. Определить массу воздуха, которую необходимо откачать из барокамеры, чтобы создать в ней разрежение $p_{вак} = 420$ гПа, не изменяя температуры. Барометрическое давление равно 1008 гПа.

1.20. Определить плотность углекислого газа при н.у.

1.21. Молярный объем некоторого двухатомного газа при давлении $p = 0,02$ МПа и температуре T в три раза больше, чем при н.у. Определить эту температуру. Какой это газ, если его плотность при указанных p и T равна 0,4167 кг/м³?

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

1.23. В поршневом компрессоре газ сжимается при движении поршня по направлению к днищу цилиндра; сжатый газ подается в резервуар высокого давления. Объем цилиндров 0,012 м³. Определить частоту вращения вала компрессора n , с⁻¹, если на нагнетание воздуха в резервуар вместимостью 1,2 м³ до давления 4 МПа при температуре окружающей среды затрачено 10 мин, а начальное давление в резервуаре равно 0,8 МПа, температура и давление окружающей среды 10 °С и 0,1 МПа.

1.24. Турбореактивный самолет летит на высоте 5500 м над уровнем моря. Температура и давление газов на входе в турбину равны 715 °С и 0,45 МПа. Определить избыточное давление газов на выходе из турбины, если температура газов в этом сечении 388 °С, а плотность в 4,5 раза меньше, чем на входе в турбину. Давление атмосферы на уровне моря 1000 гПа. Считать, что газы имеют физические свойства воздуха.

1.25. На АЭС работает газотурбинная установка (ГТУ) закрытого типа, использующая в качестве рабочего тела углекислый газ. Температура газа на входе в турбину 550 °С, давление 8 МПа. Мощность установки 230 МВт, удельный расход рабочего тела составляет $55 \cdot 10^3$ кг/(МВт·ч). Определить объемную подачу компрессора V_n (м³/мин) при н. у., плотность газа на входе в турбину и необходимую площадь выходного сечения соплового аппарата, если скорость выте-

кающих из него газов при указанных параметрах равна 90 м/с.

Решение. Массовый расход углекислого газа в установке

$$M = 230 \cdot 55 \cdot 10^3 = 12,65 \cdot 10^6 \text{ кг/ч} = 3514 \text{ кг/с.}$$

Объемная подача компрессора при н. у.

$$V^n = 60MRT^n/p^n = 60 \cdot 3514 \cdot 8,314 \cdot 273 / (44 \cdot 101,33) = 10,73 \cdot 10^4 \text{ м}^3/\text{мин.}$$

Плотность углекислого газа на входе в турбину

$$\rho = p/(RT) = 8000 \cdot 44 / [8,314 (550 + 273)] = 51,47 \text{ кг/м}^3.$$

Площадь выходного сечения соплового аппарата

$$F = M/(\rho w) = 3514 / (51,47 \cdot 90) = 0,758 \text{ м}^2.$$

1.26. ДВС мощностью 120 кВт расходует 0,024 кг топлива на 1 кг рабочего тела. Определить объемный расход (м³/с) рабочего тела, если удельный расход топлива составляет 190 г/(кВт·ч). Воздух всасывается в цилиндры ДВС из помещения с параметрами $p = 1000 \text{ гПа}$, $T = 290 \text{ К}$. Считать, что рабочее тело имеет физические свойства сухого воздуха.

1.27. Определить подъемную силу воздушного шара, имеющего баллон объемом 4000 м³ и заполненного водородом. Давление и температура окружающего воздуха 1013 гПа и 273 К. Массой оболочки пренебречь; считать, что давление и температура водорода и окружающего воздуха одинаковы.

1.28. Расход пропана ($\text{CH}_3\text{CH}_2\text{CH}_3$) для газовых горелок в химической лаборатории составляет 0,27 м³ за рабочую неделю. Пропан поставляется в баллонах вместимостью $12 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3$, заполняемых на станции при температуре 10 °С до давления 6 МПа. Хранение и потребление пропана в лаборатории происходит при температуре 22 °С и барометрическом давлении 1000 гПа. Сколько баллонов с пропаном необходимо иметь в неделю? Каково максимальное показание манометра, присоединенного к баллону с пропаном в лаборатории?

1.29. Масса воздуха, заключенного между днищем цилиндра и поршнем, 0,5 кг. Диаметр цилиндра 0,5 м, давление и температура внутри цилиндра 0,35 МПа и 400 К. При

неизменном давлении движущийся без трения поршень перемещается на 20 см. Определить начальное расстояние поршня от днища цилиндра и температуру в цилиндре после перемещения поршня.

ГЛАВА 2

ТЕПЛОЕМКОСТЬ, ВНУТРЕННЯЯ ЭНЕРГИЯ И ЭНТАЛЬПИЯ ИДЕАЛЬНОГО ГАЗА. СМЕСИ ГАЗОВ

2.1. Коэффициент Пуассона для двухатомных газов равен 1,4. Определить, какое количество теплоты требуется для нагревания 5 м³ газа на 200 градусов при постоянном объеме и н. у.

2.2. Подсчитать массовую теплоемкость кислорода O_2 и объемную теплоемкость (при н. у.) двуокиси азота NO_2 при $p = \text{const}$, если молярная теплоемкость μ_{c_p} , кДж/(кмоль·К), одноатомного газа — 12,6, двухатомного — 20,9, трех- и многоатомного — 29,3.

2.3. Исходя из заданной зависимости истинной молярной теплоемкости [кДж/(кмоль·К)] водорода от температуры

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

вычислить значения следующих истинных теплоемкостей водорода при $T = 473 \text{ К}$: μ_{c_p} , кДж/(кмоль·К); c_p и c_v , кДж/(кг·К); c_p' и c_v' , кДж/(м³·К).

2.4. Построить график зависимости истинной массовой теплоемкости водяного пара от температуры в интервале 100 ... 400 °С, если известна зависимость истинной молярной теплоемкости [кДж/(кмоль·К)] пара от температуры:

$$\mu_{c_p} = 36,9 - 0,00797T + 0,93 \cdot 10^{-5} T^2.$$

Пользуясь полученными результатами, подсчитать среднюю массовую теплоемкость водяного пара при $v = \text{const}$ в указанном интервале температур и сравнить со значением, взятым из табл. 2 Приложения.

2.5. Найти изменение внутренней энергии 20 кг ацетиленна при изменении его температуры от 300 до 600 °С, если зависимость истинной молярной теплоемкости [кДж/(кмоль·К)] ацетиленна от температуры выражается уравнением

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

2.6. Углекислый газ находится в емкости вместимостью 200 л при давлении 0,35 МПа и температуре 100 °С. Подсчитать изменение внутренней энергии газа при увеличении его температуры до 200 °С, если известны следующие значения средних молярных теплоемкостей углекислого газа:

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

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

Р е ш е н и е. Средняя молярная теплоемкость в интервале температур от 100 до 200 °С

$$\begin{aligned} \mu c_p \Big|_{t_1}^{t_2} &= \left[\mu c_p \Big|_0^{t_2} - \mu c_p \Big|_0^{t_1} \right] / (t_2 - t_1) = \mu c_p \Big|_{100}^{200} = \\ &= (40,065 \cdot 200 - 38,118 \cdot 100) / (200 - 100) = \\ &= 42,0121 \text{ кДж/(кмоль} \cdot \text{К)}. \end{aligned}$$

Следовательно, средняя объемная теплоемкость при $v = \text{const}$

$$\begin{aligned} c_v' \Big|_{t_1}^{t_2} &= \mu c_p \Big|_{t_1}^{t_2} - \mu R / (\mu v^n) = c_v' \Big|_{100}^{200} = (42,0121 - 8,314) / 22,4 = \\ &= 1,5043 \text{ кДж/(кмоль} \cdot \text{К)}. \end{aligned}$$

Объем, занимаемый газом, приведенный к н. у.,

$$\begin{aligned} v^n &= p v T^n / (p^n T) = (0,35 \cdot 10^5 \cdot 0,2 \cdot 273) / (101,33 \cdot 373) = \\ &= 0,506 \text{ м}^3 \end{aligned}$$

и тогда

$$\begin{aligned} \Delta U &= v^n c_v' \Big|_{t_1}^{t_2} (t_2 - t_1) = 0,506 \cdot 1,5043 (200 - 100) = \\ &= 7612 \text{ кДж}. \end{aligned}$$

2.7. Воздух при нормальном давлении $p_0 = 0,5$ МПа и температуре $t_0 = 300$ °С адиабатно расширяется до давления 0,1 МПа. Определить изменение его внутренней энергии и энтальпии.

Р е ш е н и е. Температура воздуха в конце расширения

$$\begin{aligned} T &= T_0 (p/p_0)^{(k-1)/k} = 573 [1 \cdot 10^5 / (5 \cdot 10^5)]^{0,4/1,4} = \\ &= 361,8 \text{ К} = 88,8^\circ \text{С}. \end{aligned}$$

По табл. 2 Приложения находим значения средних молярных теплоемкостей при $p = \text{const}$

$$\mu c_p \Big|_0^{300} = 29,525 \text{ кДж/(кмоль} \cdot \text{К)};$$

$$\mu c_p \Big|_0^{88,8} = 29,147 \text{ кДж/(кмоль} \cdot \text{К)}.$$

Значения средних массовых теплоемкостей определяем по формулам:

$$c_p \Big|_0^{300} = \mu c_p \Big|_0^{300} / \mu_v = 29,525 / 28,29 = 1,044 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{К)};$$

$$c_p \Big|_0^{88,8} = \mu c_p \Big|_0^{88,8} / \mu_v = 29,147 / 28,29 = 1,03 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{К)}.$$

где $\mu_v = 28,29$ кг/кмоль.

Используя формулу Майера, находим

$$\begin{aligned} \mu c_p \Big|_0^{300} &= \mu c_p \Big|_0^{300} - \mu R = 29,525 - 8,314 = \\ &= 21,21 \text{ кДж/(кмоль} \cdot \text{К)}; \end{aligned}$$

$$c_v \Big|_0^{300} = \mu c_p \Big|_0^{300} / \mu_v = 0,7497 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{К)};$$

$$\begin{aligned} \mu c_v \Big|_0^{88,8} &= \mu c_p \Big|_0^{88,8} - \mu R = 29,147 - 8,314 = \\ &= 20,833 \text{ кДж/(кмоль} \cdot \text{К)}; \end{aligned}$$

$$c_v \Big|_0^{88,8} = \mu c_v \Big|_0^{88,8} / 28,29 = 0,736 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{К)}.$$

Изменение внутренней энергии

$$\begin{aligned} \Delta u &= c_v \Big|_0^{88,8} T - c_v \Big|_0^{300} T_0 = 0,736 \cdot 88,8 - 0,7497 \cdot 300 = \\ &= -159,55 \text{ кДж/кг}. \end{aligned}$$

Изменение энтальпии

$$\begin{aligned} \Delta i &= c_p \Big|_0^{88,8} T - c_p \Big|_0^{300} T_0 = 1,03 \cdot 88,8 - 1,044 \cdot 300 = \\ &= -221,74 \text{ кДж/кг}. \end{aligned}$$

2.8. При расширении 2,5 кг воздуха температура его изменяется от 500 до 200 °С. Определить изменение внутренней энергии воздуха, пользуясь таблицами Приложения: а) считая среднюю теплоемкость воздуха не зависящей от температуры; б) учитывая зависимость средней теплоемкости от температуры.

2.9. Кислород занимает объем 2 м³ и имеет параметры 500 °С и 0,65 МПа. Определить конечные значения температуры и плотности газа, если в изобарном процессе его внутренняя энергия уменьшилась на 2500 кДж. Определить также изменение энтальпии кислорода.

2.10. Расход воздуха через теплообменник составляет 150 м³/ч (н. у.). Воздух нагревается от 20 до 300 °С. Определить изменение внутренней энергии и энтальпии воздуха в теплообменнике, пользуясь таблицами Приложения: а) по средним теплоемкостям; б) по значениям внутренней энергии и энтальпии.

2.11. Объемные доли компонентов смеси идеальных газов: 25 % CO₂ и 75 % O₂. Давление смеси равно 0,085 МПа, температура 100 °С. Найти парциальные давления компонентов, массовые доли компонентов, молярную массу и газовую постоянную смеси, а также плотность смеси при н. у. и условиях, указанных в задаче.

Решение. Парциальные давления компонентов

$$p_{CO_2} = r_{CO_2} p_{см} = 0,25 \cdot 0,085 = 0,02125 \text{ МПа};$$

$$p_{O_2} = r_{O_2} p_{см} = 0,75 \cdot 0,085 = 0,06375 \text{ МПа}.$$

Массовые доли компонентов:

$$g_{CO_2} = (\mu_{CO_2} r_{CO_2}) / (\mu_{CO_2} r_{CO_2} + \mu_{O_2} r_{O_2}) = \\ = (44 \cdot 0,25) / (44 \cdot 0,25 + 32 \cdot 0,75) = 0,314;$$

$$g_{O_2} = (\mu_{O_2} r_{O_2}) / (\mu_{CO_2} r_{CO_2} + \mu_{O_2} r_{O_2}) = \\ = (32 \cdot 0,75) / (44 \cdot 0,25 + 32 \cdot 0,75) = 0,686.$$

Молярная масса смеси

$$\mu_{см} = \mu_{CO_2} r_{CO_2} + \mu_{O_2} r_{O_2} = 44 \cdot 0,25 + 32 \cdot 0,75 = \\ = 32 \text{ кг/кмоль}.$$

Газовая постоянная смеси

$$R_{см} = 8,314 / \mu_{см} = 8,314 / 32 = 0,2598 \text{ кДж/(кг·К)}.$$

Плотность смеси

$$\rho_{см} = p_{см} / (R_{см} T_{см}) = 0,085 \cdot 10^5 / (0,2598 \cdot 378) = 0,957 \text{ кг/м}^3.$$

Плотность смеси при н. у.

$$\rho_{см}^н = \mu_{см} / (\mu v^н) = 32 / 22,4 = 1,429 \text{ кг/м}^3.$$

2.12. Для смеси газов из предыдущей задачи найти: истинные молярную, массовую и объемную (при н. у.) теплоемкости смеси для температуры 500 °С при $p = \text{const}$ и при $v = \text{const}$; средние молярную, массовую и объемную теплоемкости смеси для интервала температур 1000 ... 500 °С при $p = \text{const}$; количество теплоты, затраченное на нагревание 5 м³ (н. у.) смеси при $p = \text{const}$ в том же интервале температур.

Решение. Значения теплоемкостей компонентов смеси определяем по таблицам Приложения; значения теплоемкостей смеси подсчитываем по формулам.

Истинные теплоемкости смеси при $p = \text{const}$ и $t = 500 \text{ °С}$:

$$\mu c_{pсм} = r_{CO_2} \mu c_{pCO_2} + r_{O_2} \mu c_{pO_2} = 0,25 \cdot 50,822 + \\ + 0,75 \cdot 33,554 = 37,87 \text{ кДж/(кмоль·К)};$$

$$c_{pсм} = \mu c_{pсм} / \mu_{см} = 37,87 / 32 = 1,183 \text{ кДж/(кг·К)};$$

$$c'_{pсм} = \mu c_{pсм} / (\mu v^н) = 37,87 / 22,4 = 1,69 \text{ кДж/(м}^3 \cdot \text{К)}.$$

Истинные теплоемкости смеси при $v = \text{const}$:

$$\mu c_{vсм} = \mu c_{pсм} - 8,314 = 37,87 - 8,314 = \\ = 29,56 \text{ кДж/(кмоль·К)};$$

$$c_{vсм} = \mu c_{vсм} / \mu_{см} = 29,56 / 32 = 0,924 \text{ кДж/(кг·К)};$$

$$c'_{vсм} = \mu c_{vсм} / (\mu v^н) = 29,56 / 22,4 = 1,32 \text{ кДж/(м}^3 \cdot \text{К)}.$$

Средняя теплоемкость смеси при $p = \text{const}$ в интервале температур 0 ... 1000 °С

$$\mu c_{pсм} \int_0^{1000} = r_{CO_2} \mu c_{pCO_2} \int_0^{t_1} + r_{O_2} \mu c_{pO_2} \int_0^{t_1} = 0,25 \cdot 49,399 + \\ + 0,75 \cdot 33,122 = 37,19 \text{ кДж/(кмоль·К)}.$$

В интервале температур 0 ... 500 °С

$$\mu c_{pсм} \int_0^{500} = r_{CO_2} \mu c_{pCO_2} \int_0^{t_2} + r_{O_2} \mu c_{pO_2} \int_0^{t_2} = 0,25 \cdot 44,579 + \\ + 0,75 \cdot 31,338 = 34,65 \text{ кДж/(кмоль·К)}.$$

В интервале температур 1000 ... 500 °С:

$$\mu_{c_{pсм}} \Big|_{1000}^{500} = \left[\mu_{c_{pсм}} \Big|_0^{t_2} - \mu_{c_{pсм}} \Big|_0^{t_1} \right] / (t_2 - t_1) =$$

$$= \frac{34,65 \cdot 500 - 37,19 \cdot 1000}{500 - 1000} = 39,73 \text{ кДж/(кмоль} \cdot \text{К)};$$

$$c_{pсм} \Big|_{1000}^{500} = \mu_{c_{pсм}} \Big|_{1000}^{500} / \mu_{см} = 39,73/35 =$$

$$= 1,135 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{К)};$$

$$c'_{pсм} \Big|_{1000}^{500} = \mu_{c_{pсм}} \Big|_{1000}^{500} / (\mu v^n) = 39,73/22,4 =$$

$$= 1,774 \text{ кДж/(м}^3 \cdot \text{К)}.$$

Количество теплоты, затрачиваемое на нагревание 5 м³ (н.у.) смеси при $p = \text{const}$,

$$Q = v^n c'_{pсм} \Big|_{t_1}^{t_2} (t_1 - t_2) = 5 \cdot 1,774 (1000 - 500) = 4434 \text{ кДж.}$$

2.13. Объемные доли компонентов влажного воздуха: 21 % кислорода; 78,1 % азота и 0,9 % водяного пара. Определить массовые доли, состав и парциальные давления компонентов воздуха при давлении смеси 0,1 МПа, газовую постоянную воздуха и плотность при н.у.

2.14. Определить парциальные плотности азота, кислорода и водяного пара в воздухе (см. условия предыдущей задачи), если температура воздуха равна 300 К.

2.15. Состав продуктов сгорания органического топлива в объемных долях: 13 % CO₂; 8 % O₂; 79 % N₂. Найти кажущуюся молярную массу, газовую постоянную и удельный объем продуктов сгорания, а также парциальные давления компонентов, если давление и температура продуктов сгорания равны 95 кПа и 650 °С соответственно.

2.16. Под колоколом цилиндрического газгольдера постоянного давления находится доменный газ (состав в объемных долях: 12 % CO₂; 29 % CO; 1 % N₂; 0,3 % CH₄; 57,7 % N₂) при температуре 20 °С и давлении 0,106 МПа; колокол расположен на высоте 2 м; диаметр колокола 5 м. Определить начальную массу газа и скорость опускания колокола, если при равномерном потреблении газа его расход составляет 12 м³/ч.

2.17. Баллоны для автомобилей с газовыми двигателями заполняются на станции до давления 20 МПа при температуре 17 °С. Определить массу газа в баллоне с размерами $D = 220$ мм, $H = 1200$ мм, а также плотность смеси и парциальные плотности компонентов смеси в баллоне после израсходования половины первоначальной массы газа, если состав газа в объемных долях: 71,9 % метана (CH₄); 10,1 % этана (C₂H₆); 3,2 % пропана (C₃H₈); 2,7 % бутана (C₄H₁₀); 1,7 % пентана (C₅H₁₂) и 10,4 % углекислого газа (CO₂), а давление в баллоне постоянно.

2.18. Определить значения газовой постоянной, кажущейся молярной массы и плотности при н. у., а также при температуре 400 °С и давлении $p = 0,1013$ МПа. Смесь газов задана следующим массовым составом: 30 % H₂; 10 % CO₂; 60 % N₂.

2.19. Найти парциальные объемы компонентов смеси, состоящей из 40 % H₂, 10 % CO₂ и 50 % SO₂ по массе. Объем, занимаемый смесью, 2 м³, температура смеси 200 °С и давление 0,2 МПа.

2.20. Для смеси, заданной в задаче 2.19, определить парциальные давления компонентов.

2.21. Смесь задана объемными долями: 20 % CO и 80 % CO₂. Определить ее газовую постоянную и плотность при н.у. ($T = 273,15$ К, $p = 1,01325$ Н/м²).

2.22. Смесь, заданная в объемных долях: 20 % H₂O, 35 % CO₂ и 45 % N₂, находится при температуре 200 °С. Определить истинные молярные и массовые теплоемкости смеси при постоянном давлении и объеме.

2.23. Для смеси газов, заданной в предыдущей задаче, определить количество теплоты, необходимое для нагрева 1 кг смеси при постоянном объеме от 200 до 400 °С.

2.24. Смесь задана массовыми долями: 80 % CO₂; 20 % O₂. Определить ее истинные молярную, массовую и объемную теплоемкости при температуре 400 °С и постоянном давлении $p = 0,1$ МПа.

2.25. Смесь, состоящая из следующих количеств веществ: 2 кмоль N₂, 1 кмоль O₂ и 3 кмоль CO₂, нагревается при $p = \text{const}$ от 100 до 400 °С. Определить изменение внутренней энергии смеси, пользуясь таблицами Приложения: а) истинных теплоемкостей компонентов; б) средних теплоемкостей.

2.26. Для смеси предыдущей задачи определить значение ее энтальпии и парциальные объемы компонентов после нагревания, если давление смеси равно 0,12 МПа.

2.27. Состав смеси в массовых долях: 20 % гелия (He) и 80 % ксенона (Xe). Определить энтальпию смеси при $p = 0,1$ МПа и $T = 1000$ К, используя таблицы термодинамических свойств газов [4].

Решение. По таблице термодинамических свойств гелия [4] при $p = 0,1$ МПа и $T = 100$ К $i_{\text{He}} = 3776,4$ кДж/кг. Это значение энтальпии гелия определяется путем линейной интерполяции в интервале температур 700 ... 750 °С. По таблице термодинамических свойств ксенона при $p = 0,1$ МПа и $T = 1000$ К $i_{\text{Xe}} = 279,3$ кДж/кг.

В таблице для ксенона за начало отсчета энтальпии принят 0 К, а в таблице для гелия 0 °С. Поэтому при подсчете энтальпии смеси следует к значению i_{He} прибавить значение $i_0 = 1428,3$ кДж/кг, указанное в начале таблицы термодинамических свойств гелия, чтобы начало отсчета энтальпии компонентов было общим.

Тогда получим

$$i_{\text{см}} = g_{\text{He}} i_{\text{He}} + g_{\text{Xe}} i_{\text{Xe}} = 0,2 \cdot 5204,7 + 0,8 \cdot 279,3 = \\ = 1264 \text{ кДж/кг.}$$

2.28. Используя условия задачи 2.25 и таблицы термодинамических свойств [16], определить изменение внутренней энергии и энтальпии газовой смеси в расчете на 1 кг смеси.

2.29. Одним из видов потерь в ДВС является потеря теплоты с выпускными газами. При теплорасчетном испытании ДВС были получены следующие данные: температура окружающей среды $t_0 = 20$ °С; температура выпускных газов $t_r = 400$ °С; состав выпускных газов (кмоль/ч): $n_{\text{CO}_2} = 2,3$; $n_{\text{H}_2\text{O}} = 1,4$; $n_{\text{CO}} = 0,01$; $n_{\text{N}_2} = 15,3$; $n_{\text{O}_2} = 1,3$; коэффициент избытка воздуха $\alpha = 2,05$; расход топлива $M = 20$ кг/ч. Подсчитать потерю теплоты с выпускными газами, если состав дизельного топлива в объемных долях: С = 86 %; Н = 13 %; О = 1 %.

Решение. По табличным данным [4], энтальпия выпускных газов при температуре $t_r = 400$ °С

$$I_2 = n_{\text{CO}_2} \mu I_{\text{CO}_2} + n_{\text{H}_2\text{O}} \mu I_{\text{H}_2\text{O}} + n_{\text{CO}} \mu I_{\text{CO}} + n_{\text{N}_2} \mu I_{\text{N}_2} + \\ + n_{\text{O}_2} \mu I_{\text{O}_2} = 2,3 \cdot 25798 + 1,4 \cdot 23087 + 0,01 \cdot 19857 + \\ + 15,3 \cdot 19776 + 1,3 \cdot 20272 = 420780 \text{ кДж/ч.}$$

Количество воздуха, теоретически необходимого для полного сгорания 1 кг топлива,

$$L_0 = (C/12 + H/4 - O/32)/21 = (86/12 + 13/4 - 1/32)/21 = \\ = 0,495 \text{ кмоль/кг.}$$

Количество всасываемого воздуха

$$n_a = \alpha L_0 M = 2,05 \cdot 0,495 \cdot 20 = 20,3 \text{ кмоль/ч.}$$

Энтальпия всасываемого воздуха при $t = 20$ °С

$$I_1 = n_a \mu I_a = 20,3 \cdot 8496,6 = 172440 \text{ кДж/ч.}$$

Потеря теплоты с выпускными газами

$$Q = I_2 - I_1 = 420780 - 172440 = 248340 \text{ кДж/ч.}$$

2.30. Продукты сгорания расширяются в турбине до давления 0,102 МПа, при этом их температура изменяется от 800 до 400 °С. Определить изменение энтальпии в процессе, а также плотность и изобарную массовую теплоемкость продуктов сгорания в конце расширения. Состав продуктов сгорания: $n_{\text{CO}_2} = 2$ кмоль/ч; $n_{\text{H}_2\text{O}} = 1,6$ кмоль/ч; $n_{\text{CO}} = 0,05$ кмоль/ч; $n_{\text{O}_2} = 1,1$ кмоль/ч; $n_{\text{N}_2} = ?$ кмоль/ч. Элементарный состав топлива взять из задачи 2.29, расход топлива 22,5 кг/ч; коэффициент избытка воздуха $\alpha = 1,7$.

ГЛАВА 3

ПЕРВЫЙ ЗАКОН ТЕРМОДИНАМИКИ

§ 3.1. Приложение первого закона термодинамики к процессам изменения физического состояния газа

3.1. Масса воздуха, заключенного в жесткую оболочку, равна 8,5 кг, температура воздуха 70 °С. Определить изменение энтальпии воздуха и давление в конце изохорного охлаждения, если отведенное количество теплоты составляет 300 кДж. Начальное давление равно 0,8 МПа.

3.2. В теоретическом цикле (см. рис. 11.1) четырехтактного ДВС теплота подводится к рабочему телу в процессе $v = \text{const}$. Каким должен быть объем камеры сгорания, чтобы в результате подвода к рабочему телу теплового потока 10 кВт давление оказалось равным 6,4 МПа. Давление и температура в конце сжатия 4,2 МПа и 297 °С, рабочее тело

имеет физические свойства воздуха. Частота вращения коленчатого вала 2000 об/мин.

Решение. Температура рабочего тела после подвода теплоты в процессе $v = \text{const}$

$$T_2 = T_1 p_2 / p_1 = 570 \cdot 6,4 / 4,2 = 868,6 \text{ К},$$

следовательно, массовый расход рабочего тела составляет

$$M = Q_v / [c_v (T_2 - T_1)] = 10 / [0,718 (868,6 - 570)] = 0,047 \text{ кг/с}.$$

Минутный объемный расход рабочего тела при p_1 и T

$$V_1 = 60 M R T_1 / p_1 = 60 \cdot 0,047 \cdot 0,287 \cdot 570 / (1000 \cdot 4,2) = 0,109 \text{ м}^3/\text{мин}.$$

Так как один цикл четырехтактного двигателя осуществляется за два оборота коленчатого вала, то объем камеры сгорания двигателя

$$V = 2 V_1 / n = 2 \cdot 0,109 / 2000 = 0,109 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3 \text{ (или м}^3/\text{цикл)}.$$

3.3. Углекислый газ (CO_2), занимающий объем 450 см^3 и имеющий в начале процесса давление $0,1 \text{ МПа}$, нагревается при постоянном объеме от 100 до 500°C . Определить давление в конце нагревания, подведенное количество теплоты и изменение энтальпии, если изобарная средняя молярная теплоемкость углекислого газа равна $49,7 \text{ кДж/(кмоль} \times \text{К)}$.

3.4. От воздуха массой 5 кг при постоянном объеме отводится 1800 кДж теплоты, при этом давление воздуха уменьшается в три раза. Определить температуру воздуха после охлаждения, приняв $c_v = 0,718 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{К)}$.

3.5. Пусковой баллон ДВС заполняется продуктами сгорания так, что в конце заполнения они имеют давление $2,4 \text{ МПа}$ при температуре 220°C . Определить давление газа в баллоне, когда его температура сравняется с температурой окружающей среды, равной 15°C , и выделенное количество теплоты, если вместимость баллона равна 100 л , теплоемкость продуктов сгорания $c_p = 0,735 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{К)}$, показатель адиабаты $1,38$.

3.6. В баллоне вместимостью 40 л избыточное давление воздуха должно иметь значение $12,43 \text{ МПа}$. Температура и давление в помещении, где установлен баллон, 18°C и $0,102 \text{ МПа}$. Какую массу воздуха следует выпустить из баллона для поддержания в нем заданного давления, если

за счет солнечной радиации температура сжатого воздуха повысилась на 10 К ? Определить также избыточное давление в баллоне, если при указанных условиях массу воздуха в нем не уменьшать.

3.7. Воздух расширяется в процессе $p = 0,5 \text{ МПа} = \text{const}$, при этом его объем изменяется от $0,35$ до $1,8 \text{ м}^3$. Температура в конце расширения равна 1500°C . Определить температуру воздуха в начале процесса расширения, подведенное количество теплоты, работу, совершенную в этом процессе, изменения внутренней энергии и энтальпии воздуха.

Решение. Температура воздуха в начале изобарного расширения

$$T_1 = T_2 V_1 / V_2 = 1773 \cdot 0,35 / 1,8 = 345 \text{ К}.$$

Масса воздуха

$$m = p V_1 / (R T_1) = 500 \cdot 0,35 / (0,287 \cdot 345) = 1,77 \text{ кг}.$$

Подведенное количество теплоты

$$Q_p = m c_p (T_2 - T_1) = 1,77 \cdot 1,005 (1773 - 345) = 2540 \text{ кДж}.$$

Совершенная работа

$$L = p (V_2 - V_1) = 500 (1,8 - 0,35) = 725 \text{ кДж}.$$

Изменение внутренней энергии

$$\Delta U = m c_v (T_2 - T_1) = 1,77 \cdot 0,718 (1773 - 345) = 1815 \text{ кДж}.$$

Изменение энтальпии

$$\Delta I = Q_p = 2540 \text{ кДж}.$$

3.8. В цилиндре ДВС к воздуху подводится количество теплоты 8120 кДж/кмоль при $p = \text{const}$. Определить состояние поршня от верхней мертвой точки в конце этого процесса и работу, совершенную воздухом, если объем камеры сжатия составляет 250 см^3 , диаметр цилиндра $D = 80 \text{ мм}$, начальная температура воздуха $t_1 = 540^\circ\text{C}$.

3.9. Определить расход охлаждающей воды через промежуточный холодильник компрессора, если в результате охлаждения сжатого воздуха до 17°C при $p = \text{const}$ его плотность увеличивается в $1,4$ раза, а температура воды при этом возрастает на 20 К . Объемная подача компрессора при н. у. $V^n = 350 \text{ м}^3/\text{ч}$.

3.10. В камере сгорания при $p = \text{const}$ сжигается топливо с удельной теплотой сгорания 42 000 кДж/кг. Определить расход топлива, если расход поступающего в камеру сгорания воздуха 40 кг/с, температура воздуха и энтальпия топлива на входе 290 °С и 200 кДж/кг, температура газов на выходе 650 °С. Считать, что физические свойства газов и воздуха одинаковы. Потерями теплоты пренебречь.

3.11. В регенераторе ГТУ теплота продуктов сгорания топлива передается воздуху, температура которого повышается от $t_1 = 20$ °С до $t_2 = 350$ °С при $p = \text{const} = 990$ гПа. Определить объем нагретого воздуха и изменение его внутренней энергии за 1 ч, а также массовый расход (кг/ч) продуктов сгорания, если объемный расход воздуха, отнесенный к н. у., составляет $V_B^H = 8000$ м³/ч, изменение температуры продуктов сгорания в теплообменнике $\Delta t_r = 350$, а средняя теплоемкость продуктов сгорания $c_{pr} = 1,12$ кДж/(кг·К).

Решение. Массовый расход воздуха

$$M_B = p^H V_B^H / (R_B T^H) = 101,3 \cdot 8000 / (0,287 \cdot 273) = 10\,343 \text{ кг/ч.}$$

Объем нагретого воздуха

$$V_{2B} = M_B R T_2 / p = 10\,343 \cdot 0,287 (350 + 273) / 99 = 18\,680 \text{ м}^3/\text{ч.}$$

Изменение внутренней энергии воздуха

$$\Delta U_B = c_{vB} M_B (t_2 - t_1) = 0,71 \cdot 10\,343 (350 - 20) = 2,42 \cdot 10^6 \text{ кДж/ч.}$$

Количество теплоты, подводимое к воздуху,

$$Q = c_{pB} M_B (t_2 - t_1) = 1,005 \cdot 10\,343 (350 - 20) = 3,43 \cdot 10^6 \text{ кДж/ч.}$$

Расход продуктов сгорания определяется из условия

$$M_B c_{pB} \Delta T_B = M_r c_{pr} \Delta t_r,$$

откуда

$$M_r = Q / (c_{pr} \Delta T_r) = 3,43 \cdot 10^6 / (1,12 \cdot 350) = 8750 \text{ кг/ч.}$$

3.12. В теоретическом цикле (см. рис. 11.3) дизеля теплота подводится к рабочему телу последовательно в процессах $v = \text{const}$ (2-2') и $p = \text{const}$ (2'-3). Температура в начале процесса $v = \text{const}$ равна $t_1 = 530$ °С; молярный рас-

ход рабочего тела составляет 2,8 кмоль/ч; объемный расход при условии в начале процесса $v = \text{const}$ составляет 3,75 м³/ч. При подводе количества теплоты $Q_o + Q_p = 120$ МДж/ч давление в процессе $v = \text{const}$ увеличилось в 1,35 раза. Считая, что рабочее тело имеет физические свойства воздуха, определить, как изменяются параметры p_2 и T_2 в конце изохорного подвода теплоты, если в два раза уменьшить количество теплоты, подводимое изобарно, а общее подводимое количество теплоты оставить неизменным. Как изменится степень предварительного расширения v_3/v_2 ? Проанализировать полученные результаты.

3.13. На сжатие 5 кг азота (N_2) при $t = 100$ °С затрачена работа 1800 кДж. Определить давление и объем, занимаемый азотом в конце сжатия, если начальное давление $p_1 = 0,25$ МПа.

3.14. В процессе подвода теплоты рабочее тело (CO_2) расширяется в три раза при $t = 650$ °С $= \text{const}$ до давления 5 МПа. Определить начальные давление и плотность рабочего тела, а также подведенное количество теплоты, если массовый расход углекислого газа составляет 1000 кг/ч.

3.15. В компрессоре сжимается 300 м³/ч (н.у.) воздуха при $t = 30$ °С $= \text{const}$. Начальное давление воздуха 0,2 МПа, мощность, потребляемая компрессором, 12 кВт. Определить давление и плотность воздуха в конце сжатия и расход воды на охлаждение цилиндров, если вода нагревается на 20 К.

Решение. Массовый расход воздуха

$$M = p^H V^H / (RT^H) = 101,33 \cdot 300 / (0,287 \cdot 273) = 388 \text{ кг/ч} = 0,108 \text{ кг/с.}$$

Работа, затрачиваемая компрессором при изотермическом сжатии,

$$l_k = RT \ln(p_1/p_2) = N_k/M = 12/0,108 = 111,3 \text{ кДж/кг,}$$

откуда давление воздуха в конце сжатия

$$p_2 = p_1 e^{l_k/(RT)} = 0,2 e^{111,3/(0,287 \cdot 303)} = 0,72 \text{ МПа.}$$

Плотность воздуха в конце сжатия

$$\rho_2 = p_2/(RT) = 720/(0,287 \cdot 303) = 8,28 \text{ кг/м}^3.$$

Уравнение теплового баланса цилиндров компрессора $Mq = mc_B \Delta T_B$, откуда расход охлаждающей воды

$$m = Mq/(c_B \Delta T_B) = 0,108 \cdot 111,3/(4,19 \cdot 20) = 0,143 \text{ кг/с.}$$

Здесь $q = l = 111,3$ кДж/кг — количество теплоты, кото-

рое необходимо отвести от цилиндров компрессора; c_v и ΔT_v — теплоемкость и перепад температуры воды.

3.16. При изотермическом расширении 0,25 кг кислорода в цилиндре поршневой машины давление понижается от 12,5 до 5,6 МПа, а поршень перемещается на 50 мм. Определить температуру кислорода, подведенное количество теплоты и произведенную работу, если диаметр цилиндра равен 220 мм.

3.17. Воздух массой 1 кг при давлении $p_1 = 0,1$ МПа и температуре $t_1 = 30^\circ\text{C}$ сначала сжимается изотермически до давления $p_2 = 1$ МПа, затем расширяется при постоянном давлении до десятикратного объема, после чего, охлаждаясь при постоянном объеме, принимает первоначальное состояние. Определить параметры воздуха в начале и в конце каждого процесса, а также для каждого процесса изменение внутренней энергии и энтальпии, работу и количество теплоты. Изобразить изменение состояния воздуха в координатах v , p и s , T .

3.18. Воздух массой 0,5 кг при давлении $p_1 = 0,2$ МПа занимает объем $V_1 = 0,4$ м³. Воздух изотермически расширяется, а затем изохорически нагревается так, что в конечном состоянии его давление становится равным первоначальному. Суммарное количество теплоты, подводимое к газу в процессах $T = \text{const}$ и $v = \text{const}$, равно 370,5 кДж. Определить работу, совершенную воздухом в указанном процессе и параметры воздуха в конце изотермического расширения.

3.19. Воздух массой 1 кг при температуре $t_1 = -20^\circ\text{C}$ и давлении $p_1 = 0,1$ МПа адиабатно сжимается до давления $p_2 = 0,8$ МПа. Определить удельный объем воздуха и его температуру в конце сжатия и затраченную работу.

3.20. Воздух массой 1 кг при температуре $t_1 = 25^\circ\text{C}$ и давлении $p_1 = 0,102$ МПа адиабатно сжимается до давления $p_2 = 2$ МПа. Определить удельные изменения внутренней энергии и энтальпии воздуха, работу деформации и располагаемую работу.

3.21. Процесс расширения гелия (He) в турбине протекает адиабатно. Параметры гелия ($\mu_{\text{He}} = 4$) на входе $p_1 = 1$ МПа и $t_1 = 700^\circ\text{C}$; давление за турбиной $p_2 = 0,1$ МПа. Внутренний относительный к. п. д. турбины $\eta_{\text{oit}} = 0,86$. Действительная (на лопатках) мощность турбины $N = 40$ МВт. Определить температуру гелия на выходе из турбины t_2 и массовый расход гелия. Теплоемкость гелия $\mu c_p = 20,8$ кДж/(кмоль·К).

Решение. Температура гелия на выходе из турбины

$$T_2 = T_1 (p_2/p_1)^{(k-1)/k} = 973 (0,1/1,0)^{(1,67-1)/1,67} = 386 \text{ К.}$$

Теоретическая мощность турбины

$$N_T = N/\eta_{\text{oit}} = 40/0,86 = 46,5 \text{ МВт.}$$

Располагаемая работа

$$l_0 = i_1 - i_2 = c_p (T_1 - T_2) = (20,8/4) (973 - 386) = 3852 \text{ кДж/кг.}$$

Расход гелия

$$M = N_T/l_0 = 46,5 \cdot 10^3/3852 = 12 \text{ кг/с} = 43 \, 457 \text{ кг/ч.}$$

3.22. В газовой турбине адиабатно расширяется 1000 кг/ч воздуха от состояния $p_1 = 0,8$ МПа, $t_1 = 650^\circ\text{C}$ до $p_2 = 0,1$ МПа. Определить температуру воздуха на выходе из турбины, изменение внутренней энергии воздуха, проходящего через турбину за 1 с, и теоретическую мощность турбины.

3.23. Углекислый газ расширяется по адиабате в турбине, мощность которой равна 1000 кВт. Определить массовый расход углекислого газа, если его давление и температура на входе в турбину 0,32 МПа и 827°C , а давление на выходе 0,15 МПа. Какой будет мощность турбины, если вместо углекислого газа [$c_p = 1,13$ кДж/(кг·К)] в ней будет расширяться то же количество гелия [$c_p = 5,2$ кДж/(кг·К)] при тех же исходных данных?

3.24. Определить скорость вылета снаряда массой 2 кг, приобретаемую при адиабатном расширении пороховых газов в стволе орудия в 40 раз, и необходимую длину ствола, если диаметр ствола 80 мм. Считать, что после взрыва пороховые газы занимают объем $V_1 = 0,2$ л и имеют давление $p_1 = 8$ МПа. Показатель адиабаты $k = 1,4$.

3.25. Для создания в рабочем участке аэродинамической трубы скорости воздуха 600 м/с необходимо осуществить его адиабатное расширение от 0,4 до 0,1 МПа. До какой температуры нужно подогревать воздух перед соплом трубы, чтобы его температура в рабочем участке была равна 350 К? Какой должна быть мощность электрического нагревателя воздуха, если воздух нагревается при $p = \text{const}$ от начальной температуры 298 К? Площадь поперечного сечения трубы на рабочем участке равна 0,025 м².

3.26. В камере сгорания ГТУ рабочее тело расширяется изобарно, а затем в турбинном колесе адиабатно. Параметры рабочего тела в начале изобарного расширения $p_1 = 0,6$ МПа, $T_1 = 650$ К; в начале адиабатного расширения температура рабочего тела $T_2 = 923$ К; теоретическая мощность турбины $N_T = 740$ кВт, массовый расход ра-

бочего тела $M = 2$ кг/с. Определить изменение внутренней энергии и энтальпии рабочего тела, имеющего физические свойства воздуха. При каком давлении следует осуществлять процесс в камере сгорания, чтобы при тех же конечных параметрах рабочего тела получить мощность турбины 850 кВт?

Решение

$$MkR(T_2 - T_3)/(k - 1) = N_T,$$

откуда

$$T_3 = T_2 - N_T(k - 1)/(MkR) = 923 - 740(1,41 - 1)/(2 \cdot 1,41 \cdot 0,287) = 548 \text{ K};$$

$$\Delta U = Mc_v(T_3 - T_1) = 2 \cdot 0,71(548 - 650) = -144,8 \text{ кВт};$$

$$\Delta I = Mc_p(T_3 - T_1) = 2 \cdot 1,005(548 - 650) = -205,0 \text{ кВт};$$

$$p_3 = p_2(T_3/T_2)^{k/(k-1)} = 0,6/(548/923)^{1,41/(1,41-1)} = 0,1 \text{ МПа}.$$

Давление в камере сгорания, необходимое для увеличения мощности турбины,

$$MkRT[1 - (p_2'/p_3)^{(k-1)/k}]/(k-1) = -850,$$

откуда

$$p_2' = p_3[1 + 850(k-1)/(MkRT_3)]^{k/(k-1)} = 0,1[1 + 850 \times (1,41-1)/(2 \cdot 1,41 \cdot 0,287 \cdot 548)]^{1,41/(1,41-1)} = 0,734 \text{ МПа}.$$

3.27. В цилиндре ДВС воздух, имеющий температуру $t_1 = 17^\circ\text{C}$ и давление $p_1 = 0,1$ МПа, сжимается по адиабате, а затем при $p = \text{const}$; к нему подводится количество теплоты 150 кДж. В конце изобарного процесса температура $t_3 = 650^\circ\text{C}$. Определить степень адиабатного сжатия $\varepsilon = v_1/v_2$, давление $p_2 = p_3$ и работу адиабатного сжатия. Каким будет максимальное давление, если при полученной степени сжатия то же количество теплоты подвести по изохоре?

3.28. В поршневом детандере (расширительной машине) установки глубокого охлаждения политропно расширяется воздух от начального давления $p_1 = 20$ МПа и температуры $t_1 = 20^\circ\text{C}$ до конечного давления $p_2 = 1,6$ МПа. Показатель политропы $n = 1,25$. Определить параметры воздуха в конце расширения, удельные значения изменения внутрен-

ней энергии и энтальпии, количества теплоты, работы процесса и располагаемой работы.

Решение. Параметры воздуха в конце расширения:

$$T_2/T_1 = (p_2/p_1)^{(n-1)/n}, \text{ откуда } T_2 = T_1(p_2/p_1)^{(n-1)/n} = 293(1,6/20)^{(1,25-1)/1,25} = 177 \text{ K};$$

$$v_2 = RT_2/p_2 = 0,287 \times 177/1600 = 0,032 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Изменение внутренней энергии и энтальпии

$$\Delta u = c_v(T_2 - T_1) = 0,71(177 - 293) = -82,4 \text{ кДж/кг};$$

$$\Delta i = c_p(T_2 - T_1) = 1,005(177 - 293) = -116,6 \text{ кДж/кг}.$$

Количество теплоты

$$q = c_v(n - k)(T_2 - T_1)/(n - 1) = 0,71(1,25 - 1,41) \times (177 - 293)/(1,25 - 1) = 52,7 \text{ кДж/кг}.$$

Работа процесса

$$l = R(T_1 - T_2)/(n - 1) = 0,287(293 - 177)/(1,25 - 1) = 133 \text{ кДж/кг}.$$

Располагаемая работа

$$l_0 = nl = 1,25 \cdot 133 = 166,4 \text{ кДж/кг}.$$

3.29. Воздух, расширяясь, проходит через следующие состояния: 1) $p_1 = 1000$ гПа, $t_1 = 0^\circ\text{C}$; 2) $p_2 = 1000$ кПа, $v_2 = 0,1$ м³/кг; 3) $v_3 = 0,13$ м³/кг, $t_3 = 180^\circ\text{C}$; 4) $p_4 = 1,5$ МПа, $v_4 = 0,087$ м³/кг. Для процессов 1-2, 2-3 и 3-4 определить значения показателя политропы и указать название процесса и алгебраический знак работы.

3.30. Два процесса характеризуются показателями политропы: 1) $n = 1,7$; 2) $n = 0,7$. Какому значению n соответствует повышение температуры газа при сжатии и какому — понижение? Во сколько раз понизится температура в одном из указанных процессов сжатия при изменении давления в 5 раз?

3.31. Определить показатель политропы, отведенное количество теплоты, среднюю массовую теплоемкость процесса, изменение внутренней энергии и затраченную работу, если в результате сжатия 18 м³ воздуха от давления $p_1 = 0,1$ МПа до давления $p_2 = 0,8$ МПа объем его уменьшился в 6 раз.

3.32. В политропном процессе заданы начальные параметры 1 кг воздуха: $p_1 = 0,1$ МПа; $t_1 = 0^\circ\text{C}$, и конечные: $p_2 = 0,8$ МПа и $v_2 = 0,14$ м³/кг. Определить показатель

политропы n , количество теплоты q , изменение внутренней энергии Δu , изменение энтальпии Δi , работу деформации l ; располагаемую работу l_0 и изменение энтропии Δs .

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

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

Решение. Теплоемкость политропного процесса

$$\mu c = Q / [n_{\text{He}} (t_2 - t_1)] = (-3000) / [2 (127 - 227)] = 15 \text{ кДж/(кмоль·К)}.$$

Показатель политропы

$$n = [\mu c - (\mu c_v + \mu R)] / (\mu c - \mu c_v) = [15 - (12,5 + 8,314)] / (15 - 12,5) = 2,33.$$

Начальные и конечные параметры газа:

$$v_1 = R (t_1 + 273) / p_1 = 8,314 (227 + 273) / (4 \cdot 150) = 6,93 \text{ м}^3/\text{кг};$$

$$p_2 = p_1 (T_2 / T_1)^{n / (n-1)} = 0,15 / (400 / 500)^{2,33 / (2,33-1)} = 0,101 \text{ МПа};$$

$$v_2 = R (t_2 + 273) / p_2 = 8,314 (127 + 273) / (4 \cdot 101) = 8,23 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Изменение внутренней энергии и энтальпии:

$$\Delta U = \mu c_v n_{\text{He}} (t_2 - t_1) = 12,5 \cdot 2 (127 - 227) = -2500 \text{ кДж};$$

$$\Delta I = \mu c_p n_{\text{He}} (t_2 - t_1) = (12,5 + 8,314) 2 (127 - 227) = -4163 \text{ кДж}.$$

Работа процесса и располагаемая работа:

$$L = Q - \Delta U = -3000 + 2500 = -500 \text{ кДж};$$

$$L_0 = nL = 2,33 (-500) = -1165 \text{ кДж}.$$

Изменение энтропии

$$\Delta S = \mu c_{p_{\text{He}}} \ln (T_2 / T_1) = 15 \cdot 2 \ln (400 / 500) = -6,70 \text{ кДж/К}.$$

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

3.36. Определить располагаемую работу L_0 (МДж/ч), совершаемую при расширении продуктов сгорания в турбине, и плотность газов на выходе из турбины, если расширение происходит по политропе от $p_1 = 2$ МПа, $T_1 = 950$ К до $p_2 = 0,1$ МПа, а объем продуктов сгорания увеличивается в 7 раз. Состав продуктов сгорания на 1 кг топлива $n_{\text{CO}_2} = 0,0717$ кмоль/кг; $n_{\text{H}_2\text{O}} = 0,0685$ кмоль/кг; $n_{\text{O}_2} = 0,741$ кмоль/кг; $n_{\text{N}_2} = 3,18$ кмоль/кг. Расход топлива 5 кг/ч.

3.37. В некотором процессе начальные параметры воздуха массой 1 кг: $p_1 = 0,1$ МПа и $t_1 = 30$ °С, конечное давление $p_2 = 0,3$ МПа; отношение количества теплоты процесса к работе составляет 6,5. Определить температуру воздуха в конечном состоянии и массовую теплоемкость процесса.

3.38. Показать, что в логарифмической системе координат политропа является прямой.

3.39. Построить политропный процесс в координатах v, p , перенося промежуточные точки политропы из логарифмических координат $\lg v, \lg p$ (см. задачу 3.38). Начальные параметры газа $p_1 = 0,1$ МПа; $t_1 = 0$ °С; конечные $t_2 = 160$ °С, $v_2 = 0,35$ м³/кг. Газовая постоянная $R = 0,298$ кДж/(кг·К).

3.40. Построить политропу для воздуха в координатах s, T по двум крайним и трем промежуточным точкам, выбрав масштабы температуры и энтропии. Начальные параметры воздуха $p_1 = 0,2$ МПа, $t_1 = 30$ °С; конечные $p_2 = 1,2$ МПа, $v_2 = 0,10$ м³/кг.

Решение. В координатах s, T выбираем масштабы энтропии и температуры (рис. 3.1). Произвольно выбираем

положение точки 1 с ординатой $T_1 = 303$ К, которая при дальнейшем построении будет служить началом отсчета энтропии.

Температура в точке 2

$$T_2 = p_2 v_2 / R = 1200 \cdot 0,1 / 0,287 = 418 \text{ К.}$$

Показатель политропы процесса 1-2

$$n = \ln(p_2/p_1) / \ln(v_1/v_2) = \ln(p_2/p_1) / \ln[RT_1/(p_1 v_2)] = \\ = \ln(1,2/0,2) / \ln[0,287 \cdot 303 / (200 \cdot 0,1)] = 1,22.$$

Полное изменение энтропии в процессе 1-2

$$\Delta s_{1-2} = c_p (n - k) \ln(T_2/T_1) / (n - 1) = [0,71 (1,22 - 1,41) \times \\ \times \ln(418/303)] / (1,22 - 1,0) = -0,197 \text{ кДж/(кг·К).}$$

Так как $\Delta s_{1-2} < 0$, то соответствующий отрезок откладывается влево от точки 1 и точка 2 находится на пересечении линий $T_2 = 418$ К и $s_2 = \text{const}$.

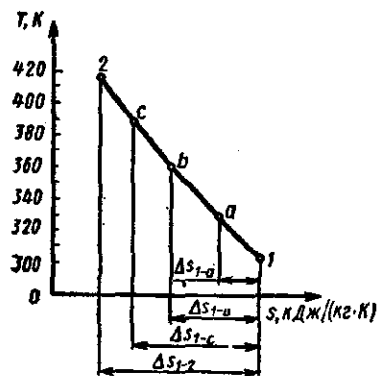


Рис. 3.1

Для построения промежуточных точек процесса в интервале температур T_1, T_2 выбираем три значения T_a, T_b и T_c и подсчитываем соответствующие изменения энтропии по формуле

$$\Delta s_{1-i} = c_p (n - k) \ln(T_i/T_1) / (n - 1),$$

где $T_i = T_a, T_b$ или T_c .
Например, $T_a = 330$ К,
 $T_b = 360$ К; $T_c = 390$ К.
Результаты расчетов [кДж/

(кг·К)]: $\Delta s_{1-a} = -0,052$; $\Delta s_{1-b} = -0,106$; $\Delta s_{1-c} = -0,155$.
Построение политропы показано на рис. 3.1.

3.41. Процесс сжатия воздуха в двухступенчатом компрессоре происходит в такой последовательности: сначала воздух сжимается от состояния $p_1 = 0,1$ МПа, $t_1 = 17^\circ\text{C}$ по адиабате 1-2 до давления $p_2 = 0,3$ МПа, затем охлаждается по изобаре 2-3 до первоначальной температуры; далее давление повышается по политропе 2-3 с показателем $n = 1,2$, причем температура воздуха T_4 в конце политропного

сжатия оказывается на 20 % выше, чем при адиабатном сжатии в первой ступени. Определить давление p_4 в конце политропного сжатия и суммарное удельное количество теплоты, отведенное от воздуха в процессах сжатия и охлаждения.

§ 3.2. Газовые процессы при переменной теплоемкости

3.42. При политропном расширении 2 кг воздуха, имевшего начальную температуру 1273 К, совершена работа 1000 кДж, при этом внутренняя энергия уменьшилась на 1200 кДж. Определить знак и количество теплоты в этом процессе, конечную температуру, среднюю теплоемкость и показатель политропы: а) считая теплоемкость постоянной и равной теплоемкости при начальной температуре; б) учитывая зависимость теплоемкости от температуры и пользуясь табл. 2 Приложения; в) учитывая зависимость теплоемкости [кДж/(кг·К)] от температуры согласно формуле $c_p = 0,998 + 0,224 \cdot 10^{-3} t - 0,0291 \cdot 10^{-6} t^2$; г) используя табл. 3 Приложения.

Решение. Независимо от способа решения количество теплоты определяется по уравнению первого закона термодинамики: $Q = \Delta U + L = -1200 + 1000 = -200$ кДж (теплота отводится).

а) Учитывая молярную массу воздуха $\mu = 28,97$ кг/кмоль, по табл. 1 Приложения определяем массовые теплоемкости воздуха при температуре 1273 К (1000 °C):

$$c_p = \mu c_{p1000} / \mu = 35,01 / 28,97 = 1,208 \text{ кДж/(кг·К);}$$

$$c_v = c_p - \mu R / \mu = 1,208 - 8,314 / 28,97 = 0,921 \text{ кДж/(кг·К).}$$

Конечную температуру определяем по изменению внутренней энергии:

$$T_1 = T_1 + \Delta U / (mc_v) = 1273 + (-1200) / (2 \cdot 0,921) = \\ = 622 \text{ К.}$$

Теплоемкость в политропном процессе:

$$c = Q / [m (T_2 - T_1)] = (-200) / [2 \cdot (622 - 1273)] = \\ = 0,154 \text{ кДж/(кг·К).}$$

Показатель политропы можно определить, используя выражение для работы политропного процесса: $l = R \times (T_1 - T_2)/(n - 1)$, откуда

$$n = 1 + mR (T_1 - T_2)/L = 1 + 2 \cdot 0,287 (1273 - 622)/1000 = 1,374.$$

Такое же значение получим, используя полученные ранее значения теплоемкостей:

$$n = (c - c_p)/(c - c_v) = (0,154 - 1,208)/(0,154 - 0,921) = 1,374.$$

б) Для нахождения конечной температуры воспользуемся зависимостью изменения внутренней энергии от температуры, выразив последнюю через среднюю изохорную теплоемкость:

$$\Delta u = c_v \int_{t_1}^{t_2} (t_2 - t_1) = c_v \int_0^{t_2} t_2 - c_v \int_0^{t_1} t_1.$$

Поскольку при переменной теплоемкости зависимость внутренней энергии от температуры нелинейна, температуру T_2 определяем методом последовательных приближений: находим изменение внутренней энергии для нескольких, например трех, значений конечной температуры в ожидаемом диапазоне, а затем графически или интерполяцией находим действительную конечную температуру, отвечающую действительному изменению внутренней энергии. Поскольку в используемых таблицах температура выражена в градусах Цельсия, промежуточные расчеты выполняем в этих единицах.

Средняя теплоемкость при начальной температуре $t_1 = 1000^\circ\text{C}$

$$c_v \int_0^{1000} = \left(\mu c_p \int_0^{1000} - \mu R \right) / \mu = (32,113 - 8,314)/28,97 = 0,822 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{K}).$$

Средние теплоемкости при предполагаемых конечных температурах $t_2' = 200^\circ\text{C}$, $t_2'' = 300^\circ\text{C}$ и $t_2''' = 400^\circ\text{C}$:

$$c_v \int_0^{200} = 0,725 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{K}); \quad c_v \int_0^{300} = 0,738 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{K});$$

$$c_v \int_0^{400} = 0,741 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{K}).$$

Соответствующие изменения удельной внутренней энергии:

$$\Delta u \int_{1000}^{200} = c_v \int_0^{200} 200 - c_v \int_0^{1000} 1000 = 0,725 \cdot 200 - 0,822 \times$$

$$\times 1000 = -677 \text{ кДж}/\text{кг}; \quad \Delta u \int_{1000}^{300} = -602,4 \text{ кДж}/\text{кг};$$

$$\Delta u \int_{1000}^{400} = 525,6 \text{ кДж}/\text{кг}.$$

Действительное изменение удельной внутренней энергии составляет $\Delta u = \Delta U/m = -1200/2 = -600 \text{ кДж}/\text{кг}$, следовательно, конечная температура находится между значениями $t_2' = 300^\circ\text{C}$ и $t_2'' = 400^\circ\text{C}$. Находим эту температуру линейной интерполяцией:

$$t_2 = t_2' + (t_2'' - t_2') \frac{\Delta u \int_{1000}^{t_2'} - \Delta u \int_{1000}^{t_2''}}{\Delta u \int_{1000}^{t_2'} - \Delta u \int_{1000}^{t_2''}} = 300 +$$

$$+ 100 \frac{(-600) - (-602,4)}{(-525,6) - (-602,4)} = 303^\circ\text{C}; \quad T_2 = 576 \text{ K}.$$

Средняя массовая теплоемкость политропного процесса

$$c = Q/[m (t_2 - t_1)] = -200/[2 (303 - 1000)] = 0,143 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{K}).$$

Показатель политропы

$$n = 1 + R (T_1 - T_2)/l = 1 + 0,287 (1273 - 576)/500 = 1,4.$$

в) Найдем изменение внутренней энергии воздуха для трех предполагаемых значений конечной температуры, используя формулу

$$\Delta u \int_{t_1}^{t_2} = \int_{t_1}^{t_2} c_v dt = \int_{t_1}^{t_2} (c_p - R) dt = \int_{t_1}^{t_2} [(0,988 - 0,287) +$$

$$+ 0,224 \cdot 10^{-3} t - 0,0291 \cdot 10^{-6} t^2] dt = 0,711 (t_2 - t_1) +$$

$$+ 0,112 \cdot 10^{-3} (t_2^2 - t_1^2) - 0,0097 \cdot 10^{-6} (t_2^3 - t_1^3).$$

Для конечных температур $t_2' = 200^\circ\text{C}$, $t_2'' = 300^\circ\text{C}$ и $t_2''' = 400^\circ\text{C}$ получим соответственно $\Delta u \int_{1000}^{200} = -666,7 \text{ кДж}/\text{кг}$, $\Delta u \int_{1000}^{300} = -590,2 \text{ кДж}/\text{кг}$ и $\Delta u \int_{1000}^{400} = -511,6 \text{ кДж}/\text{кг}$.

Действительную конечную температуру определим интерполяцией между 200 и 300 °C:

$$t_2 = t'_2 + (t''_2 - t'_2) \frac{\Delta u|_{t'_2} - \Delta u|_{t'_1}}{\Delta u|_{t''_2} - \Delta u|_{t'_1}} = 200 + \\ + 100 \frac{(-600) - (-666,7)}{(-590,2) - (-666,7)} = 287^\circ\text{C}; \quad T_2 = 560 \text{ K}.$$

Теплоемкость процесса

$$c = Q/[m (T_2 - T_1)] = -200/[2 (560 - 1273)] = 0,140$$

кДж/(кг·К).

Показатель политропы

$$n = 1 + R (T_1 - T_2)/l = 1 + 0,287 (1273 - 560)/500 = \\ = 1,41.$$

г) По табл. 3 Приложения находим удельную внутреннюю энергию воздуха u_1 при начальной температуре и, прибавляя изменение удельной внутренней энергии в процессе, определяем конечное значение удельной внутренней энергии:

$$u_2 = u_1 + \Delta U/m = 988,5 + (-1000)/2 = 398,5 \text{ кДж/кг}.$$

По той же таблице, интерполируя, находим конечную температуру, соответствующую этому значению внутренней энергии:

$$t_2 = 280^\circ\text{C}; \quad T_2 = 553 \text{ K}.$$

Средняя массовая теплоемкость

$$c = Q/[m (T_2 - T_1)] = (-200)/[2 (553 - 1273)] = \\ = 0,139 \text{ кДж/(кг·К)}.$$

Показатель политропы

$$n = 1 + R (T_1 - T_2)/l = 1 + 0,287 (1273 - 553)/ \\ /500 = 1,41.$$

3.43. В регенераторе ГТУ воздух подогревается при постоянном давлении от 428 до 598 К. Пользуясь табл. 2 Приложения, определить количество теплоты, полученной воздухом, и изменение удельной внутренней энергии, если расход воздуха составляет 45 кг/с.

3.44. При сгорании горячей смеси в цилиндре ДВС выделяется 0,83 кДж теплоты. Считая, что горение происхо-

дит при постоянном объеме, равно 109 см³, и что свойства смеси такие же, как у воздуха, определить теоретическую температуру в конце сгорания. Начальное давление смеси 1,3 МПа, температура 645 К.

3.45. В камере сгорания ГТУ к воздуху подводится теплота при постоянном давлении, в результате чего температура воздуха повышается с 450 до 1000 К. Найти подведенное удельное количество теплоты: а) считая теплоемкость воздуха постоянной и равной ее значению при начальной температуре; б) учитывая зависимость истинной теплоемкости [кДж/(кг·К)] от температуры по формуле $c_p = 0,935 + + 0,24 \cdot 10^{-3} T - 0,0291 \cdot 10^{-6} T^2$; в) используя табл. 3 Приложения.

Решение. а) По табл. 3 Приложения при начальной температуре 177 °C находим $c_p = 1,021$ кДж/(кг·К). Тогда

$$q_p = c_p (T_2 - T_1) = 1,021 (1000 - 450) = 561,6 \text{ кДж/кг};$$

$$\text{б) } q_p = \int_{T_1}^{T_2} c_p(T) dT = \int_{450}^{1000} (0,935 + 0,24 \cdot 10^{-3} T - \\ - 0,0291 \cdot 10^{-6} T^2) dT = 0,935 (1000 - 450) + 0,12 \cdot 10^{-3} \times \\ \times (1000^2 - 450^2) - 0,0097 \cdot 10^{-6} (1000^3 - 450^3) = \\ = 601,1 \text{ кДж/кг};$$

$$\text{в) } q_p = i_2 - i_1 = 1046,1 - 451,9 = 594,2 \text{ кДж/кг}.$$

3.46. На сжатие 3 кг метана в политропном процессе затрачено 1100 кДж работы, при этом внутренняя энергия увеличилась на 900 кДж. Определить знак и количество теплоты в этом процессе, найти конечную температуру газа, среднюю массовую теплоемкость и показатель политропы процесса сжатия, если начальная температура 30 °C. Зависимость изохорной молярной теплоемкости [кДж/(кмоль × К)] метана от температуры (К) аппроксимируется формулой $\mu c_v = 9,14 + 60,46 \cdot 10^{-3} T - 1,117 \cdot 10^{-6} T^2 - 7,20 \times \times 10^{-9} T^3$.

3.47. В процессе сжатия в цилиндре компрессора над воздухом совершается работа 18 кДж/кг и отводится количество теплоты 27 кДж/кг. Используя табл. 3 Приложения, определить, на сколько повысится температура при сжатии, если начальная температура 20 °C.

3.48. При сжатии 0,05 кг углекислого газа затрачено 10 кДж работы, при этом температура повысилась с 30 до 250 °C. Определить изменение внутренней энергии и энтальпии, знак и количество теплоты, а также среднюю массо-

вую теплоемкость газа в данном процессе. Использовать таблицы термодинамических свойств газов [16].

3.49. Азот подвергается изэнтропному сжатию от начального давления $p_1 = 0,1$ МПа и температуры $T_1 = 400$ К до давления $p_2 = 10$ МПа. Определить конечную температуру азота: а) считая, что теплоемкость $c_p = 1,06$ кДж/(кг·К) не зависит от температуры; б) из условия постоянства энтропии, используя зависимость энтропии от температуры и давления из таблиц стандартных справочных данных [18].

3.50. Получить уравнение изэнтропного процесса для азота в переменных T , p и решить предыдущую задачу, используя полученное уравнение. Считать, что массовая теплоемкость [кДж/(кг·К)] азота зависит от температуры (К) согласно уравнению

$$c_p = 0,99 + 0,17 \cdot 10^{-3} T.$$

Решение. Чтобы получить требуемое уравнение, воспользуемся выражением для дифференциала энтропии идеального газа: $ds(T, p) = c_p (dT/T) - R (dp/p)$. Подставив в это выражение зависимость теплоемкости от температуры и приравняв его (для изэнтропного процесса) нулю, получим дифференциальное уравнение адиабаты для азота

$$(0,99 + 0,17 \cdot 10^{-3} T) (dT/T) = R (dp/p).$$

Интегрируя, получаем

$$0,99 \ln T + 0,17 \cdot 10^{-3} T = R \ln p + \ln (\text{const}).$$

Записав это уравнение для начального ($p_1 = 0,1$ МПа, $T_1 = 400$ К) и конечного ($p_2 = 10$ МПа, $T_2 = ?$) состояний, получим уравнение для нахождения T_2 :

$$0,99 \ln T_2 + 0,17 \cdot 10^{-3} T_2 = 7,416.$$

Решая это уравнение графически или методом итераций, находим $T_2 = 1340$ К (результат отличается от более точного, полученного по таблицам в предыдущей задаче, из-за того, что для теплоемкости было принято упрощенное уравнение, имеющее сравнительно малую точность).

3.51. При изэнтропном расширении водорода от начального давления 1,2 МПа и начальной температуры 1760 К температура понижается до 500 К. Получить уравнение адиабаты в переменных T , p и найти конечное давление расширения, если зависимость изобарной теплоемкости

[кДж/(кг·К)] водорода от температуры выражается уравнением

$$c_p = 14,55 - 0,733 \cdot 10^{-3} T + 1,153 \cdot 10^{-6} T^2.$$

3.52. При нагревании количества вещества азота 2 кмоль от температуры 120 К при постоянном давлении 1 МПа подводится 72 МДж теплоты. Определить конечную температуру, изменение энтальпии, внутренней энергии и энтропии, используя таблицы термодинамических свойств азота [18].

Решение. При постоянном давлении изменение энтальпии равно количеству теплоты, поэтому изменение массовой энтальпии составит

$$\Delta i = \Delta I/m = \Delta I/(\mu M) = 72 \cdot 10^6 / (28 \cdot 2) = 1286 \text{ кДж/кг}.$$

Используя [18], находим

$$i_2 = i_1 + \Delta i = 358,5 + 1286 = 1644,5 \text{ кДж/кг},$$

чему соответствует конечная температура $T_2 = 1269$ К. Изменение внутренней энергии:

$$\Delta u = \Delta i - \Delta (pv) = \Delta i - p (1/\rho_2 - 1/\rho_1) = 1286 - 1 \cdot 10^6 (1/2,651 - 1/32,11) = 940 \text{ кДж/кг},$$

где ρ_2 и ρ_1 — плотность азота при конечной и начальной температурах.

Изменение энтропии

$$\Delta s = s_2 - s_1 = 7,743 - 5,134 = 2,609 \text{ кДж/(кг·К)}.$$

3.53. Для надежного воспламенения топлива в цилиндре двигателя с воспламенением от сжатия температура воздуха в конце адиабатного изэнтропного сжатия должна быть не ниже 1073 К. Определить минимально необходимую степень сжатия и конечное давление, если начальные давление и температура воздуха в цилиндре составляют соответственно 0,12 МПа и 373 К. Сравнить результаты с теми, которые получаются при расчете с постоянным значением показателя адиабаты $k = 1,4$.

Решение. В табл. 4 Приложения приведены безразмерные величины π_0 и θ_0 , позволяющие определять изменение объема и давления по заданному изменению температуры в ходе изэнтропного сжатия, не прибегая к последовательным приближениям. Если T_1 и T_2 — температуры в начале и конце процесса, то $p_2/p_1 = \pi_{02}/\pi_{01}$ и $v_2/v_1 =$

$= \theta_{02}/\theta_{01}$. Используя данные, приведенные в таблицах, находим для $T_1 = 373 \text{ К}$: $\pi_{01} = 2,9798$; $\theta_{01} = 3666$; для $T_2 = 1073 \text{ К}$: $\pi_{02} = 151,21$; $\theta_{02} = 207,73$.

Минимальная степень сжатия определится как $\varepsilon = v_1/v_2 = \theta_{01}/\theta_{02} = 3666/207,73 = 17,65$.

Конечное давление составит $p_2 = p_1 (p_2/p_1) = p_1 \times (\pi_{02}/\pi_{01}) = 0,12 (151,21/2,9798) = 6,01 \text{ МПа}$.

При расчете с постоянным значением показателя адиабаты получим:

$$\varepsilon = v_1/v_2 = (T_2/T_1)^{1/(k-1)} = (1073/373)^{1/(1,4-1)} = 14,0;$$

$$p_2 = p_1 (T_2/T_1)^{k/(k-1)} = 0,12 (1073/373)^{1,4/(1,4-1)} =$$

$$= 4,85 \text{ МПа}.$$

3.54. В газовой турбине продукты сгорания, обладающие свойствами воздуха, расширяются адиабатно и изотропно от давления 1,2 МПа и температуры 973 К до давления 0,11 МПа. Пользуясь табл. 4 Приложения, определить конечную температуру, изменение энтальпии при расширении и теоретическую мощность газовой турбины при расходе продуктов сгорания 120 кг/с.

ГЛАВА 4

ВТОРОЙ ЗАКОН ТЕРМОДИНАМИКИ

§ 4.1. Термодинамический анализ циклов

4.1. Прямой цикл Карно (рис. 4.1) состоит из четырех обратимых процессов: двух изотермических $a-b$, $d-c$ и двух адиабатных $a-d$, $b-c$. В тепловой машине, работающей по этому циклу, подвод теплоты от высшего источника осуществляется при 1200 К, а отвод к низшему — при 300 К. Какая доля подводимого количества теплоты расходуется на совершение работы и какая отводится к низшему источнику теплоты?

4.2. Рабочим телом в ГТУ является воздух. Цикл (рис. 4.2) характеризуется степенью повышения давления, равной 8, и степенью предварительного расширения, равной 2,5. Какая доля подводимого количества теплоты расходуется на совершение работы и какая отводится к низшему тепловому источнику? При каких температурах высшего и низшего тепловых источников к. п. д. цикла Карно

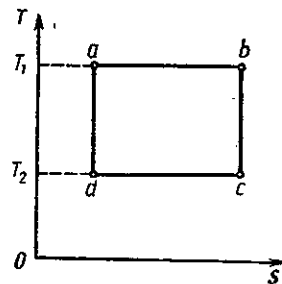


Рис. 4.1

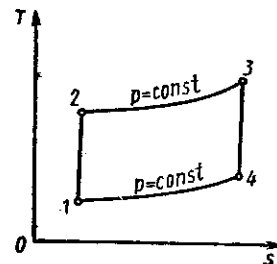


Рис. 4.2

будет равен термическому к. п. д. ГТУ, если известно, что температура воздуха в конце процесса сжатия в компрессоре (процесс 1-2) составляет 600 К?

Решение. Термический к. п. д. представляет отношение работы цикла к подведенной в процессе 2-3 теплоте: $\eta_t = l_n/q_{2-3}$. Для ГТУ он может быть определен через степень повышения давления $\pi_k = p_2/p_1$ по формуле: $\eta_t = 1 - 1/\pi_k^{(k-1)/k} = 1 - 1/8^{(1,4-1)/1,4} = 0,454$. Это означает, что 45,4 % подведенного количества теплоты идет на совершение работы.

Поскольку известны степень предварительного расширения $\rho = v_3/v_2 = v_4/v_1$, связь между параметрами v и T для изобарных процессов 2-3 и 1-4 $v_3/v_2 = T_3/T_2$; $v_4/v_1 = T_4/T_1$ и связь между параметрами p и T для адиабатного процесса 1-2 $T_2/T_1 = (p_2/p_1)^{(k-1)/k}$, можно рассчитать температуры в точках 1, 3 и 4 цикла ГТУ:

$$T_1 = T_2 / (p_2/p_1)^{(k-1)/k} = 600 / (8)^{(1,4-1)/1,4} = 327,8 \text{ К};$$

$$T_3 = T_2 (v_3/v_2) = 600 \cdot 2,5 = 1500 \text{ К};$$

$$T_4 = T_1 (v_4/v_1) = 327,8 \cdot 2,5 = 819 \text{ К}.$$

К. п. д. цикла Карно будет одинаковым с термическим к. п. д. ГТУ в том случае, если температуры высшего и низшего тепловых источников в цикле Карно будут равны среднеинтегральным температурам:

$$T_{1cp} = (T_3 - T_2) / \ln (T_3/T_2) = (1500 - 600) / \ln (1500/600) = 982,2 \text{ К};$$

$$T_{2cp} = (T_4 - T_1) / \ln (T_4/T_1) = (819,5 - 327,8) / \ln (819,5/327,8) = 536,6 \text{ К},$$

что подтверждается и проверкой

$$\eta_{\text{н.к}} = 1 - (T_{2\text{cp}}/T_{1\text{cp}}) = 1 - (536,6/982,2) = 0,454 = \eta_{\text{ГТУ}}.$$

4.3. Учитывая, что экономичность работы любой теплоэнергетической установки, в которой реализовывались бы обратимые циклы Карно, зависит только от температуры высшего и низшего тепловых источников и не зависит от свойств рабочего тела, найти выражения для термического к. п. д., холодильного и отопительного коэффициентов.

4.4. Используя полученные в предыдущей задаче выражения для термического к. п. д. и холодильного коэффициента, исследовать влияние на них температур высшего и низшего тепловых источников.

4.5. Эффективный к. п. д. ДВС (с учетом всех потерь и отклонений реального процесса от теоретического) отличается от термического к. п. д. цикла Карно на 30%. Определить диапазон изменения эффективного к. п. д. ДВС, если температура сгорания топлива 1800°C , а двигатель эксплуатируется при температуре окружающей среды $\pm 50^\circ\text{C}$.

4.6. В регенеративном цикле 1-2-3-4 (рис. 4.3), состоящем из двух изотермических и двух произвольных, но одинаковых по природе процессов, количество теплоты, от-

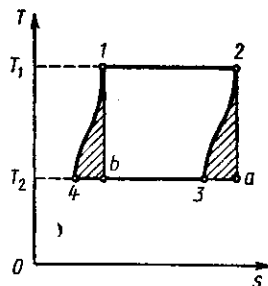


Рис. 4.3

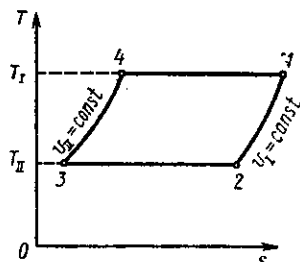


Рис. 4.4

водимое от рабочего тела в процессе 2-3, полностью возвращается к рабочему телу в процессе 4-1. Показать, что к. п. д. этого обратимого цикла равен термическому к. п. д. цикла Карно.

Решение. Из равенства площадей 23a2 и 14b1 следует, что данный произвольный цикл 1-2-3-4 может быть трансформирован в цикл 1-2-a-b, который является циклом Карно. Для него можно записать: $\eta_1 = 1 - (T_2/T_1)$, что и требовалось доказать.

4.7. Универсальная тепловая машина, цикл которой представлен на рис. 4.4, может работать как двигатель, как тепловой насос и как холодильник. Указать пути увеличения к. п. д. цикла.

4.8. Определить удельную работу цикла холодильной машины, работающей по обратимому циклу Карно, необходимую для отвода 30 кДж теплоты от рабочего тела, имеющего температуру -30°C , в окружающую среду с температурой 25°C ? Чему равен холодильный коэффициент машины?

4.9. В отопительной системе ОС (рис. 4.5) тепловой двигатель ТД приводит в действие холодильную машину ХМ, отбирающую теплоту от природного теплового источника ПТИ. Вода в отопительной системе ОС, нагреваемая за счет теплоты, отводимой от двигателя и от холодильной машины, является одновременно холодильником для тепловой и термостатом высокой температуры для холодильной машины. Какую массу топлива необходимо сжечь в топке теплового двигателя, чтобы количество теплоты, поступающее в отапливаемое помещение, составляло 10^6 кДж за цикл? Известно, что температура в котле паровой машины 300°C , в отопительной системе 65°C . Температура грунтовой воды 5°C . Тепловорная способность топлива $43 \cdot 10^3$ кДж/кг.

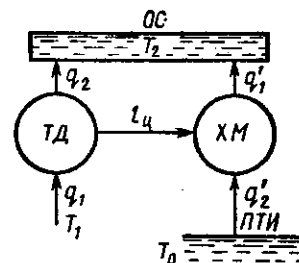


Рис. 4.5

4.10. Для условий предыдущей задачи определить, в каком соотношении находятся между собой количества теплоты, подводимой при сгорании топлива и отбираемой холодильной машиной от природного резервуара (рис. 4.5).

Решение. Для рассматриваемой системы неравенство Клаузиуса записывается в виде

$$q_1/T_1 + q_2'/T_0 - (q_2 + q_1')/T_2 < 0.$$

Так как $q_2 + q_1' \leq q_1 + q_2'$, то эта замена приводит лишь к усилению неравенства, которое в этом случае может быть переписано следующим образом:

$$q_1/T_1 + q_2'/T_0 - (q_1 + q_2')/T_2 < 0.$$

Отсюда можно определить и отношение q_1/q_2' :

$$q_1/q_2' > T_0 (T_1 - T_2) / [T_1 (T_2 - T_0)] = 278 (573 - 338) / [573 (338 - 278)] = 1,9.$$

4.11. Тепловой насос работает по циклу Карно. Исследовать влияние температур высшего и низшего тепловых источников на отопительный коэффициент.

4.12. Найти математическую связь между отопительным и холодильным коэффициентами, а также между отопительным коэффициентом и термическим к. п. д.

4.13. Для переноса некоторого количества теплоты от низшего теплового источника НТИ с температурой T_0 к среднему тепловому источнику СТИ с температурой T_2 применяется понижающий трансформатор (рис. 4.6). Для

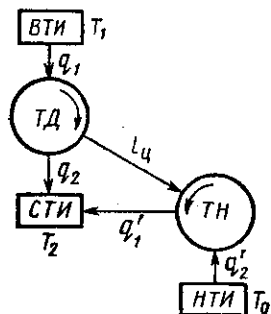


Рис. 4.6

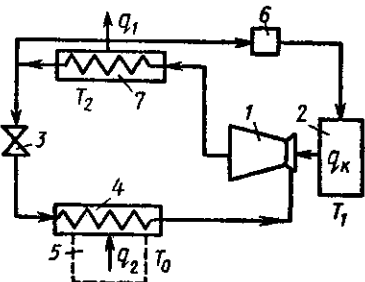


Рис. 4.7

осуществления этого переноса тепловой двигатель ТД расходует некоторое количество теплоты высшего теплового источника ВТИ при температуре T_1 и совершает работу, используемую для привода теплового насоса ТН. Определить коэффициент преобразования понижающего трансформатора ψ в виде отношения подведенного количества теплоты $q_1 + q_2'$ к количеству теплоты q_1 , затраченному высшим тепловым источником, и установить зависимость ψ от термического к. п. д. теплового двигателя и холодильного коэффициента теплового насоса.

4.14. Считая процессы, протекающие в понижающем трансформаторе теплоты (рис. 4.6), обратимыми, определить коэффициент преобразования трансформатора, если известно, что усредненные значения температур при подводе и отводе теплоты равны 600 и -20 °С соответственно, а усредненная температура потребителя 60 °С.

4.15. В пароводяной эжекторной холодильной установке (рис. 4.7) для сжатия хладагента используется эжектор 1, в котором эффект сжатия смеси достигается с помощью кинетической энергии пара, подаваемого из котла 2. Смесь, состоящая из пара хладагента, поступающего из испарите-

ля 4, и из водяного пара, вводимого из котла 2, направляется в конденсатор 7, где, охлаждаясь, полностью конденсируется и разделяется на два потока. Один, после дросселирования в вентиле 3, подается в испаритель 4, где и отбирает некоторое количество теплоты от охлаждаемого объема 5. Другой поток насосом 6 направляется в котел 2. Необходимо определить отношение, характеризующее степень термодинамического совершенства процессов, $\epsilon_{\text{действ}}/\epsilon_{\text{теорет}}$, если $\epsilon_{\text{действ}} = 0,68$, средняя температура пара в котле 150 °С, смеси в конденсаторе 35 °С и смеси в испарителе 7 °С.

4.16. Для преобразования некоторого количества теплоты среднего температурного потенциала с температурой T_2 в некоторое количество теплоты высокого потенциала с температурой T_1 применяется повышающий трансформатор (рис. 4.8). Конечным результатом действия теплового двигателя ТД, работающего в интервале температур $T_2 - T_0$, и теплового насоса ТН, работающего в интервале температур $T_1 - T_2$, является перенос теплоты от температурного

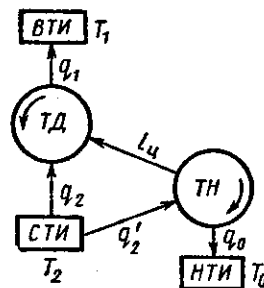


Рис. 4.8

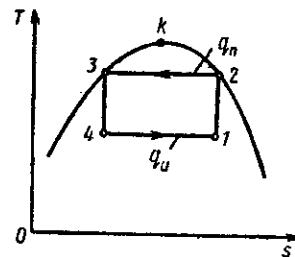


Рис. 4.9

уровня T_2 к температурному уровню T_1 . Определить коэффициент преобразования повышающего трансформатора ψ в виде отношения количества теплоты q_1 , полученного высшим тепловым источником, к количеству теплоты $q_1 + q_2'$ и установить зависимость ψ от термического к. п. д. теплового двигателя и холодильного коэффициента теплового насоса.

4.17. Тепловой насос работает по циклу, изображенному на рис. 4.9. В качестве хладагента используется аммиак. Определить количество теплоты, которое может быть получено в течение часа в результате преобразования теплоты

низкого температурного потенциала (-5°C) в теплоту более высокого температурного потенциала 25°C . Полученная теплота используется для отопления здания. Мощность, затрачиваемая на привод компрессора, 20 кВт.

Решение. Используя таблицы термодинамических свойств аммиака [4], получим: при $t_1 = t_4 = -5^{\circ}\text{C}$ $s_1' = 4,1022$ кДж/(кг·К); $s_1'' = 8,8756$ кДж/(кг·К), $r = 1279,5$ кДж/кг, при $t_3 = t_2 = t_n = 25^{\circ}\text{C}$ $s_2' = 8,5093$ кДж/(кг·К), $s_3' = 4,5954$ кДж/(кг·К).

Поскольку $s_2' = s_1' + (s_1'' - s_1')$ x_1 , степень сухости пара в точке 1

$$x_1 = (s_2' - s_1') / (s_1'' - s_1') = (8,5093 - 4,1022) / (8,8756 - 4,1022) = 0,9233.$$

Степень сухости пара в точке 4

$$x_4 = (s_3' - s_1') / (s_1'' - s_1') = (4,5954 - 4,1022) / (8,8756 - 4,1022) = 0,1033.$$

Количество теплоты, полученное для отопления здания при $t_n = 25^{\circ}\text{C}$,

$$q_n = i_2'' - i_3' = 1703,2 - 536,3 = 1166,9 \text{ кДж/кг.}$$

Количество теплоты, полученное хладагентом от окружающей среды при $t_1 = -5^{\circ}\text{C}$,

$$q_n = r (x_1 - x_4) = 1279,5 (0,9233 - 0,1033) = 1049,2 \text{ кДж/кг.}$$

Работа, затраченная в цикле,

$$l = q_n - q_n = 1049,2 - 1166,9 = -117,7 \text{ кДж/кг.}$$

Массовый расход аммиака

$$M = N / |l| = (20 \cdot 3600) / 117,7 = 611,7 \text{ кг/ч.}$$

Количество теплоты, получаемое для отопления здания в течение часа,

$$Q_n = q_n M = 1166,9 \cdot 611,7 = 713,8 \cdot 10^3 \text{ кДж/ч} = 713,8 \text{ МДж/ч.}$$

Таким образом, все искомые величины определены.

§ 4.2. Графический метод расчета процессов и циклов с помощью sT -диаграммы *

4.18. Воздух массой 1 кг с начальными температурой $t_1 = 27^{\circ}\text{C}$ и давлением $p_1 = 1 \cdot 10^5$ гПа нагревается при постоянном объеме до давления $p_2 = 1,4 \cdot 10^5$ гПа. Определить конечную температуру процесса T_2 , подведенное количество теплоты q и располагаемую работу l_0 .

Решение. На sT -диаграмме находим точку 1 — пересечение изобары $p = \text{const}$ и изотермы $T_1 = 300 \text{ K} = \text{const}$. Точке 1 соответствует изохора $v_1 = 0,9 \text{ м}^3/\text{кг}$ (рис. 4.10). Точка 2 находится на пересечении изохоры $v_1 = \text{const}$ и изобары $p_2 = \text{const}$. Этой точке соответствует температура $T_2 = 432 \text{ K}$. Точка 3 — пересечение изобары p_2 и изотермы T_1 .

По диаграмме определяем приращение энтропии

$$\Delta s_{1-2} = 0,273 \text{ кДж/(кг·К);}$$

$$\Delta s_p = 0,365 \text{ кДж/(кг·К).}$$

Количество подведенной теплоты

$$q \approx \Delta s_{1-2} (T_1 + T_2) / 2 = 0,273 (300 + 432) / 2 = 100 \text{ кДж/кг.}$$

Изменение энтальпии в процессе

$$\Delta i = \Delta s_p (T_1 + T_2) / 2 = 0,365 (300 + 432) / 2 = 134 \text{ кДж/кг.}$$

Располагаемая работа

$$l_0 = q - \Delta i = 100 - 134 = -34 \text{ кДж/кг.}$$

4.19. Воздух массой 1 кг с начальными температурой $t_1 = 0^{\circ}\text{C}$ и давлением $p_1 = 8 \cdot 10^5$ гПа нагревается при неизменном объеме до давления $p_2 = 12 \cdot 10^5$ гПа. Определить конечную температуру, количество подведенной теплоты и располагаемую работу.

* sT -диаграмма приведена на вкладке.

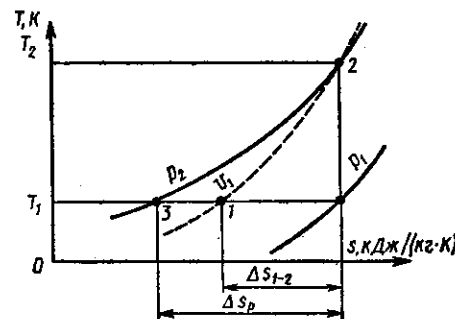


Рис. 4.10

4.20. Баллон со сжатым воздухом нагревается под действием солнечной радиации. Масса воздуха 60 кг, начальные параметры $p_1 = 30 \cdot 10^3$ гПа, $T_1 = 300$ К, конечная температура $T_2 = 370$ К. Определить подведенное количество теплоты.

4.21. Давление в баллоне со сжатым воздухом $p_1 = 1 \cdot 10^6$ гПа. Объем баллона 0,5 м³. Определить отведенное количество теплоты, если воздух в баллоне охладился от $t_1 = 80$ °С до $t_2 = 20$ °С.

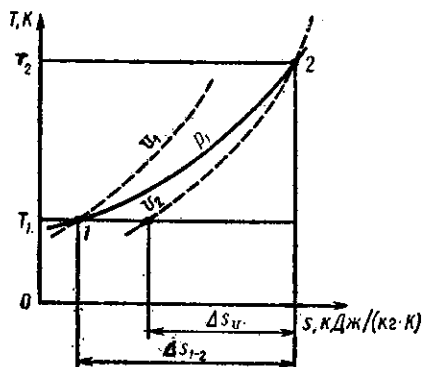


Рис. 4.11

Решение. По параметрам начального состояния воздуха p_1 и T_1 определяется положение точки 1 (рис. 4.11), через которую проходит изохора $v_1 = 0,016$ м³/кг; объем в конце процесса равен $v_2 = 1,5v_1 = 0,024$ м³/кг. Пересечение изохоры $v_2 = \text{const}$ и изобары $p_1 = \text{const}$ определяет положение точки 2, которой соответствует температура $T_2 = 412$ К. Приращение энтропии составляет $\Delta s_{1-2} = 0,42$ кДж/(кг·К), $\Delta s_v = 0,297$ кДж/(кг·К).

Подведенное количество теплоты

$$q = \Delta s_{1-2} (T_1 + T_2)/2 = 0,42 (273 + 412)/2 = 144 \text{ кДж/кг.}$$

Изменение удельной внутренней энергии

$$\Delta u = \Delta s_v (T_1 + T_2)/2 = 0,297 (273 + 412)/2 = 103 \text{ кДж/кг.}$$

Работа процесса

$$l = q - \Delta u = 144 - 103 = 41 \text{ кДж/кг.}$$

4.23. Воздух массой 1 кг при температуре $t_1 = 15$ °С и давлении $p_1 = 7 \cdot 10^3$ гПа расширяется изобарно до объема $v_2 = 0,2$ м³/кг. Определить конечную температуру, подведенное количество теплоты, изменение внутренней энергии и работу процесса.

4.24. Воздух массой 1 кг сжимается изобарно ($p_1 = 14 \cdot 10^3$ гПа) от начального объема $v_1 = 0,1$ м³/кг до $v_2 = 0,07$ м³/кг. Определить перепад температур в процессе, отведенное количество теплоты, изменение внутренней энергии и работу процесса.

4.25. Воздух после сжатия в компрессоре охлаждается в холодильнике при постоянном давлении $p_1 = 8 \cdot 10^3$ гПа от температуры $t_1 = 87$ °С до $t_2 = 17$ °С. Определить отводимое количество теплоты и изменение внутренней энергии для 1 кг воздуха.

4.26. К воздуху в ДВС подводится теплота при постоянном давлении $p_1 = 20 \cdot 10^3$ гПа. Начальная температура $T_1 = 450$ К, удельный объем воздуха в конце процесса $v_2 = 0,08$ м³/кг. Определить подведенное количество теплоты и работу процесса для 1 кг воздуха.

4.27. Воздух массой 1 кг при начальном давлении $p_1 = 16 \cdot 10^3$ гПа и температуре $t_1 = 177$ °С расширяется адиабатно до давления $p_2 = 4,5 \cdot 10^3$ гПа. Определить температуру воздуха в конце расширения, изменение внутренней энергии, работу процесса и располагаемую работу.

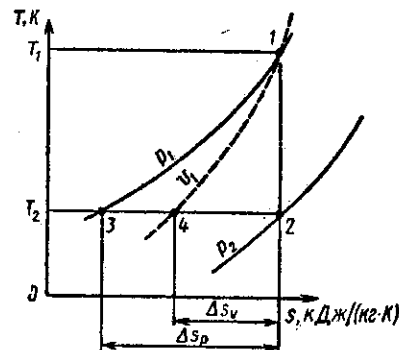


Рис. 4.12

Решение. По параметрам начального состояния воздуха p_1 и t_1 на sT -диаграмме находим точку 1 (рис. 4.12). Через эту точку проводим вертикальную линию (адиабату) до пересечения с изобарой p_2 . Полученной точке 2 соответствует температура $T_2 = 313$ К. Определяем величины $\Delta s_p = 0,366$ кДж/(кг·К) и $\Delta s_v = 0,268$ кДж/(кг·К).

Изменение внутренней энергии

$$\Delta u = u_2 - u_1 = \Delta s_v (T_1 + T_2)/2 = 0,268 (450 + 313)/2 = 102 \text{ кДж/кг.}$$

Работа процесса

$$l = -\Delta u = -102 \text{ кДж/кг.}$$

Располагаемая работа

$$l_0 = -\Delta i = -\Delta s_p (T_1 + T_2)/2 = -0,366 (450 + 313)/2 = -140 \text{ кДж/кг.}$$

4.28. Определить работу процесса и располагаемую работу адиабатного процесса для 1 кг воздуха, начальные параметры которого $p_1 = 6 \cdot 10^3$ гПа, $T_1 = 273$ К, конечное давление $p_2 = 20 \cdot 10^3$ гПа.

4.29. Определить изменение внутренней энергии и располагаемую работу адиабатного процесса для 1 кг воздуха, начальные параметры которого $v_1 = 0,14$ м³/кг, $t_1 = 250$ °С, конечная температура $t_2 = 100$ °С.

4.30. Определить изменение внутренней энергии, работу и располагаемую работу адиабатного процесса для 1 кг воздуха, начальные параметры которого $p_1 = 50 \cdot 10^3$ гПа, $T_1 = 550$ К, конечная температура $T_2 = 400$ К.

4.31. Сжатие воздуха в ДВС происходит адиабатно от начального давления $p_1 = 1 \cdot 10^3$ гПа при $t_1 = 15$ °С до давления $p_2 = 9 \cdot 10^3$ гПа. Определить располагаемую работу процесса сжатия для 1 кг воздуха.

4.32. В политропном процессе заданы следующие параметры: $p_1 = 1 \cdot 10^3$ гПа, $t_1 = 27$ °С, $p_2 = 1 \cdot 10^4$ гПа, $v_2 = 0,12$ м³/кг. Определить показатель политропы, подведенное количество теплоты, изменения внутренней энергии и энтальпии, работу процесса для 1 кг воздуха.

4.33. В политропном процессе заданы начальные и конечные параметры: $p_1 = 18 \cdot 10^3$ гПа, $v_1 = 0,06$ м³/кг, $t_2 = 200$ °С, $p_2 = 2 \cdot 10^4$ гПа. Определить n ; q ; Δu ; Δi ; l и l_0 .

4.34. Построить в sT -диаграмме политропу с параметрами $p_1 = 1 \cdot 10^3$ гПа, $t_1 = 0$ °С, $v_2 = 0,7$ м³/кг, $p_2 = 1,4 \times 10^3$ гПа. Определить показатель политропы, работу процесса и располагаемую работу.

4.35. Построить политропу в sT -диаграмме по следующим параметрам: $p_1 = 1 \cdot 10^4$ гПа, $t_1 = 50$ °С, $p_2 = 6 \cdot 10^3$ гПа, $n = 0,8$. Определить: q ; Δu ; Δi ; l ; l_0 .

4.36. Построить политропу в sT -диаграмме, если дано: $p_1 = 5 \cdot 10^4$ гПа, $t_1 = 250$ °С, $v_2 = 0,025$ м³/кг и $n = -0,58$. Определить q ; Δu ; Δi ; l ; l_0 . Изобразить этот процесс в координатах v , p .

4.37. В одноступенчатом идеальном компрессоре сжимается политропно 1 кг воздуха, взятый при температуре

$t_1 = 15$ °С и давлении $p_1 = 1 \cdot 10^3$ гПа. Конечное давление $p_2 = 16 \cdot 10^3$ гПа при $n = 1,2$. Определить, на сколько градусов понизится температура воздуха в конце сжатия, и экономии работы на сжатие, если процесс осуществить в двухступенчатом компрессоре при условии, что работа, затраченная в первой ступени, равна работе во второй ступени, а температура воздуха после сжатия в первой ступени изобарно понижается до первоначальной; показатели поли-

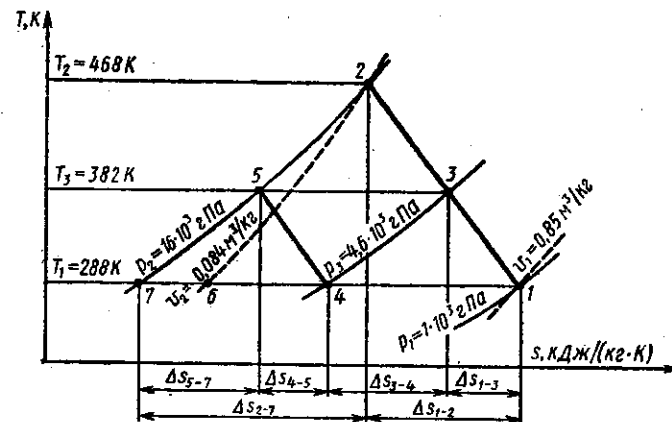


Рис. 4.13

тропы в одноступенчатом компрессоре и обеих ступенях двухступенчатого компрессора равны между собой.

Решение. На sT -диаграмме находим точку 2 (рис. 4.13), соответствующую состоянию воздуха в конце сжатия в одноступенчатом компрессоре. Для этого измеряем длину отрезка $1-7$; так как показатель политропы равен отношению отрезков $n = (1-7)/(1-6)$, то длина отрезка $(1-6) = (1-7)/1,2$. Отложив от точки 1 влево отрезок $1-6$, получаем точку 6, через которую проходит изохора $v_2 = 0,084$ м³/кг. Пересечение этой изохоры и изобары $p_2 = 16 \cdot 10^3$ гПа дает искомую точку 2. Полученной точке соответствует температура $T_2 = 468$ К.

По диаграмме определяем величины $\Delta s_{1-2} = -0,306$ кДж/(кг · К); $\Delta s_v = 0,355$ кДж/(кг · К); $\Delta s_p = 0,489$ кДж/(кг · К).

Далее рассчитывают значения:

$$q = \Delta s_{1-2} (T_1 + T_2)/2 = -0,306 (468 + 288)/2 = -116 \text{ кДж/кг;}$$

$$\Delta u = \Delta s_p (T_1 + T_2)/2 = 0,355 (468 + 288)/2 = 134 \text{ кДж/кг};$$

$$\Delta i = \Delta s_p (T_1 + T_2)/2 = 0,489 (468 + 288)/2 = 184 \text{ кДж/кг};$$

$$l_0 = q - \Delta i = -116 - 184 = -300 \text{ кДж/кг}.$$

По условию: $l_{0(1-3)} = l_{0(4-5)}$, но $l_{0(1-3)} = \Delta s_{1-3} (T_1 + T_3)/2 + \Delta s_p (3-4) (T_3 + T_4)/2$; $l_{0(4-5)} = \Delta s_{4-5} (T_4 + T_5)/2 + \Delta s_p (5-7) (T_5 + T_7)/2$. Поскольку $T_1 = T_4 = T_7$, а температуры T_3 и T_5 целесообразно выбрать равными, это означает, что $\Delta s_{1-3} + \Delta s_p (3-4) = \Delta s_{4-5} + \Delta s_p (5-7)$.

Для выполнения последнего условия отрезок $1-7$ делят пополам точкой 4. Изобара, проходящая через точку 4, пересекает политропу $1-2$ в точке 3, которая соответствует концу сжатия воздуха в первой ступени. Проведя из точки 4 политропу $n = 1,2$ до пересечения с изобарой $p_3 = 16 \times 10^5 \text{ гПа} = \text{const}$, получаем точку 5, которая соответствует концу сжатия воздуха во второй ступени.

По sT -диаграмме находим $T_3 = T_5 = 382 \text{ К}$; $\Delta T = T_2 - T_3 = -468 - 382 = 86 \text{ К}$.

Работа, затрачиваемая на сжатие воздуха в первой ступени,

$$l_{0(1-3)} = -119 \text{ кДж/кг}.$$

Работа двух ступеней

$$l_{0(1-3)} + l_{0(4-5)} = -238 \text{ кДж/кг}.$$

Далее,

$$|l_0 - (l_{0(1-3)} + l_{0(4-5)})|/l_0 = (300 - 238)/300 = 0,207.$$

Таким образом, экономия работы на сжатие воздуха в двухступенчатом компрессоре по сравнению с одноступенчатым составляет 20,7 %.

§ 4.3. Энтропия газовых смесей

4.38. Газгольдер постоянного давления имеет колокол массой 15 т, размеры колокола: $d = 10 \text{ м}$, $h = 5 \text{ м}$ (рис. 4.14). В нем находится природный газ, имеющий следующий состав в объемных долях: метан $\text{CH}_4 = 49 \%$, этан $\text{C}_2\text{H}_6 = 11 \%$, пропан $\text{C}_3\text{H}_8 = 17 \%$, бутан $\text{C}_4\text{H}_{10} = 15 \%$, пентан $\text{C}_5\text{H}_{12} = 4 \%$, углекислый газ $\text{CO}_2 = 1 \%$, азот $\text{N}_2 = 3 \%$. Смесь медленно изотермически выходит из газ-

гольдера при температуре 50°C и атмосферном давлении 760 мм рт. ст. Определить изменение энтропии выходящей смеси.

4.39. Рассматривая природный газ в предыдущей задаче как идеальную газовую смесь, заданную массовыми долями, определить ее энтропию смешения.

4.40. Определить энтропию идеальной газовой смеси, находящейся в резервуаре вместимостью 5 м^3 под давлением 800 кПа и состоящей из 10 кг азота, 5 кг кислорода и некоторого количества гелия. Температура смеси равна 250°C . Считать, что энтропия компонентов при $t_0 = 0^\circ\text{C}$ и $p_0 = 0,1 \text{ МПа}$ равна нулю.

Решение. Прежде всего необходимо определить массу гелия для последующего нахождения массовых долей смеси. Определим сначала парциальные давления компонентов:

$$p_{\text{N}_2} = m_{\text{N}_2} R_{\text{N}_2} T/V = 100 \frac{8314}{28} 523/5 = 0,31 \text{ МПа};$$

$$p_{\text{O}_2} = m_{\text{O}_2} R_{\text{O}_2} T/V = 5 \frac{8314}{32} 523/5 = 0,136 \text{ МПа};$$

$$p_{\text{He}_2} = p - p_{\text{N}_2} - p_{\text{O}_2} = (8 - 3,1 - 1,36) 10^5 = 0,354 \text{ МПа}.$$

Масса гелия может быть получена из уравнения состояния

$$m_{\text{He}_2} = p_{\text{He}_2} V/(R_{\text{He}_2} T) = 3,54 \cdot 10^5 \cdot 5 / \left(\frac{8314}{4} 523 \right) = 1,63 \text{ кг};$$

$$m = m_{\text{He}_2} + m_{\text{N}_2} + m_{\text{O}_2} = 1,63 + 10 + 5 = 16,63 \text{ кг}.$$

Массовые доли определяются из выражений:

$$g_{\text{N}_2} = m_{\text{N}_2}/m = 10/16,63 = 0,601;$$

$$g_{\text{O}_2} = m_{\text{O}_2}/m = 5/16,63 = 0,3;$$

$$g_{\text{He}_2} = m_{\text{He}_2}/m = 1,63/16,63 = 0,098.$$

$$\begin{aligned} \text{Определим газовую постоянную смеси } R &= g_{\text{N}_2} R_{\text{N}_2} + \\ &+ g_{\text{O}_2} R_{\text{O}_2} + g_{\text{He}_2} R_{\text{He}_2} = 0,601 \frac{8314}{28} + 0,3 \frac{8314}{32} + \\ &+ 0,098 \frac{8314}{4} = 459,77 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К)}. \end{aligned}$$

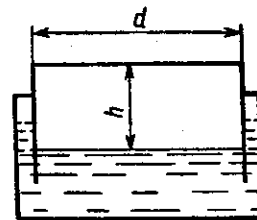


Рис. 4.14

Взяв из таблиц Приложения необходимые значения теплотемкостей: $\mu_{c_{pN_2}} = 29,35$ кДж/(кмоль·К); $\mu_{c_{pO_2}} = 29,73$ кДж/(кмоль·К); $\mu_{c_{pHe_2}} = 14,56$ кДж/(кмоль·К), переходим к определению энтропии компонентов смеси:

$$\begin{aligned} s_{N_2} &= [c_{pN_2} \ln(T/T_0) - R_{N_2} \ln(p/p_0)] g_{N_2} = \left[\frac{29,35}{28} \times \right. \\ &\quad \left. \times \ln(573/273) - \frac{8,314}{28} \ln(8/1) \right] 0,601 = \\ &= 0,096 \text{ кДж/(кг·К)}; \\ s_{O_2} &= [c_{pO_2} \ln(T/T_0) - R_{O_2} \ln(p/p_0)] g_{O_2} = \\ &= \left[\frac{29,73}{32} \ln(573/273) - \frac{8,314}{32} \ln(8/1) \right] 0,3 = \\ &= 0,0446 \text{ кДж/(кг·К)}; \\ s_{He_2} &= [c_{pHe_2} \ln(T/T_0) - R_{He_2} \ln(p/p_0)] g_{He_2} = \\ &= \left[\frac{14,56}{4} \ln(573/273) - \frac{8,314}{4} \ln(8/1) \right] 0,098 = \\ &= -0,159 \text{ кДж/(кг·К)}. \end{aligned}$$

Найдем объемные или молярные доли через известные массовые:

$$\begin{aligned} \Sigma g_i/\mu_i &= g_{N_2}/\mu_{N_2} + g_{O_2}/\mu_{O_2} + g_{He_2}/\mu_{He_2} = 0,601/28 + \\ &+ 0,3/32 + 0,098/4 = 0,056; \\ r_{N_2} &= \frac{g_{N_2}/\mu_{N_2}}{\Sigma g_i/\mu_i} = \frac{0,601/28}{0,056} = 0,383; \quad r_{O_2} = \frac{g_{O_2}/\mu_{O_2}}{\Sigma g_i/\mu_i} = \\ &= \frac{0,3/32}{0,056} = 0,17; \quad r_{He_2} = 1 - r_{N_2} - r_{O_2} = 1 - 0,383 - \\ &- 0,17 = 0,45 \end{aligned}$$

и рассчитаем энтропию смешения

$$\begin{aligned} \Delta s_{\text{смеш}} &= -R(r_{N_2} \ln r_{N_2} + r_{O_2} \ln r_{O_2} + r_{He_2} \ln r_{He_2}) = \\ &= -0,4598(0,383 \ln 0,383 + 0,17 \ln 0,17 + \\ &+ 0,45 \ln 0,45) = 0,473 \text{ кДж/(кг·К)}. \end{aligned}$$

Искомая удельная энтропия газовой смеси

$$\begin{aligned} s_{\text{см}} &= s_{N_2} + s_{O_2} + s_{He_2} + s_{\text{смеш}} = \\ &= 0,096 + 0,0446 - 0,159 + 0,473 = 0,455 \text{ кДж/(кг·К)}. \end{aligned}$$

4.41. Смесь выхлопных газов реактивного самолета состоит из углекислого газа, водяного пара, кислорода и азота и находится при давлении 98 кПа и температуре 469 °С. Массовые доли компонентов: $g_{CO_2} = 0,18$, $g_{H_2O} = 0,17$, $g_{O_2} = 0,182$ и $g_{N_2} = 0,468$. Определить энтропию 1 кг газовой смеси, предполагая, что энтропия газов равна нулю при давлении 10 кПа и температуре 0 °С. При решении воспользоваться понятием энтропии смешения.

4.42. Решить предыдущую задачу, не прибегая к вычислению энтропии смешения.

4.43. Смесь водорода и гелия массой 1 кг, находящаяся в резервуаре объемом 0,1 м³ при температуре 175 °С, вытекает в другой резервуар, объем которого вдвое больше. Какую температуру приобретает смесь газа после завершения этого процесса, если энтропия смеси увеличилась на 2,7 кДж/(кг·К). Состав смеси в объемных долях 94 % водорода и 6 % гелия.

4.44. Известно, что энтропия является аддитивной функцией и может быть вычислена по следующей формуле:

$$s_{p,T} = \sum_{i=1}^n g_i(s_i)_{p,T}, \quad (4.1)$$

где индекс p_i означает, что энтропия s_i вычисляется при парциальном давлении i -го компонента газовой смеси. С другой стороны, энтропия может быть вычислена по общей формуле

$$\begin{aligned} s_{p,T} &= \sum_{i=1}^n g_i(s_i)_{p,T} + \Delta s_{\text{смеш}} = \sum_{i=1}^n g_i(s_i)_{p,T} + \\ &+ \sum_{i=1}^n g_i R_i \ln(1/r_i), \end{aligned} \quad (4.2)$$

в которой аддитивность энтропии не отражена. Показать, что формула (4.1) эквивалентна формуле (4.2).

ГЛАВА 5

ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫЕ УРАВНЕНИЯ ТЕРМОДИНАМИКИ. ФАЗОВЫЕ ПЕРЕХОДЫ

§ 5.1 Дифференциальные уравнения термодинамики

5.1. Доказать равенства $c_p = T(\partial s/\partial T)_p$ и $c_v = T \times (\partial s/\partial T)_v$.

5.2. Доказать равенство $c_v = -T/(\partial^2 F/\partial T^2)_v$.

5.3. Вывести уравнение $F = u + T (\partial F / \partial T)_v$.

5.4. Вывести уравнение $G = i + T (\partial G / \partial T)_p$.

5.5. Доказать, что в критической точке теплоемкость равна бесконечности.

Решение. Найдем связь между теплоемкостью при постоянном объеме и теплоемкостью в критической точке. Дифференциал энтропии для переменных T и v

$$ds = (\partial s / \partial T)_v dT + (\partial s / \partial v)_T dv.$$

В критической точке это выражение принимает вид

$$(ds/dT)_{кр} = (\partial s / \partial T)_v \text{ кр} + (\partial s / \partial v)_T \text{ кр} (dv/dT)_{кр},$$

но $(ds/dT)_{кр} = c_{кр} / T_{кр}$; $(\partial s / \partial T)_v \text{ кр} = c_v \text{ кр} / T_{кр}$, тогда

$$c_{кр} = c_{vкр} + T_{кр} (\partial s / \partial v)_T \text{ кр} (dv/dT)_{кр},$$

и так как $(\partial s / \partial v)_T = (\partial p / \partial T)_v$, то

$$c_{кр} = c_{vкр} + T_{кр} (\partial p / \partial T)_{vкр} (dv/dT)_{кр}.$$

В критической точке $(dv/dT)_{кр} = \infty$, поэтому $c_{кр} = \infty$.

5.6. Найти связь между теплоемкостями вещества на верхней c' и нижней c'' пограничных кривых через теплоту парообразования r .

Решение. Известно, что $c = T (\partial s / \partial T)$, следовательно,

$$c' = T (\partial s / \partial T)_{x=0} = T (ds' / dT), \quad c'' = T (\partial s / \partial T)_{x=1} = T (ds'' / dT).$$

Вычитая из второго выражения первое, получим

$$c'' - c' = T \left(\frac{ds''}{dT} - \frac{ds'}{dT} \right) = \frac{T}{dT} (s'' - s'),$$

но $d [T (s'' - s')] = dr = T d (s'' - s') + (s'' - s') dT$, откуда $T d (s'' - s') = dr - (s'' - s') dT$, или окончательно $c'' - c' = (dr/dT) - (r/T)$.

5.7. Доказать, что $c_p / c_v = (\partial p / \partial v)_s / (\partial p / \partial v)_T$.

5.8. Вывести уравнение адиабаты в дифференциальной форме, используя переменные v , T .

5.9. Доказать, что в случае идеального газа существует интегрирующий множитель, равный $1/T$, с помощью которого выражение $dq = c_v dT + p dv$ преобразуется в полный дифференциал.

Решение. Для идеального газа справедливы зависимости $p v = RT$ и $c_v = f(T)$. Разделив выражение для dq на T , получим

$$dq/T = (c_v/T) dT + (R/v) dv.$$

Если в правой части этого равенства стоит полный дифференциал, то крест-накрест взятые производные должны быть равны друг другу. Так,

$$\left[\frac{\partial (c_v/T)}{\partial v} \right]_T = \left[\frac{\partial (R/v)}{\partial T} \right]_v.$$

потому что c_v и T не зависят от v , а R и v не зависят от T .

5.10. Найти зависимость внутренней энергии от объема для газа Ван дер Ваальса.

5.11. Найти уравнение для вычисления внутренней энергии для газа Ван дер Ваальса.

5.12. Доказать, что при 4°C для воды $c_p = c_v$.

Решение. Связь между теплоемкостями для реальных веществ выражена уравнением

$$c_p - c_v = T (\partial p / \partial T)_v (\partial v / \partial T)_p.$$

Для воды при 4°C и атмосферном давлении имеет место максимальная плотность. Следовательно, $(\partial v / \partial T)_p = 0$, а термическая упругость $(\partial p / \partial T)_v$ — величина конечная. Поэтому $c_p - c_v = 0$ и $c_p = c_v$.

5.13. Доказать равенство

$$c_p - c_v = \left[\frac{1}{v_0} \left(\frac{\partial v}{\partial T} \right)_p \right]^2 v_0 T / \left[-\frac{1}{v_0} \left(\frac{\partial v}{\partial p} \right)_T \right].$$

5.14. Найти температуру инверсии в области малых плотностей для газа Ван дер Ваальса.

Решение. В выражении

$$\lambda = \frac{v (\partial p / \partial v)_T + T (\partial p / \partial T)_v}{c_p (\partial p / \partial v)_T} \quad (5.1)$$

знак λ определяется числителем, так как знаменатель всегда отрицателен $[(\partial p / \partial v)_T < 0]$.

Для газа Ван дер Ваальса

$$v (\partial p / \partial v)_T = -v RT / (v - b)^2 + 2a / v^2;$$

$$T (\partial p / \partial T)_v = RT / (v - b).$$

Подставляя полученные выражения в соотношение (5.1), найдем

$$\lambda = \frac{2a/v^2 - RTb/(v-b)^2}{c_p (\partial p / \partial v)_T}.$$

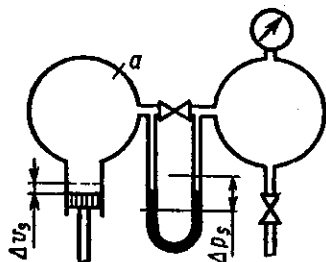


Рис. 5.1

Так как знак λ определяется числителем, то температуру инверсии определим из уравнения $2a/v^2 - RTb/(v - b^2) = 0$. Пренебрегая величиной b по сравнению с v , получим $T = 2a/(bR)$.

5.15. В установке, используемой для определения показателя адиабаты k (рис. 5.1), находится газ, сжатый до $p = 2942$ гПа. Определить показатель адиабаты

k этого газа, если при быстром перемещении поршня на 9 мм давление в сосуде повышается на 100 мм вод. ст. Объем V сосуда a равен $0,3 \cdot 10^{-3}$ м³, диаметр поршня 10 мм, газ можно считать идеальным.

Решение. $k = c_p/c_v = (\partial v/\partial p)_T (dp_H/dv_H)$. Если $pv = RT$, то $(\partial v/\partial p)_T = -(v/p)$ и $k = -(v/p) (dp_H/dv_H)$, или в конечных разностях

$$k = -\frac{V}{p} \frac{\Delta p_H}{\Delta V_H} = -\frac{(0,3 \cdot 10^{-3}) (-9,807)}{2942 (\pi \cdot 0,01^2/4) 9 \cdot 10^{-3}} = 1,41.$$

5.16. Вывести уравнение для дифференциального эффекта Джоуля—Томсона $\lambda = -\Delta T/\Delta p$.

§ 5.2. Фазовые переходы

5.17. Вывести уравнение Клапейрона—Клаузиуса: а) методом функций; б) методом циклов.

5.18. Воспользовавшись уравнением Клапейрона—Клаузиуса, получить уравнения Эренфеста для фазовых переходов второго рода.

5.19. Используя уравнение Клапейрона—Клаузиуса, получить уравнение кривой упругости пара для небольшого диапазона изменения температур.

5.20. Ввиду неустойчивости состояния системы на пограничной линии для определения объема сухого насыщенного пара используется уравнение Клапейрона—Клаузиуса. Определить удельный объем сухого насыщенного пара при $p = 0,491$ МПа, если из опыта известно, что теплота парообразования $r = 2120$ кДж/кг, $v' = 0,00109$ м³/кг, а зависимость $T = f(p)$ представлена такими данными:

p , МПа	0,443	0,491	0,541
T , К	420,1	424	427,6

Решение. Из уравнения Клапейрона—Клаузиуса, записанного в конечных разностях $\Delta p/\Delta T = r/[T_H(v'' - v')]$, имеем

$$v'' = v' + r\Delta T/(T\Delta p) = 1,09 \cdot 10^{-3} + \frac{2,12 \cdot 10^3 \cdot 7,5}{424 \cdot 0,098 \cdot 10^5} = 0,3821 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Опыт дает значение $v'' = 0,3818$ м³/кг.

5.21. Удельный объем льда при 273 К составляет $0,1091 \cdot 10^{-3}$ м³/кг, воды — $1 \cdot 10^{-3}$ м³/кг, а теплота плавления 336 кДж/кг. Определить изменение температуры плавления льда при повышении давления на 0,1 МПа.

5.22. При каком давлении вода, имея температуру 368 К, будет кипеть, если при $p_1 = 0,1013$ МПа (760 мм рт. ст.) $T_H = 373$ К, а теплота парообразования в пределах этих температур $r = 2260$ кДж/кг?

5.23. При давлении $p_1 = 0,09807$ МПа температура кипения воды $T_H = 373,2$ К, а при $p_2 = 0,118$ МПа $T_H = 377,4$ К. Определить удельную теплоту парообразования в пределах этих температур.

5.24. Определить изменение $\Delta r/\Delta T$ теплоты парообразования бензола C_6H_6 при повышении температуры на 1 К, если для паров бензола при температуре 323 К $c'_p = 1230$ Дж/(кг·К), а для жидкого бензола $c'_p = 1880$ Дж/(кг·К).

5.25. Теплота парообразования бензола C_6H_6 при 323 К $r_1 = 416$ кДж/кг, а при 353 К $r_2 = 398,6$ кДж/кг. Определить теплоемкость парообразного бензола c'_p в пределах этих температур, если теплоемкость жидкого бензола $c'_p = 1,73$ кДж/(кг·К).

Решение. Используя уравнение Кирхгофа в конечных разностях, получим

$$c'_p = \Delta r/\Delta T + c'_p = \frac{416 - 398,6}{323 - 353} + 1,73 = 1,15 \text{ кДж/(кг·К)}$$

5.26. Сернистый водород H_2S кипит при 211,6 К и атмосферном давлении. Определить его удельную теплоту парообразования.

5.27. Метан CH_4 имеет теплоту парообразования $r = 579$ кДж/кг. Определить его температуру кипения при давлении $p = 0,1013$ МПа.

5.28. Для воды при $p = 1013$ МПа приведенная температура кипения $\tau = 0,58$, температура в критической точке $T_{кр} = 647$ К. Определить температуру кипения воды.

5.29. Определить теплоту сублимации льда при 273 К, если объем 1 г водяного пара при 273 К равен $204,68 \times 10^3 \text{ см}^3$, объем льда $1,09 \text{ см}^3$ и изменение давления пара при изменении температуры на 3,5 К составляет 100 Па.

5.30. Теплота плавления парафина при 325,7 К и давлении 0,1013 МПа равна 148 кДж/кг. Какова температура плавления парафина при давлении 1,013 МПа, если объем 1 г парафина при плавлении увеличивается на $0,125 \text{ см}^3$?

5.31. Через эфир при температуре 303 К и давлении 0,0985 МПа продувают $3 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$ воздуха. Каков объем получаемой смеси и сколько в ней эфира, если температура кипения эфира при давлении 0,1013 МПа будет 308 К, а молярная теплота парообразования 27 900 кДж/кмоль?

5.32. Согласно экспериментальным данным давление пара эфира зависит от температуры следующим образом:

$$\lg p = -2170/T + 16,025 - 1,81 \cdot 10^{-2}T + 1,72 \times 10^{-5}T^2, \quad (5.2)$$

где $T < 273 \text{ К}$; p — в Па.

Вычислить скрытую теплоту парообразования эфира при температуре 243 К, если при этом удельные объемы пара эфира и жидкого эфира соответственно равны $v'' = 5515 \text{ см}^3/\text{г}$ и $v' = 1,3 \text{ см}^3/\text{г}$.

Решение. Из уравнения (5.2) следует, что

$$\begin{aligned} dp/dT &= 10(-2170/T^2 + 16,025 - 1,81 \cdot 10^{-2}T + 1,72 \cdot 10^{-5}T^2) \times \\ &\times 2,303(2170/T^2 - 0,0181 + 2 \cdot 0,172 \cdot 10^{-4}T) = \\ &= 10(-2170/243^2 + 16,025 - 0,0181 \cdot 243 + 0,172 \cdot 10^{-4} \cdot 243^2) \times \\ &\times 2,303(2170/243^2 - 0,0181 + 2 \cdot 0,172 \cdot 10^{-4} \cdot 243) = \\ &= 321 \text{ Па/К}. \end{aligned}$$

Из уравнения Клапейрона—Клаузиуса определяем

$$r = T_{\text{н}}(v'' - v')(dp/dT) = 243(5515 - 1,3)321 \times 10^{-3} = 428 \text{ кДж/кг}.$$

5.33. Определить, при каком давлении будет плавиться лед, имеющий температуру 268 К, если удельный объем льда $1,091 \text{ см}^3/\text{г}$, а воды $1 \text{ см}^3/\text{г}$. Теплота плавления льда 335,5 кДж/кг.

5.34. В результате резкого нажатия на педаль акселератора во всасывающем коллекторе двигателя автомобиля ($V_{\text{дв}} = 1600 \text{ см}^3$) появился жидкий бензин при температуре 333 К и давлении 0,0985 МПа. Определить расход бензина

на одну попытку пуска двигателя стартером ($n_{\text{дв}} = 500 \text{ мин}^{-1}$, $\tau_{\text{п}} = 10 \text{ с}$), если при давлении 0,1013 МПа температура кипения бензина равна 338 К, его средняя молярная масса 120 кг/кмоль, а теплота парообразования $r = 252 \text{ кДж/кг}$.

5.35. В результате диссоциации твердого хлористого аммония NH_4Cl образуются газообразные составляющие NH_3 и HCl . Найти выражение для теплоты диссоциации NH_4Cl .

5.36. Имеются экспериментальные данные, полученные из опытов с аммиаком:

$T, \text{ К}$	273	278	283	288	293
$p, \text{ МПа}$	0,419	0,504	0,602	0,714	0,841
$v', \text{ см}^3/\text{г}$	1,556	1,582	1,598	1,616	1,634
$v'', \text{ см}^3/\text{г}$	293,9	245,2	206,0	174,1	148

Определить скрытую теплоту испарения аммиака при температурах 278, 283, 288 К и сравнить с величинами, вычисленными в предположении, что пары аммиака — идеальный газ.

Решение. С помощью метода наименьших квадратов представляем:

$$p = f(T) = -13,2302 + 0,1845T - 0,8602 \cdot 10^{-3}T^2 + 0,1348 \cdot 10^{-5}T^3;$$

$$dp/dT = 0,1845 - 0,172 \cdot 10^{-2}T + 0,4044 \cdot 10^{-5}T^2.$$

$$\text{При } T = 287 \text{ К } dp/dT = 0,1845 - 0,172 \cdot 10^{-2} \cdot 278 + 0,4044 \cdot 10^{-5} \cdot 278^2 = 0,0188 \text{ МПа/К} = 18,8 \text{ кПа/К};$$

$$r_{\text{он}} = T_{\text{н}}(v'' - v')(dp/dT) = 278(245,2 - 1,582)10^{-3} \times 18,8 \cdot 10^3 = 1273 \text{ кДж/кг};$$

$$r_{\text{ид}} = RT^2(dp/dT)/p = (8314 \cdot 278^2 \cdot 0,0188)/(17 \cdot 0,504) = 1440 \text{ кДж/кг}.$$

$$\text{При } T = 283 \text{ К } dp/dT = 2,16 \cdot 10^{-2} \text{ МПа/К}; \quad r_{\text{он}} = 1249 \text{ кДж/кг}; \quad r_{\text{ид}} = 1405 \text{ кДж/кг}.$$

$$\text{При } T = 288 \text{ К } dp/dT = 2,45 \cdot 10^{-2} \text{ МПа/К}; \quad r_{\text{он}} = 1217 \text{ кДж/кг}; \quad r_{\text{ид}} = 1392 \text{ кДж/кг}.$$

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ СОСТОЯНИЯ ВОДЯНОГО ПАРА. ПАРОВЫЕ ПРОЦЕССЫ

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

Решение. По таблицам [15] находим: $t_n = 312,42^\circ\text{C}$;
 $s' = 5,6019 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{K)}$; $v' = 0,01756 \text{ м}^3/\text{кг}$; $\rho' = 59,648 \text{ кг/м}^3$;
 $t'' = 2720,8 \text{ кДж/кг}$; $r = 1303,5 \text{ кДж/кг}$;
 $u'' = i'' - pv'' = 2720,8 - 10,2 \cdot 10^3 \cdot 0,01756 =$
 $= 929,68 \text{ кДж/кг}$.

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

6.3. Определить состояние водяного пара, если его давление 4,5 МПа, а удельный объем $0,0707 \text{ м}^3/\text{кг}$.

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

Решение. При $p = 9 \text{ МПа}$ $v' = 0,0014179 \text{ м}^3/\text{кг}$;
 $v'' = 0,02046 \text{ м}^3/\text{кг}$; $i' = 1364,2 \text{ кДж/кг}$; $i'' = 2741,8 \text{ кДж/кг}$;
 $s' = 3,2875 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{K)}$; $s'' = 5,6773 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{K)}$; $r =$
 $= 1377,6 \text{ кДж/кг}$;

$v_x = v' + x(v'' - v') = 0,0014179 + 0,8(0,02046 -$
 $- 0,0014179) = 0,016645 \text{ м}^3/\text{кг}$;

$i_x = i' + x(i'' - i') = i' + xr = 1364,2 + 0,8 \times$
 $\times 1377,6 = 2466,3 \text{ кДж/кг}$;

$u_x = i_x - pv_x = 2466,3 - 9 \cdot 10^3 \cdot 0,016645 =$
 $= 2317,0 \text{ кДж/кг}$.

6.5. Вода нагрета до $150,96^\circ\text{C}$ (при давлении 1,2 МПа). На сколько градусов необходимо еще нагреть воду, чтобы началось кипение?

6.6. Определить состояние водяного пара, если его температура $263,37^\circ\text{C}$, а давление 2,0 МПа.

Решение. При давлении 2,0 МПа температура насыщения пара $212,37^\circ\text{C}$, следовательно, пар перегрет; перегрев составляет $263,37^\circ\text{C} - 212,37^\circ\text{C} = 51^\circ\text{C}$.

6.7. Определить состояние водяного пара, если его давление 7,5 МПа, а удельный объем $0,019 \text{ м}^3/\text{кг}$.

6.8. В верхней половине барабана парового котла находится сухой насыщенный пар, а в нижней — вода в состоянии насыщения. Во сколько раз масса воды больше массы пара, если давление пара в барабане $p = 11,5 \text{ МПа}$?

6.9. Состояние водяного пара определяется давлением 14 МПа и температурой 813 K . Найти значения остальных параметров состояния по таблицам [15] (см. также Приложение).

6.10. Внутри трубы под давлением 11 МПа происходит парообразование за счет теплового потока 75 кВт , подводимого от внешних источников. Вода в трубу поступает при температуре насыщения; расход $0,5 \text{ кг/с}$. Определить плотность пароводяной смеси на выходе из трубы.

Решение. Количество образующегося пара

$$M = Q/r = 75/1254,2 = 0,0598 \text{ кг/с}.$$

Степень сухости пара на выходе

$$x = 0,0598/0,5 = 0,1196.$$

Удельный объем смеси

$$v_x = xv'' + (1 - x)v' = 0,1196 \cdot 0,01597 + (1 -$$

 $- 0,1196) 0,1489 \cdot 10^{-2} = 0,3221 \cdot 10^{-2} \text{ м}^3/\text{кг}.$

Плотность пароводяной смеси на выходе из трубы

$$\rho_x = 1/v_x = 1/(0,3221 \cdot 10^{-2}) = 310,6 \text{ кг/м}^3.$$

6.11. Пользуясь *si*-диаграммой*, определить параметры состояния водяного пара, если: а) температура пара 100°C , а удельный объем $1,4 \text{ м}^3/\text{кг}$; б) давление пара $0,2 \text{ МПа}$, а температура 250°C ; в) температура пара 170°C ; г) энтальпия пара составляет 2410 кДж/кг , а давление — $0,02 \text{ МПа}$; д) энтропия пара равна $8 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{K)}$, его температура 430°C .

6.12. Перегретый пар массой 2 кг занимает объем $1,0 \text{ м}^3$. Пользуясь *si*-диаграммой, найти давление пара, если его температура равна 490°C .

6.13. Сухой насыщенный пар массой 16 кг занимает объем, равный 4 м^3 . Найти температуру и давление насыщения.

* *si*-диаграмма приведена на вкладке.

6.14. Определить теплоту, необходимую для перегрева 1 кг пара в пароперегревателе котла, если давление в нем постоянно и равно 14 МПа, а температура перегрева 540 °С.

6.15. Решить предыдущую задачу для случая, когда на входе в пароперегреватель влажность пара составляет 3 %.

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

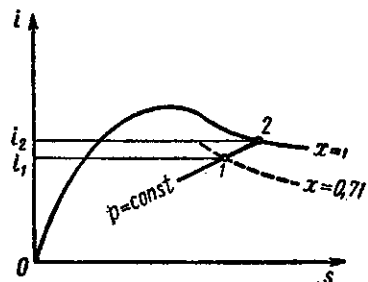


Рис. 6.1

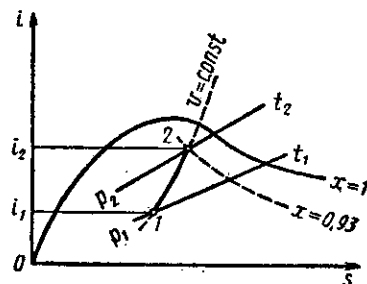


Рис. 6.2

6.17. Найти теплоту парообразования, если давление $p = 5$ МПа.

Решение. На i - s -диаграмме (рис. 6.1) находится изобара, соответствующая заданному давлению. При любой степени сухости, не равной единице, берется точка 1. Точка 2 будет лежать на пересечении заданной изобары с верхней пограничной кривой. Тогда:

$$q = i_2 - i_1 = r(1 - x);$$

$$r = (i_2 - i_1)/(1 - x) = (2794 - 2320)/(1 - 0,71) = 1638 \text{ кДж/кг.}$$

6.18. Пар массой 1 кг при давлении 3 МПа имеет степень сухости $x = 0,7$. Какое количество теплоты нужно затратить, чтобы степень сухости довести до $x = 0,91$?

6.19. Влажный пар при давлении 1,1 МПа имеет степень сухости $x = 0,8$. Какое количество теплоты необходимо подвести к 1 кг этого пара, чтобы при постоянном давлении перевести его в состояние сухого насыщенного?

6.20. Пар массой 10 кг занимает объем 2 м³ при давлении $p_1 = 0,7$ МПа. Найти количество теплоты, которое не-

обходимо сообщить пару, чтобы, не изменяя занимаемый им объем, повысить давление до $p_2 = 0,9$ МПа. Каковы будут температура и степень сухости в конце процесса?

Решение. Удельный объем пара $v = V/M = 2/10 = 0,2 \text{ м}^3/\text{кг}$. На i - s -диаграмме (рис. 6.2) начальная точка 1 лежит на пересечении изохоры $0,2 \text{ м}^3/\text{кг}$ и изобары, соответствующей $0,7$ МПа, энтальпия этого состояния $i_1 = 2204 \text{ кДж/кг}$. Конечная точка 2 — на пересечении заданной изохоры и изобары $0,9$ МПа, энтальпия в этом случае $i_2 = 2630 \text{ кДж/кг}$, $x = 0,93$. Температуру находим, продолжая изобару $0,9$ МПа до пересечения с верхней пограничной кривой, $t = 166$ °С. Для изохорного процесса

$$q = i_2 - i_1 - v(p_2 - p_1) = 2630 - 2204 - 0,2(0,9 - 0,7) 10^3 = 386 \text{ кДж/кг.}$$

6.21. Сухой насыщенный пар занимает объем $v = 0,18 \text{ м}^3/\text{кг}$. Какое количество теплоты надо затратить, чтобы нагреть его при постоянном объеме до температуры 450 °С? Чему будет равно давление в конце процесса?

6.22. Пар со степенью сухости $x = 0,726$ и давлением 0,1 МПа расширяется изотермически до сухого насыщенного состояния. Найти изменение удельной внутренней энергии и теплоту процесса.

6.23. Пар массой 1 кг, начальное состояние которого определяется температурой $t = 350$ °С и давлением $p_1 = 0,16$ МПа, сжимается изотермически так, что от него отводится 1315 кДж/кг теплоты. Найти давление в конце сжатия, изменение внутренней энергии и работу процесса.

Решение. $q = T(s_2 - s_1)$; $s_2 = (Ts_1 - q)/T = 6,06 \text{ кДж/(кг·К)}$. На пересечении изохоры (адиабаты) $s = 6,06 \text{ кДж/(кг·К)}$ и заданной изотермы по i - s -диаграмме (рис. 6.3) находим $p_2 = 9$ МПа и все остальные параметры состояния, соответствующие начальной 1 и конечной 2 точкам процесса:

	$T, \text{ К}$	$p, \text{ МПа}$	$v, \text{ м}^3/\text{кг}$	$i, \text{ кДж/кг}$	$s, \text{ кДж/(кг·К)}$
Точка 1	623	0,16	1,8	3176	8,17
» 2	623	9,0	0,026	2968	6,06

Далее проводим необходимые расчеты:

$$\Delta u = i_2 - i_1 - (p_2 v_2 - p_1 v_1) = 2968 - 3176 - (9 \times 0,026 - 0,16 \cdot 1,8) 10^3 = -154 \text{ кДж/кг;}$$

$$l = \Delta u - q = (-154) - 1315 = -1469 \text{ кДж/кг.}$$

6.24. Сухой насыщенный пар с давлением 0,09 МПа сжимается по изоэнтропе (адиабате) до $p_2 = 10p_1$. Определить конечную температуру, работу и располагаемую работу процесса.

6.25. Пар при давлении 3,5 МПа и температуре $t = 450^\circ\text{C}$ расширяется изоэнтропно (адиабатно) до сухого насыщенного состояния, а затем охлаждается при по-

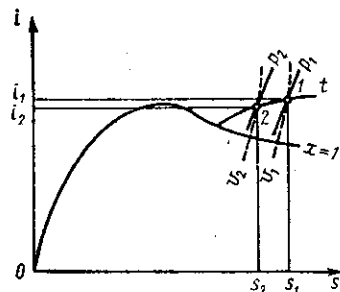


Рис. 6.3

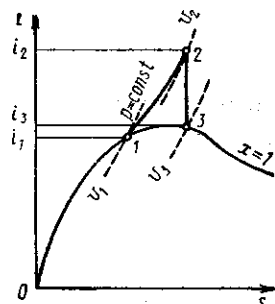


Рис. 6.4

стоянном объеме до температуры 120°C . Определить работу процесса, располагаемую работу и количество теплоты, переданное во внешнюю среду.

6.26. Сухой насыщенный пар перегревается при постоянном давлении $p = 11$ МПа до температуры 510°C , затем расширяется по изоэнтропе (адиабате) вновь до состояния сухого насыщенного пара. Найти теплоту перегрева, изменение внутренней энергии и энтальпии пара в сложном процессе.

Решение. Процесс состоит из двух частей: изобарный перегрев и изоэнтропное (адиабатное) расширение. Процесс наносим на si -диаграмму (рис. 6.4), по которой определяем параметры состояния в трех характерных точках процесса:

Точка	p , МПа	v , м ³ /кг	i , кДж/кг
1	11	0,017	2704
2	11	0,030	3588
3	1,05	0,195	2780

Далее проводим расчеты:

$$q_{\text{пер}} = i_2 - i_1 = 3588 - 2704 = 884 \text{ кДж/кг};$$

$$\Delta u_{1,2} = i_2 - i_1 - p(v_2 - v_1) = 884 - 11(0,03 - 0,017) 10^3 = 741 \text{ кДж/кг};$$

$$\Delta u_{2,3} = i_3 - i_2 - (p_3 v_3 - p_2 v_2) = 2780 - 3588 (1,05 \times 0,195 - 11 \cdot 0,03) 10^3 = -682,75 \text{ кДж/кг};$$

$$\Delta i = i_3 - i_1 = 2780 - 2704 = 76 \text{ кДж/кг};$$

$$\Delta u = \Delta u_{1,2} + \Delta u_{2,3} = 741 - 682,75 = 58,25 \text{ кДж/кг}.$$

ГЛАВА 7

ВЛАЖНЫЙ ВОЗДУХ

7.1. При давлении $p = 10^5$ Па, температуре $t = 4^\circ\text{C}$ и относительной влажности $\phi = 0,8$ объемный расход воздухоохладителя составляет $27,8 \text{ м}^3/\text{с}$. По техническим условиям производства воздух при прохождении через воздухоохладитель должен охлаждаться до 0°C . Определить количество теплоты, которое необходимо отнять для охлаждения воздуха, и массу влаги, выпадающей на поверхности охладителя за 1 с.

Решение. Парциальное давление водяного пара, находящегося в воздухе, $p_w = \phi p_n$, где p_n — давление насыщенного водяного пара при температуре смеси, которое определяется по табл. 5 Приложения; ϕ — относительная влажность воздуха. Из таблицы находим, что при $t = 4^\circ\text{C}$, $p_n = 812,9$ Па, тогда $p_w = 0,8 \cdot 812,9 = 650,3$ Па.

Влагосодержание влажного воздуха на входе в охладитель

$$d_1 = 0,622 p_w / (p - p_w) = 0,622 \cdot 650,3 / (10^5 - 650,3) = 408 \cdot 10^{-5} \text{ кг/кг}.$$

Энтальпия влажного воздуха на входе в охладитель может быть определена как сумма энтальпий 1 кг сухого воздуха и d кг водяного пара $i = i_v + di_w$. Энтальпия 1 кг сухого воздуха $i_v = t$, так как теплоемкость сухого воздуха при постоянном давлении равна 1 кДж/(кг·К). Энтальпия 1 кг сухого насыщенного водяного пара при низких давлениях может быть определена по эмпирической формуле $i_w = 2500 + 1,96t_w$, тогда

$$i_1 = i_v + di_w = t_1 + (2500 + 1,96t_1) d_1 = 4 + (2500 + 1,96 \cdot 4) 408 \cdot 10^{-5} \approx 14,23 \text{ кДж/кг}.$$

Парциальное давление насыщенного водяного пара во влажном воздухе на выходе из охладителя (при 0°C) находим по табл. 5 Приложения: $p_n = 610,8$ Па.

Влагосодержание насыщенного влажного воздуха на выходе из охладителя (при 0°C)

$$d_2 = 0,622 p_n / (p - p_n) = 0,622 \cdot 610,8 / (10^5 - 610,8) = 383 \cdot 10^{-5} \text{ кг/кг.}$$

Изменение влагосодержания 1 кг влажного воздуха при охлаждении его в охладителе

$$\Delta d = d_1 - d_2 = 408 \cdot 10^{-5} - 383 \cdot 10^{-5} = 25 \cdot 10^{-5} \text{ кг/кг.}$$

Массовый расход сухого воздуха, проходящего через воздухоохладитель, находится из уравнения состояния

$$M = \rho V / [(8314 T) / \mu] = (10^5 - 650,3) 27,8 / [8314 \times 277 / (28,96)] \approx 34,7 \text{ кг/с, где } 8314 \text{ Дж/(кмоль} \cdot \text{К)} — \text{универсальная газовая постоянная; } \mu = 28,96 \text{ кг/кмоль} — \text{молярная масса сухого воздуха.}$$

Энтальпия влажного воздуха на выходе из охладителя при температуре $t_2 = 0^\circ\text{C}$

$$i_2 = i_n + d_2 i_n = t_2 + (2500 + 1,96 t_2) d_2 = 2500 \times 383 \cdot 10^{-5} = 9,57 \text{ кДж/кг.}$$

Изменение энтальпии 1 кг влажного воздуха при охлаждении его в охладителе

$$\Delta i = i_2 - i_1 = 9,54 - 14,23 = -4,66 \text{ кДж/кг.}$$

Количество теплоты, отводимое от воздуха, проходящего через охладитель в 1 с,

$$Q = M \Delta i = 34,7 (-4,66) = -161 \text{ кДж/с.}$$

Масса влаги, выпавшей на поверхности охладителя за 1 с,

$$M_n = \Delta d \cdot M = 25 \cdot 10^{-5} \cdot 34,7 = 867 \cdot 10^{-5} \text{ кг/с.}$$

7.2. Состояние атмосферного воздуха определяется следующими параметрами: барометрическим давлением $p = 10^5 \text{ Па}$, температурой $t = 15^\circ\text{C}$, парциальным давлением водяного пара по психрометру $p_n = 1270 \text{ Па}$. Определить относительную влажность ϕ ; абсолютную влажность ρ_n ; плотность сухого воздуха ρ_a ; плотность смеси пара и воздуха ρ ; температуру точки росы t_p ; газовую постоянную влажного воздуха R ; влагосодержание воздуха d и энтальпию воздуха i .

7.3. Температура влажного воздуха $t = 25^\circ\text{C}$, а температура точки росы $t_p = 20^\circ\text{C}$. Определить относительную

i , кДж/кг

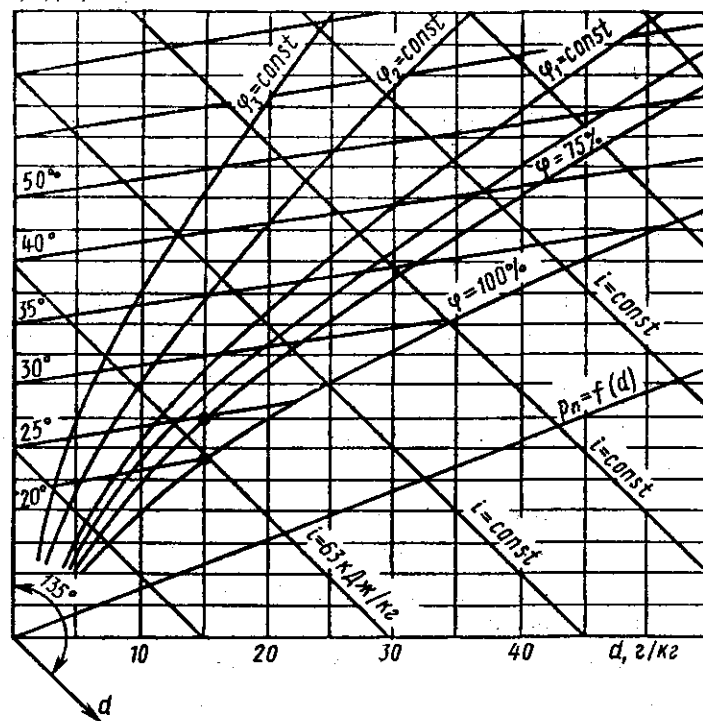


Рис. 7.1

влажность воздуха ϕ , энтальпию i , абсолютную влажность ρ_n , влагосодержание d и парциальное давление p_n . При решении задачи использовать di -диаграмму.

Решение. На di -диаграмме (рис. 7.1)* находим изотермы 20 и 25°C . Точка росы лежит на пересечении изотермы 20°C и линии насыщения $\phi = 1,0$. Из этой точки проводим вертикальную прямую до пересечения с изотермой $t = 25^\circ\text{C}$. Точка пересечения и определяет состояние влажного воздуха: $\phi = 0,75$ (75 %); $d = 0,015 \text{ кг/кг}$; $i = 63 \text{ кДж/кг}$; $p_n = 2200 \text{ Па}$.

7.4. В камере смешиваются два потока воздуха. Первый поток дает $m_1 = 1 \cdot 10^4 \text{ кг}$ воздуха с параметрами $t_1 = 20^\circ\text{C}$ и $\phi_1 = 0,6$, второй поток — $m_2 = 3 \cdot 10^4 \text{ кг}$ воздуха с параметрами $t_2 = 50^\circ\text{C}$ и $\phi_2 = 0,5$. Определить параметры воз-

* Полностью di -диаграмма приведена на вкладке.

духа в камере после смешения. Задачу решить, пользуясь di -диаграммой.

7.5. При измерении параметров влажного воздуха показания сухого и мокрого термометров соответственно были $t_c = 65^\circ\text{C}$ и $t_m = 50^\circ\text{C}$. Требуется определить состояние влажного воздуха и его параметры. При решении задачи использовать di -диаграмму.

7.6. Состояние влажного воздуха задано следующими параметрами: температурой $t_1 = 25^\circ\text{C}$ и степенью насыщения $\psi = 0,7$. При постоянном давлении $p = 1,01 \cdot 10^5$ Па воздух охлаждается до конечной температуры $t_2 = 10^\circ\text{C}$. Определить массу влаги, которая выделится при охлаждении, и количество теплоты, которое необходимо отвести от 1 кг воздуха.

Решение. Влагосодержание насыщенного воздуха d_{\max} при $t_1 = 25^\circ\text{C}$:

$$d_{\max} = 0,622 p_{n1} / (p - p_{n1}) = 0,622 \cdot 3166 / (1,01 \cdot 10^5 - 3166) = 201 \cdot 10^{-4} \text{ кг/кг},$$

где p_{n1} — парциальное давление водяного пара при $t_1 = 25^\circ\text{C}$, берется из табл. 5 Приложения.

Начальное влагосодержание воздуха

$$d_1 = \psi_1 d_{\max} = 0,7 \cdot 201 \cdot 10^{-4} = 0,01407 \text{ кг/кг}.$$

Для конечного состояния насыщенного воздуха при $t_2 = 10^\circ\text{C}$ влагосодержание находится аналогично:

$$d_{\max} = 0,622 p_{n2} / (p - p_{n2}) = 0,622 \cdot 1227,1 / (1,01 \cdot 10^5 - 1227,1) = 763 \cdot 10^{-5} \text{ кг/кг}.$$

Значения d_{\max} можно также определить по di -диаграмме.

Масса выпавшей влаги, приходящейся на 1 кг сухого воздуха, равна разности влагосодержаний:

$$M = d_1 - d_2 = 0,01407 - 0,00763 = 644 \cdot 10^{-5} \text{ кг/кг}.$$

Количество теплоты, отнимаемое при охлаждении 1 кг воздуха, равно разности энтальпий. Значения i_1 и i_2 можно определить двумя способами: по di -диаграмме и аналитически по уравнениям:

$$i_1 = i_{n1} + d_1 i_{n1} = 25 + 0,1407 (2500 + 1,96 \cdot 25) = 60,6 \text{ кДж/кг};$$

$$i_2 = i_{n2} + d_2 i_{n2} + d_{ж} c_{pж} t_2 = 10 + 0,00763 (2500 + 1,96 \times 10) + 0,644 \cdot 10^{-2} \cdot 4,2 \cdot 10 = 29,4 \text{ кДж/кг},$$

где $c_{pж} = 4,2$ кДж/(кг·К) — изобарная теплоемкость воды;

$$q = i_2 - i_1 = 29,4 - 60,6 = -31,2 \text{ кДж/кг}.$$

7.7. В барокамере должны непрерывно поддерживаться следующие параметры воздуха: температура $t = 25^\circ\text{C}$, давление $p = 10^5$ Па и относительная влажность $\phi = 0,4$. Определить, каково будет при указанных условиях влагосодержание воздуха d и температура точки росы t_p .

7.8. Определить массу силикагеля, служащего для поглощения паров воды из воздуха, которую необходимо загрузить в камеру сгорания ЖРД, находящегося при длительном хранении, если объем камеры сгорания равен $V = 3 \text{ м}^3$. Двигатель законсервирован при 60%-ной влажности и температуре окружающего воздуха 30°C . Согласно техническим условиям двигатель должен храниться при 50%-ной влажности и температуре от -20 до $+40^\circ\text{C}$. Поглощающая способность 1 кг силикагеля 0,2 кг воды.

Решение. По табл. 5 Приложения при $t = 30^\circ\text{C}$ находим плотность $\rho_n = 0,0304$ кг/м³. Плотность пара при $\phi = 0,6$ и $t = 30^\circ\text{C}$ будет $\rho_n = \phi \rho_{n0} = 0,6 \cdot 0,0304 = 0,01824$ кг/м³.

В момент консервации в камере сгорания находилась влага массой

$$m_1 = V \rho_n = 3 \cdot 0,01824 = 0,05472 \text{ кг} = 54,72 \text{ г}.$$

При $t = -20^\circ\text{C}$ и $\phi = 0,5$ в камере сгорания может содержаться влага массой $m_2 = V \rho_n = 3 \cdot 0,5 \cdot 0,98 = 1,47 \text{ г}$. Следовательно, необходимо поглотить

$$\Delta m = m_1 - m_2 = 54,72 - 1,47 = 53,15 \text{ г}.$$

Необходимая масса силикагеля

$$\Delta m / 0,2 = 53,15 / 0,2 < 266 \text{ г}.$$

7.9. Состояние влажного воздуха характеризуется температурой $t = 30^\circ\text{C}$ и относительной влажностью $\phi = 0,4$. Определить энтальпию влажного и сухого воздуха, а также энтальпию влаги, содержащейся в воздухе. Задачу решить, применяя di -диаграмму.

7.10. Наружный воздух, имеющий температуру 20°C , барометрическое давление 0,1 МПа и влагосодержание $d = 8$ г/кг, подогревается в калорифере до температуры 40°C . Определить относительную влажность воздуха.

Решение. Значение ρ_n определяется по табл. 5 Приложения: при температуре $t = 20^\circ\text{C}$ $\rho_n = 2,337 \cdot 10^{-3}$ МПа.

Парциальное давление водяного пара при постоянном барометрическом давлении 0,1 МПа определяется по формуле

$$p_n = pd/(622 + d) = 0,1 \cdot 8/(622 + 8) = 1,27 \cdot 10^{-3} \text{ МПа.}$$

Следовательно, относительная влажность воздуха

$$\varphi_1 = p_n/p_n = 1,27 \cdot 10^{-3}/(2,337 \cdot 10^{-3}) = 0,54 \text{ (54 \%)}.$$

При подогреве воздуха его влагосодержание не изменяется, поэтому остается неизменным и парциальное давление пара. Давление насыщения p_n при температуре $t = 40^\circ\text{C}$ согласно табл. 5 Приложения составляет $7,38 \cdot 10^{-3}$ МПа. Поэтому

$$\varphi_2 = p_n/p_n = 1,27 \cdot 10^{-3}/(7,38 \cdot 10^{-3}) = 0,17 \text{ (17 \%)}.$$

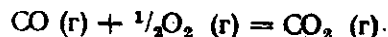
7.11. Воздух при начальной температуре $t_1 = 25^\circ\text{C}$ и относительной влажности $\varphi_1 = 0,8$ охлаждается до температуры $t_2 = 10^\circ\text{C}$. Определить количество теплоты, которое необходимо отвести от воздуха на 1 кг выпавшей влаги. Задачу решить с помощью di -диаграммы.

ГЛАВА 8

ХИМИЧЕСКАЯ ТЕРМОДИНАМИКА

§ 8.1. Термохимия

8.1. Определить тепловой эффект ΔI реакции [6]



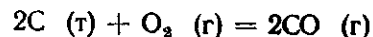
при постоянном давлении и температуре 293 К, если тепловой эффект этой реакции при постоянном объеме и той же температуре равен $\Delta U = -2,84 \cdot 10^5$ кДж/кмоль.

8.2. Определить тепловой эффект ΔU реакции



при температуре 1173 К, если при этой температуре тепловой эффект $\Delta I = 1,78 \cdot 10^5$ кДж/кмоль.

8.3. Тепловой эффект реакции



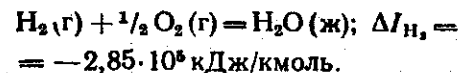
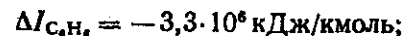
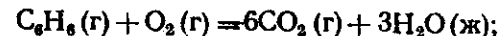
при температуре 1473 К $\Delta U = -2,2 \cdot 10^6$ кДж. Определить тепловой эффект ΔI реакции



Решение. Для второй реакции $\Delta U = -1,1 \cdot 10^5$ кДж. Имея в виду, что $\sum \nu_i = 1 - 1/2 = 1/2$, получим

$$\Delta I = \Delta U + 8,3147T \sum \nu_i = -1,1 \cdot 10^5 + 8,314 \cdot 1473 \times 1/2 = -1,04 \cdot 10^5 \text{ кДж.}$$

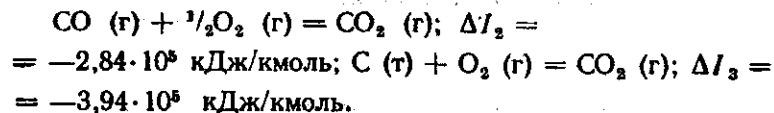
8.4. Определить тепловой эффект реакции образования бензола, если известны тепловые эффекты следующих реакций сгорания:



8.5. Определить тепловой эффект ΔI_1 реакции



если известны тепловые эффекты реакций:



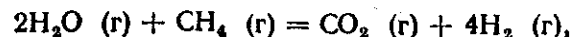
Решение. а) Умножая уравнение второй реакции на (-1) и складывая с уравнением третьей реакции, можно получить уравнение первой реакции. Отсюда

$$\begin{aligned} \Delta I_1 &= -\Delta I_2 + \Delta I_3 = 2,84 \cdot 10^5 - 3,94 \cdot 10^5 = \\ &= -1,1 \cdot 10^5 \text{ кДж/кмоль}. \end{aligned}$$

б) Так как вторая и третья реакции являются реакциями сгорания веществ, входящих в первую реакцию, то тепловой эффект ее можно определить из уравнения

$$\begin{aligned} \Delta I &= -\sum_i \nu_i \Delta I_{\text{сг}i} = -(\Delta I_2 - \Delta I_3) = 2,84 \cdot 10^5 - \\ &- 3,94 \cdot 10^5 = -1,1 \cdot 10^5 \text{ кДж/кмоль}. \end{aligned}$$

8.6. Определить тепловой эффект ΔI реакции



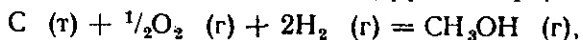
если известны тепловые эффекты образования реагирующих веществ:

$$\Delta I_{\text{CO}_2} = -3,49 \cdot 10^5 \text{ кДж/кмоль};$$

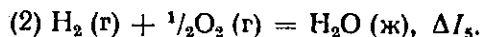
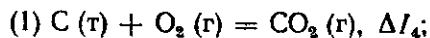
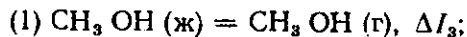
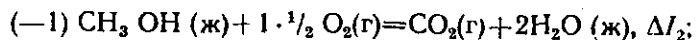
$$\Delta I_{\text{H}_2\text{O}} = -2,42 \cdot 10^5 \text{ кДж/кмоль};$$

$$\Delta I_{\text{CH}_4} = -0,74 \cdot 10^5 \text{ кДж/кмоль}.$$

8.7. Определить тепловой эффект ΔI_1 реакции



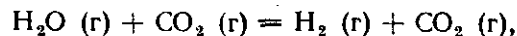
если известны тепловые эффекты следующих реакций:



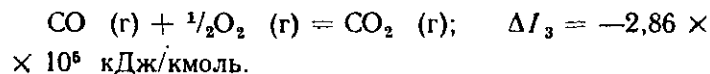
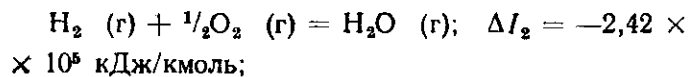
Решение. Умножая уравнения реакций, тепловые эффекты которых известны, на коэффициенты, указанные в скобках перед реакциями и складывая их, получим уравнения первой реакции. Отсюда

$$\Delta I_1 = -\Delta I_2 + \Delta I_3 + \Delta I_4 + 2\Delta I_5.$$

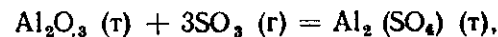
8.8. Определить тепловой эффект ΔI_1 реакции



если известны тепловые эффекты реакций:



8.9. Определить тепловой эффект ΔI реакции



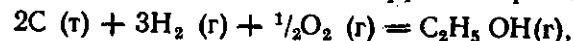
если известны тепловые эффекты образования реагирующих веществ:

$$\Delta I_{\text{Al}_2\text{O}_3} = -1,67 \cdot 10^6 \text{ кДж/кмоль};$$

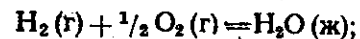
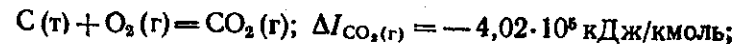
$$\Delta I_{\text{SO}_3 \text{ (г)}} = -0,395 \cdot 10^6 \text{ кДж/кмоль};$$

$$\Delta I_{\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \text{ (г)}} = -3,44 \cdot 10^6 \text{ кДж/кмоль}.$$

8.10. Определить тепловой эффект ΔI реакции

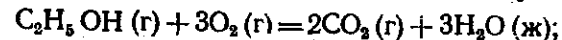


если известны тепловые эффекты реакции образования веществ



$$\Delta I_{\text{H}_2\text{O (ж)}} = -2,85 \cdot 10^5 \text{ кДж/кмоль}$$

и тепловой эффект сгорания этилового спирта



$$\Delta I_{\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}} = -14,15 \cdot 10^5 \text{ кДж/кмоль}.$$

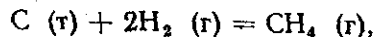
Решение. Имея в виду, что тепловые эффекты образования CO_2 и H_2O являются тепловыми эффектами сгорания углерода и водорода, получим

$$\Delta I = -\sum_i \nu_i \Delta I_{\text{сг}i} = -(\Delta I_{\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}} - 2\Delta I_{\text{C}} - 3\Delta I_{\text{H}_2}) =$$

$$= 14,15 \cdot 10^5 - 2 \cdot 4,02 \cdot 10^5 - 3 \cdot 2,85 \cdot 10^5 =$$

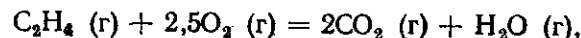
$$= -2,44 \cdot 10^5 \text{ кДж/кмоль}.$$

8.11. Определить тепловой эффект ΔI реакции



если известны тепловой эффект сгорания метана $\Delta I_{\text{CH}_4} = -8,875 \cdot 10^5 \text{ кДж/кмоль}$; тепловой эффект образования углекислоты $\Delta I_{\text{CO}_2} = -4,02 \cdot 10^5 \text{ кДж/кмоль}$ и тепловой эффект образования воды $\Delta I_{\text{H}_2\text{O (ж)}} = -2,85 \cdot 10^5 \text{ кДж/кмоль}$.

8.12. Определить тепловой эффект ΔI сгорания ацетилена (C_2H_2)



если известны тепловые эффекты реакции образования веществ

$$\Delta I_{\text{C}_2\text{H}_2} = 2,26 \cdot 10^5 \text{ кДж/кмоль};$$

$$\Delta I_{\text{CO}_2} = -3,95 \cdot 10^5 \text{ кДж/кмоль};$$

$$\Delta I_{\text{H}_2\text{O}} = -2,43 \cdot 10^5 \text{ кДж/кмоль}.$$

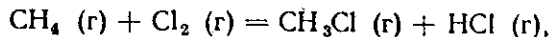
Решение.

$$\Delta I = \sum_i \nu_i \Delta I_{\text{обр}i} = -2 \cdot 3,95 \cdot 10^5 - 2,43 \cdot 10^5 - 2,26 \cdot 10^5 =$$

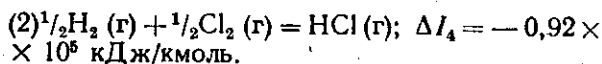
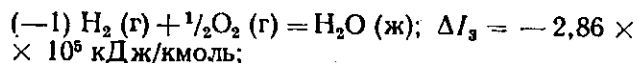
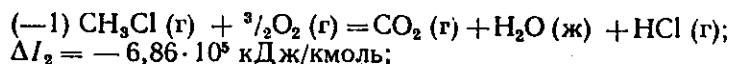
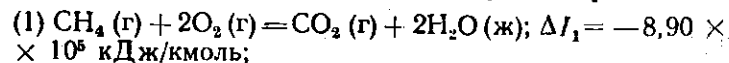
$$= -1,26 \cdot 10^6 \text{ кДж/кмоль}.$$

8.13. Определить тепловой эффект $\Delta I_{\text{H}_2\text{O}(\text{г})}$ образования водяного пара, если известны тепловой эффект образования воды $\Delta I_{\text{H}_2\text{O}(\text{ж})} = 2,87 \cdot 10^5$ кДж/кмоль и скрытая теплота парообразования $r = 4 \cdot 10^4$ кДж/кмоль.

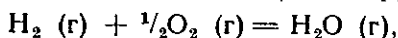
8.14. Найти тепловой эффект ΔI реакции



если известны тепловые эффекты следующих реакций:



8.15. Определить тепловой эффект ΔI реакции



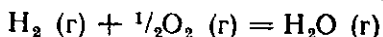
при температуре 1500 К, если известны тепловой эффект данной реакции при температуре 298 К $\Delta I_1 = -2,42 \times 10^5$ кДж/кмоль и истинные молярные теплоемкости следующих веществ:

$$(\bar{c}_p)_{\text{H}_2\text{O}} = 33,1 + 0,0107T + 1,18 \cdot 10^{-6} T^2;$$

$$(\bar{c}_p)_{\text{O}_2} = 25,52 + 0,0137T - 4,26 \cdot 10^{-6} T^2;$$

$$(\bar{c}_p)_{\text{H}_2} = 29,1 + 0,008T + 2,01 \cdot 10^{-6} T^2.$$

8.16. Определить тепловой эффект ΔI реакции



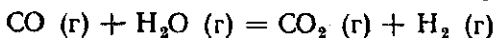
при температуре 2000 °С, если известны тепловой эффект реакции при температуре 0 °С $\Delta I_1 = -2,42 \cdot 10^5$ кДж/кмоль и средние молярные теплоемкости веществ при температуре 2000 °С:

$$(\bar{c}_p)_{\text{H}_2} = 31,58 \text{ кДж/(кмоль} \cdot \text{К)};$$

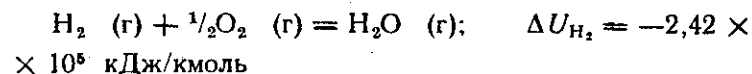
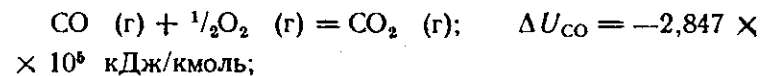
$$(\bar{c}_p)_{\text{O}_2} = 35,18 \text{ кДж/(кмоль} \cdot \text{К)};$$

$$(\bar{c}_p)_{\text{H}_2\text{O}} = 43,56 \text{ кДж/(кмоль} \cdot \text{К)}.$$

8.17. Найти зависимость теплового эффекта ΔU реакции



от температуры и определить значение его при температуре 1000 К, если известны тепловые эффекты при $T = 300$ К реакций:



и уравнения для истинных молярных теплоемкостей веществ:

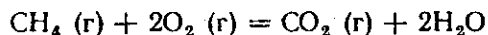
$$(\bar{c}_p)_{\text{CO}} = 19,59 + 42 \cdot 10^{-3} T;$$

$$(\bar{c}_p)_{\text{H}_2} = 19,46 + 3,1 \cdot 10^{-3} T;$$

$$(\bar{c}_p)_{\text{H}_2\text{O}} = 24,074 + 6,5 \cdot 10^{-3} T + 7,863 \cdot 10^{-6} T^2;$$

$$(\bar{c}_p)_{\text{CO}_2} = 21,38 + 1,4 \cdot 10^{-2} T - 3,677 \cdot 10^{-6} T^2.$$

8.18. Определить тепловой эффект ΔU сгорания метана



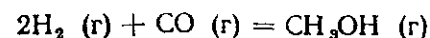
при температуре $t_2 = 1200$ °С, если известны тепловой эффект при температуре $t_1 = 25$ °С $\Delta U_{t_1} = -804\,000$ кДж/кмоль и средние молярные теплоемкости следующих веществ:

	$\text{CH}_4 (\text{г})$	$\text{O}_2 (\text{г})$	$\text{CO}_2 (\text{г})$	$\text{H}_2\text{O} (\text{г})$
$\bar{c}_p \Big _{25}^{25}, \text{ кДж/(кмоль} \cdot \text{К)}$	27,14	21,02	28,48	25,62
$\bar{c}_p \Big _0^{1200}, \text{ кДж/(кмоль} \cdot \text{К)}$	55,86	25,31	42,43	31,51

Решение.

$$\begin{aligned} \Delta U_{t_2} &= \Delta U_{t_1} + \sum_i \nu_i \bar{c}_{pi} \Big|_0^{t_2} \cdot t_2 - \sum_i \nu_i \bar{c}_{pi} \Big|_0^{t_1} \cdot t_1 = \\ &= -804\,000 + (42,43 + 2 \cdot 31,51 - 55,86 - 2 \cdot 25,31) 1200 - \\ &\quad - (28,48 + 2 \cdot 25,62 - 27,14 - 2 \cdot 21,02) 25 = \\ &= -805\,500 \text{ кДж/кмоль}. \end{aligned}$$

8.19. Определить зависимость теплового эффекта реакции



от температуры при постоянном давлении, если стандартные тепловые эффекты образования CO (г) и $\text{CH}_3\text{OH (г)}$ соответственно равны $-110 \cdot 10^3$ и $-201 \cdot 10^3$ кДж/кмоль, а зависимость молярной теплоемкости реагентов [кДж/(кмоль·К)] от температуры (К) описывается следующими уравнениями:

$$(\mu_{C_p})_{\text{H}_2} = 27,28 + 3,26 \cdot 10^{-3} T;$$

$$(\mu_{C_p})_{\text{CO}} = 28,41 + 4,10 \cdot 10^{-3} T;$$

$$(\mu_{C_p})_{\text{CH}_3\text{OH}} = 15,28 + 105 \cdot 10^{-3} T.$$

Вычислить тепловой эффект этой реакции при температуре 1000 К.

$$\text{Решение. } \Delta I_{298} = \sum_i \nu_i \Delta I_{\text{обр } i} = \Delta I_{\text{CH}_3\text{OH}} - \Delta I_{\text{CO}} =$$

$$= -201 \cdot 10^3 + 110 \cdot 10^3 = -91 \cdot 10^3 \text{ кДж};$$

$$\Delta I_T = \Delta I_0 + \sum_i \nu_i \alpha_i T + \frac{1}{2} \sum_i \nu_i \beta_i T^2 =$$

$$= \Delta I_0 - 67,69T + 47,19 \cdot 10^{-3} T^2,$$

где

$$\sum_i \nu_i \alpha_i = 15,28 - 28,41 - 2 \cdot 27,28 = -67,69;$$

$$\sum_i \nu_i \beta_i = 105 \cdot 10^{-3} - 4 \cdot 10^{-3} - 2 \cdot 3,26 \cdot 10^{-3} = 94,38 \cdot 10^{-3}.$$

Относя это уравнение к стандартной температуре 298 К и подставляя значение теплового эффекта реакции, найденное выше, получим значение константы

$$\Delta I_0 = -91 \cdot 10^3 + 67,69 \cdot 298 - 47,19 \cdot 10^{-3} \cdot 298^2 =$$

$$= -75 \cdot 10^3 \text{ кДж}.$$

Зависимость теплового эффекта реакции от температуры будет иметь вид

$$\Delta I_T = -75 \cdot 10^3 - 67,69T + 47,19 \cdot 10^{-3} T^2.$$

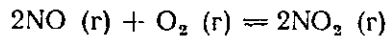
Подставляя в данное уравнение температуру 1000 К, получим

$$\Delta I_{T=1000} = -75 \cdot 10^3 - 67,69 \cdot 1000 + 47,19 \cdot 10^{-3} \cdot 1000^2 =$$

$$= -95,5 \cdot 10^3 \text{ кДж}.$$

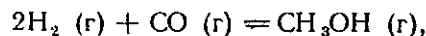
§ 8.2. Химическое равновесие

8.20. Константа равновесия реакции

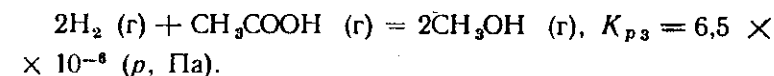
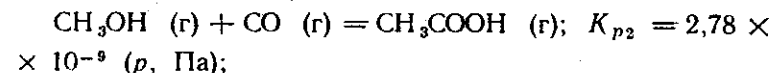


при температуре 663 К $K_p = p_{\text{NO}_2}^2 / (p_{\text{NO}}^2 p_{\text{O}_2}) = 25,6 \times 10^{-5}$ (р, Па). Определить константу равновесия K_c .

8.21. Определить константу равновесия K_{p1} при 600 К для реакции



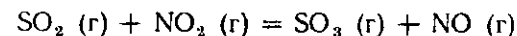
если при этой температуре известны константы равновесия реакций:



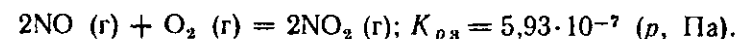
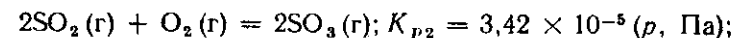
Решение. Складывая уравнения второй и третьей реакций, можно получить уравнение первой реакции. Следовательно, $\Delta G_1^\circ = \Delta G_2^\circ + \Delta G_3^\circ$. Учитывая, что $\Delta G^\circ = -R_\mu T \ln K_p$, получим связь между константами равновесия в виде $\ln K_{p1} = \ln K_{p2} + \ln K_{p3}$, откуда

$$K_{p1} = K_{p2} K_{p3} = 2,78 \cdot 10^{-9} \cdot 6,5 \cdot 10^{-8} = 1,81 \cdot 10^{-14} \text{ (р, Па)}.$$

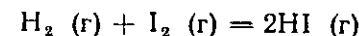
8.22. Определить константу равновесия K_{p1} реакции



при температуре 730 К, если известны константы равновесия следующих реакций при этой температуре:



8.23. Определить направление течения реакции



в смеси реагирующих веществ при температуре 717 К и следующих значениях молярных концентраций компонентов (кмоль/м³):

а) $C_{\text{H}_2} = 2$, $C_{\text{I}_2} = 5$, $C_{\text{HI}} = 10$; б) $C_{\text{H}_2} = 1,5$, $C_{\text{I}_2} = 0,25$, $C_{\text{HI}} = 5$; в) $C_{\text{H}_2} = 1$, $C_{\text{I}_2} = 2$, $C_{\text{HI}} = 10$. При $T = 717$ К константа равновесия реакции $K_c = 50$.

Решение. Подставляя в уравнение изотермы соответствующие величины, получим:

а) $\Delta F_1 = 8,314 \cdot 717 \cdot 2,3 \left(\lg \frac{10^2}{2,5} - \lg 50 \right) = -9583 \text{ кДж} < 0$, реакция будет протекать в направлении образования HI;

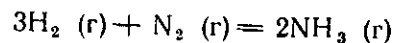
б) $\Delta F_2 = 8,314 \cdot 717 \cdot 2,3 \left(\lg \frac{5^2}{1,5 \cdot 0,25} - \lg 50 \right) = 1713 \text{ кДж} > 0$, реакция будет протекать в направлении диссоциации HI;

в) $\Delta F_3 = 8,314 \cdot 717 \cdot 2,3 \left(\lg \frac{10^2}{1,2} - \lg 50 \right) = 0$, система находится в химическом равновесии.

8.24. Для реакции $\text{CO (г)} + \text{H}_2\text{O (г)} = \text{CO}_2 \text{ (г)} + \text{H}_2 \text{ (г)}$ при температуре 1500 К константа равновесия $K_p = 0,3$ (р, Па). Определить, в каком направлении будет протекать реакция при следующих значениях парциальных давлений компонентов в смеси: а) $p_{\text{CO}} = 2 \cdot 10^5$ Па; $p_{\text{H}_2\text{O}} = 6 \times 10^5$ Па; $p_{\text{CO}_2} = 4 \cdot 10^5$ Па; $p_{\text{H}_2} = 3 \cdot 10^5$ Па; б) $p_{\text{CO}} = 20 \cdot 10^5$ Па; $p_{\text{H}_2\text{O}} = 5 \cdot 10^5$ Па; $p_{\text{CO}_2} = 6 \cdot 10^5$ Па; $p_{\text{H}_2} = 2 \cdot 10^5$ Па.

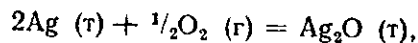
8.25. Для реакции $2\text{FeO (т)} = 2\text{Fe (т)} + \text{O}_2 \text{ (г)}$ при температуре 1000 К константа равновесия $K_p = 3 \cdot 10^{-3}$ (р, Па). Определить, в каком направлении будет протекать реакция, при следующих значениях парциального давления кислорода над смесью окиси железа и железа: а) $p_{\text{O}_2} = 4 \cdot 10^{-3}$ Па; б) $p_{\text{O}_2} = 2 \cdot 10^{-3}$ Па.

8.26. Вычислить химическое сродство H_2 и N_2 в реакции



при температуре 723 К и определить направление реакции, если при данной температуре константа равновесия $K_c = 1,93$ и начальные молярные концентрации веществ в смеси: $C_{\text{H}_2} = 5 \text{ кмоль/м}^3$, $C_{\text{N}_2} = 3 \text{ кмоль/м}^3$, $C_{\text{NH}_3} = 6 \text{ кмоль/м}^3$.

8.27. Определить стандартное химическое сродство реакции



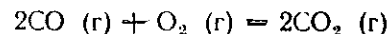
если известно, что давление над Ag_2O при температуре 298 К и химическом равновесии равно $5 \cdot 10^{-3}$ Па.

Решение. Константа равновесия реакции $K_p = 1/p_{\text{O}_2}^{1/2} = \sqrt{10^3/5} = 14,14$ (р, Па). Подставляя это зна-

чение в уравнение для стандартного химического сродства, получим

$$\Delta G_{298}^\circ = -8,314 \cdot 298 \cdot 2,3 \lg 14,14 = -6560 \text{ кДж}.$$

8.28. Определить нормальное химическое сродство для реакции



при температуре 1273 К, если степень диссоциации CO_2 при этой температуре и давлении $p = 1$ гПа равна $\alpha = 3 \cdot 10^{-5}$.

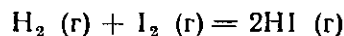
Решение. Выразим количество веществ в момент равновесия через степень диссоциации: $n_{\text{CO}_2} = 2(1 - \alpha)$; $n_{\text{CO}} = 2\alpha$; $n_{\text{O}_2} = \alpha$. Общее количество веществ в равновесной смеси $\sum_i n_i = 2 + \alpha$. Подставляя количество веществ в выражение для константы равновесия, получим

$$K_p = \prod_i n_i^{v_i} \left(\frac{p}{\sum n_i} \right)^{\sum v_i} = \frac{4(1-\alpha)^2(2+\alpha)}{4\alpha^3 p} \simeq \simeq \frac{2}{p\alpha^3}, \text{ где } \sum_i v_i = -1.$$

Стандартное химическое сродство находится из уравнения

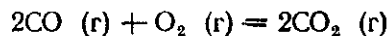
$$\Delta G^\circ = -R_\mu T \ln K_p = -8,314 \cdot 1273 \cdot 2,3 \lg \frac{2}{1(3 \cdot 10^{-5})^3} = -3,38 \cdot 10^5 \text{ кДж/кмоль}.$$

8.29. Константа равновесия реакции



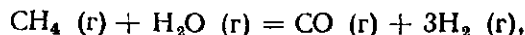
при температуре 633 К $K_{p1} = 66,5$, а при температуре 717 К $K_{p2} = 50$. Определить стандартное химическое сродство при температуре 717 К и средний тепловой эффект реакции в данном интервале температур.

8.30. Определить средний тепловой эффект ΔI реакции



в пределах температур от 2000 до 2500 К, если известны константы равновесия этой реакции: при 2000 К $K_{p1} = 3,91 \cdot 10^{-6}$ (р, Па); при 2500 К $K_{p2} = 2,22 \cdot 10^{-10}$ (р, Па).

8.31. Для реакции, протекающей по уравнению

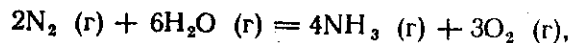


зависимость константы равновесия от температуры выражается уравнением

$$\lg K_p = -9876/T + 8,18 \lg T - 1,96 \cdot 10^{-3} T - 11,4.$$

Определить тепловой эффект реакции при температуре 2000 К.

8.32. Для реакции, протекающей по уравнению



зависимость константы равновесия от температуры выражается уравнением

$$\lg K_p = -66\,250/T - 1,75 \lg T - 5,2.$$

Определить тепловой эффект реакции и стандартное химическое сродство при температуре 2000 К.

Решение. Из уравнения изобары имеем $\Delta I = R_\mu T^2 \times (d \ln K_p / dT)$. Используя зависимость константы равновесия от температуры, находим производную

$$\begin{aligned} \frac{d \ln K_p}{dT} &= \frac{d}{dT} \left[2,3 \left(-\frac{66\,250}{T} - 1,75 \lg T - 5,2 \right) \right] = \\ &= \frac{2,3 \cdot 66\,250}{T^2} - \frac{1,75}{T}. \end{aligned}$$

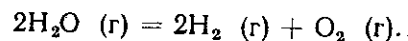
Подставляя производную и значение температуры $T = 2000$ К в уравнение изобары, имеем

$$\Delta I = 8,314 (2,3 \cdot 66\,250 - 1,75T) = 8,314 (2,3 \cdot 66\,250 - 1,75 \cdot 2000) = 12,38 \cdot 10^5 \text{ кДж}.$$

Подставляя в уравнение для стандартного химического сродства зависимость константы равновесия от температуры и значение $T = 2000$ К, получим

$$\begin{aligned} \Delta G^\circ &= -R_\mu T \ln K_p = 2,3 \cdot 8,314T (66\,250/T + 1,75 \times \\ &\times \lg T + 5,2) = 2,3 \cdot 8,314 \cdot 2000 (66\,250/2000 + 1,75 \times \\ &\times \lg 2000 + 5,2) = 16,86 \cdot 10^5 \text{ кДж}. \end{aligned}$$

8.33. Установить влияние объема и давления на степень диссоциации H_2O в реакции



Решение. Полагая, что перед диссоциацией вещества H_2 и O_2 отсутствуют, а количество вещества H_2O равно N , выразим количества веществ в равновесной смеси через степень диссоциации α : $n_{\text{H}_2} = N\alpha$; $n_{\text{O}_2} = 1/2 N\alpha$; $n_{\text{H}_2\text{O}} = N(1 - \alpha)$. Общее количество веществ в равновесной сме-

си $\sum_i n_i = N(1 + \alpha/2)$. Подставляя количество веществ в выражения для константы равновесия, получим

$$K_p = \prod_i n_i^{\nu_i} \left(\frac{p}{\sum_i n_i} \right)^{\sum \nu_i} = \frac{\alpha^3 p}{(1 - \alpha)^2 (2 + \alpha)};$$

$$K_p = \prod_i n_i^{\nu_i} \left(\frac{R_\mu T}{V} \right)^{\sum \nu_i} = \frac{\alpha^3 R_\mu T N}{2(1 - \alpha)V}, \text{ где } \sum_i \nu_i = +1.$$

Учитывая, что степени диссоциации обычно малы в сравнении с единицей, можно записать приближенные выражения в виде

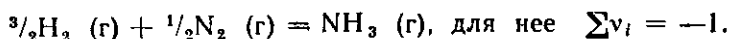
$$K_p \simeq \alpha^3 p/2; K_p \simeq \alpha^3 R_\mu T N/(2V).$$

Имея в виду, что константа равновесия K_p зависит только от температуры и при постоянной температуре остается неизменной, можно заключить, что степень диссоциации данной реакции увеличивается с увеличением объема и уменьшается с увеличением давления.

8.34. Установить влияние объема и давления на степень диссоциации HI в реакции $2\text{HI} (\text{г}) = \text{H}_2 (\text{г}) + \text{I}_2 (\text{г})$.

8.35. Смесь, содержащая молярные доли $\text{H}_2 = 60\%$, $\text{N}_2 = 20\%$ инертного газа $\text{I} = 20\%$, реагирует с образованием NH_3 при давлении 5 МПа и температуре 673 К. Определить молярную долю H_2 , который превращается в NH_3 , и молярную долю NH_3 в образовавшейся смеси. Константа равновесия $K_p = 0,0125$.

Решение. Уравнение реакции имеет вид



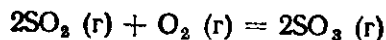
Количества веществ (кмоль) в исходной смеси: $N_{\text{H}_2} = 60$, $N_{\text{N}_2} = 20$, $N_{\text{NH}_3} = 0$, $N_{\text{I}} = 20$; в равновесной смеси: $n_{\text{H}_2} = 60(1 - x)$, $n_{\text{N}_2} = 20(1 - x)$, $n_{\text{NH}_3} = 60 \cdot 2/3 x$, $n_{\text{I}} = 20$, где x — степень превращения водорода. Общее количество веществ в равновесной смеси $\sum_i n_i = 100 - 40x$.

Подставляя количества веществ в равновесной смеси и значение константы равновесия в уравнение $K_p = \prod_i n_i^{\nu_i} \times$

$\times \left(\frac{p}{\sum_i n_i} \right)^{\sum \nu_i}$, получим

$$0,0125 = \frac{40x}{[60(1 - x)]^{3/2} [20(1 - x)]^{1/2}} \cdot \frac{100 - 40x}{50}.$$

8.42. Константа равновесия реакции



при давлении $1,013 \cdot 10^5$ Па и температуре 1000 К $K_p = 2,4 \cdot 10^{-6}$ (р, Па). Определить количества веществ в равновесной смеси, если в исходной смеси содержится $\text{SO}_2 = 1$ кмоль и $\text{O}_2 = 0,6$ кмоль.

8.43. Константа равновесия реакции $\text{O}_2 (\text{г}) + \text{N}_2 (\text{г}) = 2\text{NO} (\text{г})$ при давлении 1,013 МПа и температуре 2700 К $K_p = 3,5 \cdot 10^{-3}$ (р, Па). Определить выход NO из воздуха при данной температуре и состав равновесной смеси.

Решение. Состав воздуха в объемных (молярных) долях: $r_{\text{O}_2} = 0,21$, $r_{\text{N}_2} = 0,79$. Обозначив количество вещества образовавшегося NO (выход) через z , можно записать состав исходной смеси: $N_{\text{O}_2} = 0,21$, $N_{\text{N}_2} = 0,79$, $N_{\text{NO}} = 0$; равновесной смеси: $n_{\text{O}_2} = 0,21 - 1/2 z$, $n_{\text{N}_2} = 0,79 - 1/2 z$, $n_{\text{NO}} = z$. Общее количество веществ в равновесной смеси $\sum_i n_i = 1$.

Подставляя соответствующие значения в уравнение для константы равновесия $K_p = \prod_i n_i^{v_i} (p / \sum_i n_i)^{\sum v_i}$ и имея в виду, что $\sum v_i = 0$, получим

$$3,5 \cdot 10^{-3} = z^2 / [(0,21 - 1/2 z) (0,79 - 1/2 z)].$$

Решение уравнения дает значение выхода реакции $z = 0,023$. Следовательно, в равновесной смеси имеем $n_{\text{O}_2} = 0,21 - 1/2 \cdot 0,023 = 0,198$; $n_{\text{N}_2} = 0,79 - 1/2 \cdot 0,023 = 0,778$; $n_{\text{NO}} = 0,023$.

8.44. В предыдущей задаче определить меру реакции.

8.45. Перед реакцией в сосуде находилась смесь, состоящая из 14 г CO, 18 г H_2O , 1 г H_2 , 22 г CO_2 . Определить направление реакции $\text{CO} (\text{г}) + \text{H}_2\text{O} (\text{г}) = \text{CO}_2 (\text{г}) + \text{H}_2 (\text{г})$, если при данной температуре константа равновесия $K_p = 1$.

Решение. Количества веществ (кмоль) перед реакцией:

$N_{\text{CO}} = 14/28 = 0,5$; $N_{\text{H}_2\text{O}} = 18/18 = 1,0$; $N_{\text{H}_2} = 1/2 = 0,5$; $N_{\text{CO}_2} = 22/44 = 0,5$. Используя выражение $n_i = N_i + v_i \Delta \xi$, запишем количества веществ в равновесной смеси $n_{\text{CO}} = 0,5 - \Delta \xi$; $n_{\text{H}_2\text{O}} = 1,0 - \Delta \xi$; $n_{\text{H}_2} = 0,5 + \Delta \xi$; $n_{\text{CO}_2} = 0,5 + \Delta \xi$; $\sum_i n_i = 0,5 - \Delta \xi + 1,0 - \Delta \xi + 0,5 + \Delta \xi + 0,5 + \Delta \xi = 2,5$. Подставляя соот-

ветствующие значения в уравнение $K_p = \prod_i n_i^{v_i} (p / \sum_i n_i)^{\sum v_i}$ и имея в виду, что $\sum v_i = 0$, получим

$$1 = (0,5 + \Delta \xi) (0,5 + \Delta \xi) / (0,5 - \Delta \xi) (0,5 - \Delta \xi).$$

Решение уравнения дает значение меры реакции $\Delta \xi = 0,1$.

Количества веществ в равновесной смеси (кмоль): $n_{\text{CO}} = 0,5 - 0,1 = 0,4$; $n_{\text{H}_2\text{O}} = 1,0 - 0,1 = 0,9$; $n_{\text{H}_2} = 0,5 + 0,1 = 0,6$; $n_{\text{CO}_2} = 0,5 + 0,1 = 0,6$.

Имея в виду, что $p_i = (N_i / \sum N_i) p$; $\prod_i p_i^{v_i} = \prod_i N_i^{v_i} \times$

$\times (p / \sum N_i)^{\sum v_i}$; $\sum v_i = 0$, можно переписать уравнение изотермы для данной реакции в виде

$$\Delta G = R_\mu T \left(\ln \frac{N_{\text{CO}_2} N_{\text{H}_2}}{N_{\text{CO}} N_{\text{H}_2\text{O}}} - \ln K_p \right).$$

Подставляя соответствующие значения, имеем

$$\Delta G = R_\mu T \left(\ln \frac{0,5 \cdot 0,5}{0,5 \cdot 1,0} - \ln 1 \right) < 0.$$

Следовательно, реакция будет протекать слева направо.

8.46. 1 кмоль HI нагревается до температуры, при которой константа равновесия реакции $\text{H}_2 (\text{г}) + \text{I}_2 (\text{г}) = 2\text{HI} (\text{г})$ равна $K_p = 50$. Определить степень диссоциации HI.

8.47. Смесь, состоящая из 1 кмоль Fe_3O_4 , 2 кмоль CO, 0,5 кмоль FeO и 0,3 кмоль CO_2 , нагрета до температуры 875 К, при которой константа равновесия реакции

$\text{Fe}_3\text{O}_4 (\text{г}) + \text{CO} (\text{г}) = 3\text{FeO} (\text{г}) + \text{CO}_2 (\text{г})$ равна $K_p = 1,15$. Определить количества веществ в равновесной смеси.

8.48. При нагревании смеси, состоящей из 1 кмоль метана (CH_4) и 1 кмоль водяного пара (H_2O), до некоторой температуры при давлении $1,013 \cdot 10^5$ Па происходит реакция $\text{CH}_4 (\text{г}) + \text{H}_2\text{O} (\text{г}) = \text{CO} (\text{г}) + 3\text{H}_2 (\text{г})$. В равновесной смеси оказывается 70 % водорода H_2 по объему. Определить константу равновесия этой реакции.

Решение. Состав исходной смеси: $N_{\text{CH}_4} = 1$, $N_{\text{H}_2\text{O}} = 1$, $N_{\text{CO}} = N_{\text{H}_2} = 0$. На основе уравнения $n_i = N_i + v_i \Delta \xi$ количества веществ в равновесной смеси можно выразить через меру реакции в виде: $n_{\text{CH}_4} = 1 - \Delta \xi$; $n_{\text{H}_2\text{O}} = 1 -$

— $\Delta\xi$; $n_{\text{CO}} = \Delta\xi$; $n_{\text{H}_2} = 3\Delta\xi$; $\sum n_i = 2 + 2\Delta\xi$. Из выражения для объемной доли водорода в равновесной смеси имеем $n_{\text{H}_2}/\sum n_i = 3\Delta\xi/(2 + 2\Delta\xi)$. Отсюда значение меры реакции $\Delta\xi = 0,875$.

Подставляя количества веществ в выражение для константы равновесия $K_p = \prod n_i^{\nu_i} (p/\sum n_i)^{\sum \nu_i}$ и имея в виду, что $\sum \nu_i = 2$, получим

$$K_p = [\Delta\xi (3\Delta\xi)^3 / (1 - \Delta\xi) (1 - \Delta\xi) (p/(2 + 2\Delta\xi))]^2.$$

Подставляя значения меры реакции и давления, получим

$$K_p = \frac{0,875 \cdot 27 \cdot 0,875^3}{0,125 \cdot 0,125} \left(\frac{1,013 \cdot 10^5}{2 + 2 \cdot 0,875} \right)^2 = 74 \cdot 10^{10} (p, \text{Па}).$$

8.49. При температуре 1000 К и давлении $1,013 \cdot 10^5$ Па из исходной смеси, содержащей 1 кмоль SO_2 и 0,5 кмоль O_2 , при достижении равновесия образуется 0,3 кмоль SO_3 в соответствии с реакцией $2\text{SO}_2 (\text{г}) + \text{O}_2 (\text{г}) = 2\text{SO}_3 (\text{г})$. Определить константу равновесия.

Решение. На образование 0,3 кмоль SO_3 согласно уравнению реакции израсходовано 0,3 кмоль SO_2 и 0,15 кмоль O_2 . Отсюда состав равновесной смеси будет: $n_{\text{SO}_2} = 1 - 0,3 = 0,7$; $n_{\text{O}_2} = 0,5 - 0,15 = 0,35$; $n_{\text{SO}_3} = 0,3$; $\sum n_i = 1,35$. Подставляя количества веществ в равновесной смеси и давление в уравнение для константы равновесия $K_p = \prod n_i^{\nu_i} (p/\sum n_i)^{\sum \nu_i}$ и имея в виду, что $\sum \nu_i = -1$, получим

$$K_p = 0,3^2 \cdot 1,35 / (0,7^2 \cdot 0,35 \cdot 1,013 \cdot 10^5) = 0,7 \cdot 10^{-5} (p, \text{Па}).$$

8.50. Определить изменение свободной энтальпии реакции $\text{C} (\text{т}) + 2\text{H}_2 (\text{г}) = \text{CH}_4 (\text{г})$ при стандартных условиях, а также константу равновесия K_p при температуре 298 К. Из таблиц известно: $\Delta I_{298}^{\circ}(\text{CH}_4) = -80\,500$ кДж/кмоль, $S_{298}^{\circ}(\text{C}) = 5,9$ кДж/(кмоль·К), $S_{298}^{\circ}(\text{CH}_4) = 186$ кДж/(кмоль·К), $S_{298}^{\circ}(\text{H}_2) = 131$ кДж/(кмоль·К).

8.51. Для реакции $2\text{H}_2\text{S} (\text{г}) + 3\text{O}_2 (\text{г}) = 2\text{SO}_2 (\text{г}) + 2\text{H}_2\text{O} (\text{ж})$ известны из таблиц следующие величины:

$$\Delta I_{298}^{\circ} = -1130 \text{ кДж}; \Delta S_{298}^{\circ} = -388,3 \text{ Дж/К};$$

$$\Delta \mu_{\text{Cp}} = 74 \text{ кДж/(кмоль·К)}.$$

Выразить ΔI° (кДж), ΔU° (кДж), ΔG° (кДж), ΔS° (Дж/К) через температуру T (К).

8.52. Определить состав (в объемных долях) равновесной смеси, образованной из разных объемных долей H_2O и CO при температуре 600 К на основе следующих данных, взятых из таблиц:

$$\Delta I_{298}^{\circ}(\text{CO}_2) = -3,94 \cdot 10^5 \text{ кДж/кмоль};$$

$$S_{298}^{\circ}(\text{CO}_2) = 214 \text{ кДж/(кмоль·К)};$$

$$\Delta I_{298}^{\circ}(\text{CO}) = -1,11 \cdot 10^5 \text{ кДж/кмоль};$$

$$S_{298}^{\circ}(\text{CO}) = 198 \text{ кДж/(кмоль·К)};$$

$$\Delta I_{298}^{\circ}(\text{H}_2\text{O, г}) = -242 \cdot 10^3 \text{ кДж/кмоль};$$

$$S_{298}^{\circ}(\text{H}_2\text{O, г}) = 188 \text{ кДж/(кмоль·К)};$$

$$\Delta \mu_{\text{Cp}} = 7,2 \text{ кДж/(кмоль·К)} = \text{const};$$

$$S_{298}^{\circ}(\text{H}_2) = 131 \text{ кДж/(кмоль·К)}.$$

Решение. Уравнение реакции:



На основании уравнения

$$\Delta G_T^{\circ} = \Delta I_{298}^{\circ} + \int_{298}^T \Delta \mu_{\text{Cp}} dT - T \left(\Delta S_{298}^{\circ} + \int_{298}^T \frac{\Delta \mu_{\text{Cp}}}{T} dT \right)$$

имеем

$$\begin{aligned} \Delta G_T^{\circ} = & (\Delta I_{298}^{\circ}(\text{CO}_2) - \Delta I_{298}^{\circ}(\text{CO}) - \Delta I_{298}^{\circ}(\text{H}_2\text{O})) - \\ & - T(S_{298}^{\circ}(\text{CO}_2) + S_{298}^{\circ}(\text{H}_2) - S_{298}^{\circ}(\text{H}_2\text{O}) - S_{298}^{\circ}(\text{CO})) + \\ & + \int_{298}^T \Delta \mu_{\text{Cp}} dT - T \int_{298}^T \Delta \mu_{\text{Cp}} \frac{dT}{T} = (-3,94 + 1,11 + \\ & + 2,42) 10^5 - 600(214 + 131 - 198 - 188) - 7,2 \cdot 600 \times \\ & \times \left(2,3 \lg \frac{660}{298} + \frac{298}{600} - 1 \right) = -17\,250 \text{ кДж/кмоль}; \end{aligned}$$

$$\lg K_p = \frac{\Delta G_T^{\circ}}{19,15T} = \frac{-17\,250}{19,15 \cdot 600} = -1,5 = \bar{2},5;$$

$$K_p = 3,2 \cdot 10^{-2}.$$

Используя выражение $n_i = N_i + \nu_i \Delta\xi$, представим количества веществ в равновесной смеси через меру реакции в виде: $n_{\text{CO}_2} = \Delta\xi$; $n_{\text{H}_2} = \Delta\xi$; $n_{\text{H}_2\text{O}} = 50 - \Delta\xi$; $n_{\text{CO}} = 50 - \Delta\xi$. Для данной реакции $\sum \nu_i = 0$ и $K_p = K_n =$

$= \Pi n_i^{\nu_i}$. Подставляя количества веществ и значение константы равновесия в это выражение, имеем

$$3,2 \cdot 10^{-2} = \Delta \xi^2 / (50 - \Delta \xi)^2.$$

Решение уравнения дает значение меры реакции $\Delta \xi = 7,5 \%$. Следовательно, равновесная смесь будет содержать 7,5 % CO_2 , 7,5 % H_2 , 42,5 % CO и 42,5 % H_2O .

ГЛАВА 9

ИСТЕЧЕНИЕ И ДРОССЕЛИРОВАНИЕ

§ 9.1. Параметры адиабатически заторможенного газа

9.1. Самолет летит на высоте 1 км, а затем набирает высоту 10 км. Скорость полета 1000 км/ч. Каковы температура T и давление p , возникающие в передней критической точке носовой части самолета при полете на указанных высотах? Как возрастут эти величины при скорости полета 2000 км/ч?

Параметры атмосферного воздуха следует принимать в соответствии с «Таблицами стандартной атмосферы» [17], фрагменты из которых, достаточные для решения предлагаемых в этой главе задач, приводятся в табл. 9.1. Теплоемкость воздуха считать равной $c_p = 1,005$ кДж/(кг·К).

9.2. Известно, что температура в передней критической точке профиля крыла реактивного самолета на 500 К превышает температуру окружающего воздуха. Определить скорость самолета.

9.3. На какой высоте (или в каком интервале высот) полета со скоростью 860 м/с термодинамическая температура воздуха в передней критической точке летательного аппарата в 3 раза больше, чем во внешнем потоке?

9.4. На какой высоте полета давление в передней критической точке летательного аппарата превышает атмосферное в 2,6 раза, отличаясь от него на 82,2 кПа? Найти также скорость полета.

9.5. Какой высоте полета соответствуют значения параметров в передней критической точке самолета — 1,42 МПа, 670 К? Какова скорость полета? Аналитические зависимости температуры и давления воздуха от высоты в пределах тропосферы имеют вид: $T_h = 288,15 - 0,0065h$; $p_h = 0,1013 \times [1 - (h/44\,300)]^{5,256}$ (h, м).

Таблица 9.1

h, км	T_h , К	p_h , Па	$\rho_h \cdot 10$, кг/м ³	a_h , м/с
0,0	288,15	10 132	12,250	340,28
0,5	284,90	95 453	11,672	338,36
1,0	281,65	89 876	11,117	336,43
1,5	278,40	84 566	10,582	334,48
2,0	275,14	79 498	10,066	332,52
2,5	271,89	74 693	9,5706	330,55
3,0	268,64	70 125	9,0921	328,56
3,5	265,38	65 774	8,6345	326,56
4,0	262,13	61 656	8,1942	324,56
4,5	258,88	57 749	7,7714	322,54
5,0	255,63	54 045	7,3654	320,51
5,5	252,38	50 535	6,9758	318,47
6,0	249,13	47 213	6,6022	316,41
6,5	245,88	44 069	6,2411	314,34
7,0	242,63	41 098	5,9010	312,25
7,5	239,38	38 290	5,5725	310,15
8,0	236,14	35 648	5,2591	308,05
10,0	223,15	26 491	4,1357	299,45
20,0	216,66	5526,9	0,8887	295,07
30,0	230,35	1183,6	0,1168	304,25
40,0	257,66	295,86	0,0400	321,78
50,0	274,00	84,58	0,0108	331,82
60,0	253,40	24,12	0,0033	319,11
80,0	185,00	1,14	$2,0979 \cdot 10^{-4}$	272,64
100,0	209,22	$3,2411 \cdot 10^{-2}$	$5,3993 \cdot 10^{-6}$	289,94
120,0	332,24	$2,5551 \cdot 10^{-3}$	$2,6586 \cdot 10^{-7}$	365,37

9.6. Определить скорость, плотность и температуру в сечении сопла аэродинамической трубы со статическим давлением 0,1361 МПа. Известны параметры торможения потока $T_0 = 1060$ К; $p_0 = 5$ МПа. Принять $k = 1,4$; $R = 287$ Дж/(кг·К). Указание. Использовать таблицы значений p/p_0 , ρ/ρ_0 , T/T_0 идеального газа с $k = 1,4$, построенные для диапазона чисел $M = 0 \dots 100$ [8]. Фрагмент из [8] с большим «шагом» по M представлен в табл. 9.2.

Решение. $p/p_0 = 0,1361/5 = 0,02722$; из табл. 9.2 находим $M = 3$; $T/T_0 = 0,357$; $\rho/\rho_0 = 0,07623$; тогда: $T = 0,357T_0 = 0,357 \cdot 1060 = 378,5$ К; $a = \sqrt{kRT} = \sqrt{1,4 \cdot 287 \cdot 378,5} = 388$ м/с; $w = Ma = 3 \cdot 388 = 1167$ м/с; $\rho = (\rho/\rho_0)(\rho_0/RT_0) = 0,07623 \cdot 5 \cdot 10^3 / (287 \cdot 1060) = 1,256$ кг/м³.

9.7. Определить, насколько повысится температура на лобовой поверхности метеорита при входе его в плотные слои атмосферы со скоростью 7500 м/с. Процесс торможения принимается адиабатным.

Таблица 9.2

М	ρ/ρ_0	ρ/ρ_0	T/T_0
1	0,5283	0,6339	0,8333
2	0,1278	0,2300	0,5556
3	$0,2722 \cdot 10^{-1}$	$0,7623 \cdot 10^{-1}$	0,3571
4	$0,6586 \cdot 10^{-2}$	$0,2766 \cdot 10^{-1}$	0,2381
5	$0,1890 \cdot 10^{-2}$	$0,1134 \cdot 10^{-1}$	0,1667
6	$0,6334 \cdot 10^{-3}$	$0,5194 \cdot 10^{-2}$	0,1220
7	$0,2416 \cdot 10^{-3}$	$0,2609 \cdot 10^{-2}$	$0,9259 \cdot 10^{-1}$
8	$0,1024 \cdot 10^{-3}$	$0,1414 \cdot 10^{-2}$	$0,7246 \cdot 10^{-1}$
9	$0,4739 \cdot 10^{-4}$	$0,8150 \cdot 10^{-3}$	$0,5814 \cdot 10^{-1}$
10	$0,2356 \cdot 10^{-4}$	$0,4948 \cdot 10^{-3}$	$0,4762 \cdot 10^{-1}$

9.8. Самолет с прямоточным воздушно-реактивным двигателем (ВРД) летит со скоростью 400 м/с при температуре воздуха $t = -20^\circ\text{C}$. Приняв для воздуха $k = 1,41$ и $R = 287$ Дж/(кг·К), определить степень повышения давления в диффузоре ВРД. Процесс торможения считать адиабатным.

9.9. Сравните значения температуры и степени относительного повышения давления, соответствующие полному торможению газов: CO_2 , O_2 , H_2 при температуре 1000 К и скорости 800 м/с.

9.10. Известно, что плотность двухатомного газа 50,1 кг/м³, скорость 265 м/с, а его термодинамическая температура в 1,15 раза меньше температуры торможения. Определить давление торможения.

9.11. Определить атомность газа, при полном торможении которого от исходной скорости, равной скорости звука, давление возрастает в 1,334 раза больше плотности.

9.12. Для какого двухатомного газа с температурой 310 К и скоростью 1130 м/с степень сжатия при полном торможении $\rho/\rho_0 = 18,6$?

9.13. Найти параметры торможения для водяного пара с температурой 100 °С, степенью сухости $x = 0,98$ и скоростью 1115 м/с.

9.14. Определить статическое давление водяного пара с плотностью 5,89 кг/м³, имеющего при скорости 744 м/с давление торможения 4 МПа. Определить также плотность заторможенного пара и значение показателя адиабаты, формально соответствующее процессу торможения.

Решение. $\Delta i = i_0 - i = \omega^2/2 = 744^2/2 = 276,8$ кДж/кг. Для изохоры $v = \rho^{-1} = 5,88^{-1} = 0,17$ м³/кг на si -диаграм-

ме для водяного пара нужно найти точку, расстояние от которой вверх по вертикали до изобары $p = p_0 = 4$ МПа равно Δi . Несложное построение для нижней точки дает $p = 1,2$ МПа, а для точки пересечения вертикали с изобарой (состояние торможения):

$$v_0 = 0,067 \text{ м}^3/\text{кг}; \quad \rho_0 = v_0^{-1} = 1/0,067 = 14,9 \text{ кг/м}^3;$$

$$k = [\ln(\rho_0/\rho)] [\ln(\rho_0/\rho)]^{-1} = [\ln(4,0/1,2)] [\ln(14,9/5,89)]^{-1} = 1,30.$$

9.15. Определить температуру сухого насыщенного пара, истекающего со скоростью 421 м/с, если известно, что его давление в 1,5 раза меньше давления торможения.

9.16. Каковы температура и давление сухого насыщенного пара, если известно, что при некоторой скорости его течения эти параметры меньше параметров торможения в 0,81 и 0,416 раза соответственно.

9.17. Определить влагосодержание d воздуха, при полном торможении которого от скорости 800 м/с плотность повышается в 3,15 раза больше, чем термодинамическая температура. Влажный воздух рассматривать как смесь идеальных газов; считать, что $c_{pв} = 1,00$ кДж/(кг·К) и $c_{pп} = 1,96$ кДж/(кг·К) для воздуха и водяного пара соответственно. Температура влажного воздуха 50 °С.

Решение. Из соотношений для параметров торможения видно, что

$$(\rho_0/\rho)(T_0/T)^{-1} = [1 + \omega^2(2c_p T)^{-1}][1/(k-1) - 1] = 1 + \omega^2(2c_p T)^{-1}[(c_p/R) - 2].$$

Отсюда, используя известные соотношения для влажного воздуха [21]:

$$R = (0,287 + 0,462d)/(1 + d);$$

$$c_p = c_{pв} + c_{pп}d = (1,00 + 1,96d),$$

получаем уравнение для определения d :

$$3,15 = [1 + 800^2(2 \cdot 10^3 \cdot 323)^{-1}(1,00 + 1,96d)^{-1}]^{\psi-2};$$

$$\psi = (1,00 + 1,96d)/(1 + d)/(0,287 + 0,462d).$$

Используя метод подбора, получим $d = 0,08$ кг/кг.

§ 9.2. Течение газа через сопла и диффузоры

9.18. Вывести формулы для $\beta_{кр}$, $\omega_{кр}$, $F_{кр}$ на основе общих зависимостей для скорости истечения и расхода идеального газа с $k = \text{const}$ без использования известного свойства экстремальности критического расхода*.

9.19. Охарактеризовать условия применимости формулы $\omega_2 = 101,9\sqrt{T_1/\mu}$ для определения теоретической скорости истечения газа с молярной массой μ .

9.20. Найти отношение максимальных скоростей для случаев истечения неподвижного воздуха с давлением 5 МПа в среду с давлением 0,24 МПа через суживающееся сопло ω_c и через сопло Лавалля ω_d . Оценить максимум отношения тех же величин при температуре воздуха $t_1 \geq 0^\circ\text{C}$ и при начальной его скорости $\omega_1 = 100$ м/с.

9.21. Для распыливания топлива, поступающего в цилиндр компрессорного двигателя с воспламенением от сжатия, через сопло форсунки подается воздух с параметрами 5,5 МПа, 300 К. Давление сжатого воздуха в цилиндре двигателя равно 4 МПа. Определить теоретическую скорость истечения воздуха, а также действительную скорость ω_d . Значение изэнтропного к. п. д. сопла $\eta_{sc} = (\omega_d/\omega)^2 = 0,9$.

9.22. Расход продуктов сгорания через расширяющееся сопло равен 0,8 кг/с, максимальная скорость при этом 1750 м/с. Начальные параметры газа 2500 К и 2 МПа; давление на выходе из сопла 0,09 МПа. Определить газовую постоянную продуктов сгорания, рассматривая их как двухатомный газ. Определить также длину расширяющейся части сопла, если угол конусности равен $2\gamma = 10^\circ$.

9.23. Температура в камере сгорания ЖРД равна 3000 К, давление 5,5 МПа, противодавление 0,09 МПа. Площадь выходного сечения сопла 85 см². Определить расход и скорость истечения газа из сопла, а также тягу двигателя P на расчетном режиме. Принять, что $R = 310$ Дж/(кг·К), $k = 1,3$.

Решение. Применение уравнений адиабаты и Клайпейрона дает:

$$v_2 = v_1 (p_1/p_2)^{1/k} = (RT_1/p_1)(p_1/p_2)^{1/k} = [310 \cdot 3000 / (5,5 \cdot 10^6)] \times \\ \times (5,5/0,09)^{1/1,3} = 4,00 \text{ м}^3/\text{кг};$$

* В этой главе приняты следующие обозначения: $\beta = p/p_1$, индексы «1», «2», «кр» используются для величин, относящихся к входному, выходному и критическому ($M=1$) сечениям канала соответственно; «с» — к среде со стороны выходного сечения канала.

$$\omega_2 = \sqrt{2kRT_1(1-\beta^{1-1/k})/(k-1)} = \\ = \sqrt{2 \cdot 1,3 \cdot 310 \cdot 3000 [1 - (0,09/5,5)^{0,3/1,3}] / (1,3-1)} = \\ = 2223 \text{ м/с};$$

$$M_\tau = F_2 \omega_2 / v_2 = 0,0085 \cdot 2223 / 4,00 = 4,72 \text{ кг/с};$$

$$P = M_\tau \omega_2 = 4,72 \cdot 2223 = 1050 \text{ Н}.$$

9.24. В камере сгорания ЖРД сжигается смесь 98%-ной азотной кислоты с керосином при давлении 5 МПа. Температура в камере 3000 К. Продукты сгорания истекают через сопло Лавалля; отношение $c_p/c_v = 1,22$, газовая постоянная $R = 0,334$ кДж/(кг·К). Полагая, что двигатель работает у земли на расчетном режиме, т. е. давление газа на выходе из сопла равно давлению окружающей среды (0,1 МПа), определить скорость продуктов сгорания на выходе из сопла.

9.25. ЖРД работает на расчетном режиме, давление в камере сгорания 3,6 МПа, температура 3200 К; давление окружающей среды 0,09 МПа, $k = c_p/c_v = 1,14$, $R = 0,35$ кДж/(кг·К). Определить скорость продуктов сгорания в устье расширяющегося сопла.

9.26. Рассчитать сопло ЖРД для расхода продуктов сгорания, равного 4 кг/с, при параметрах торможения 4 МПа и 3100 К и давлении окружающей среды 0,08 МПа. Угол конусности сопла принять равным $2\gamma = 12^\circ$. Термодинамические характеристики газа: $R = 350$ Дж/(кг·К); $k = 1,14$.

9.27. Вследствие неплотности (площадью 3 мм²) сварного шва в резервуар снаружи проникает воздух при давлении 0,11 МПа и температуре 30 °С. Поэтому из резервуара для поддержания в нем вакуума 0,045 МПа приходится вакуум-насосом удалять 1,5 кг воздуха в час. Определить коэффициент расхода.

9.28. Определить параметры газа, подводимого к соплам газовой турбины, если расход газа, отнесенный к одному соплу, равен 0,3 кг/с при давлении за соплами 0,1 МПа. Площади критического и выходного сечений равны соответственно 215 и 498 мм². Принять, что продукты сгорания обладают свойствами воздуха.

9.29. Определить скорость, с которой протекает воздух через суживающуюся насадку в карбюраторе бензинового двигателя. Разрежение за насадкой составляет 700 мм вод. ст. Исходные параметры воздуха взять из табл. 9.1 при $h = 0$ км.

9.30. Из камеры с давлением 2 МПа воздух вытекает в атмосферу со скоростью 540 м/с. Выходное сечение суживающегося сопла имеет площадь 600 мм². Определить расход воздуха и его температуру на выходе из сопла.

9.31. Оценить предельно достижимый вакуум в сушилке, имеющей щель площадью сечения 5 мм², если подача вакуум-насоса составляет 7,72·10⁻⁴ кг/с, атмосферное давление 0,104 МПа, температура воздуха 20 °С. Принять скоростной коэффициент ϕ и коэффициент сжатия струи γ равными 0,8.

9.32. Определить нижнюю границу для температуры (T_{\min}) сухого очищенного от углекислого газа и аргона воздуха при $p_1 = 0,1$ МПа, в случае повышения скорости которого до значения $M = 6$ не происходит его переохлаждения. Для давления насыщенных паров воздуха (МПа) справедлива формула: $\lg p = B - A/T$, где $A = 336,3$; $B = 3,105$.

9.33. Воздух истекает из емкости с давлением 0,1 МПа и температурой 20 °С. После истечения термодинамическая температура воздуха в среде удваивается путем подвода теплоты. При этом предполагается, что давление во внешней среде и скорость истечения остаются прежними. В результате давление торможения воздуха снижается до 0,094 МПа. Определить скорость истечения. Принять $c_p = 1,005$ кДж/(кг·К). Режим истечения докритический.

Решение. Из условий задачи для температур газа после истечения (T_2) и после подвода теплоты (T_n) следует, что

$$T_2 = T_1 - \omega^2/(2c_p); \quad (9.1)$$

$$T_n = 2T_2, \quad (9.2)$$

где T_1 — температура воздуха в емкости,

$$p_2 = p_1 [1 + \omega^2/(2c_p T_2)]^{k/(1-k)}; \quad (9.3)$$

$$p_{20} = p_2 [1 + \omega^2/(2c_p T_n)]^{k/(1-k)}, \quad (9.4)$$

где p_2 — давление во внешней среде, а p_{20} — давление адиабатно заторможенного потока после подвода теплоты.

Из соотношений (9.4), (9.3) и (9.2) следует, что

$$p_{20} = p_1 \{ [1 + \omega^2/(4c_p T_2)] [1 + \omega^2/(2c_p T_2)]^{-1} \}^{k/(k-1)}. \quad (9.5)$$

Используя (9.5) и (9.1), получим следующее уравнение для определения скорости истечения:

$$(p_{20}/p_1) = [1 - \omega^2/(4c_p T_1)]^{k/(k-1)}, \text{ или}$$

$$(0,094/0,1) = [1 - \omega^2/(4 \cdot 1,005 \cdot 293)]^{1,41/0,41}.$$

Решение этого уравнения дает значение $\omega = 150$ м/с.

9.34. Заданы газовая постоянная $R = 300$ Дж/(кг·К) и расход продуктов сгорания $M_\tau = 18$ кг/с, а также значения параметров в начальном сечении (p_1, T_1) и противодавления p_2 . При рассмотрении продуктов сгорания как двухатомного газа расчеты показывают, что скорость его истечения и критическая скорость достигают 2000 и 1000 м/с соответственно, а диаметр критического сечения должен быть равен 110 мм. Рассчитать сопло Лавала при тех же исходных данных, но принимая, что $k = 1,2$ вследствие высокой температуры газа и его диссоциации. Угол конусности считать равным $2\gamma = 12^\circ$.

9.35. Летательный аппарат на высоте 5 км имеет скорость 300 м/с. При этом атмосферный воздух адиабатно сжимается в диффузоре, а затем с уменьшением удельного объема в 6 раз в компрессоре турбореактивного двигателя, после чего воспринимает количество теплоты $q = 600$ кДж/кг при постоянном давлении и истекает через сопло Лавала в атмосферу. Определить скорость истечения и максимальную температуру газа; принять $c_p = 1,005$ кДж/(кг·К).

9.36. На расчетном режиме работы турбореактивного двигателя, выходное сечение сопла которого в 2,87 раз больше критического, происходит предварительное адиабатное сжатие воздуха в диффузоре и компрессоре с результирующим уменьшением объема в 6 раз, а также подвод теплоты ($q = 230$ кДж/кг) при постоянном объеме воздуха. Определить возможную при этом высоту полета летательного аппарата: принять $c_p = 0,71$ кДж/(кг·К).

Решение. Используя известную формулу и подставляя необходимые данные из табл. 9.3, получаем:

$$\begin{aligned} M_\tau &= F_{кр} \psi_{\max} \sqrt{p_1/v_1} = \\ &= F_2 \sqrt{2k p_1 (\beta_2^{2/k} - \beta_2^{(1+1/k)}) / [(k-1) v_1]}; \\ &= \frac{2^{1,41} - \beta_2^{2,41/1,41}}{2,87} = (\psi_{\max} F_{кр}/F_2)^2 (k-1)/(2k) = \\ &= (0,686/2,87)^2 0,41/2,82 = 8,36 \cdot 10^{-3}; \end{aligned}$$

$\beta_2 = p_2/p_1 = 0,05$ — определяется путем подбора.

Таблица 9.3

Вещество	k	$\beta_{кр}$	α	ψ_{max}
Одноатомный газ	1,67	0,487	1,118	0,727
Двухатомный газ и воздух	1,40	0,528	1,080	0,686
Трехатомный газ и перегретый пар	1,30	0,546	1,061	0,670
Сухой насыщенный пар (0+150 °C)	1,135	0,577	1,029	0,640

С учетом предварительного сжатия и подогрева газа записываем соотношения

$$p_c = p_h \varepsilon^k; \quad \varepsilon = v_h/v_c; \quad T_c = T_h \varepsilon^{k-1}; \quad T_1 = T_c + q/c_v = \\ = T_h \varepsilon^{k-1} + q/c_v;$$

$$p_1 = p_c T_1/T_c; \quad \beta_2 = (p_h/p_c) (T_c/T_1) = [\varepsilon^k + q\varepsilon/(c_v T_h)]^{-1}.$$

Здесь индекс h относится к параметрам на входе в диффузор, индекс c — к параметрам на выходе из компрессора. Из формулы для β_2 следует, что $T_h = q\varepsilon\beta_2/[c_v (1 - \beta_2\varepsilon^k)] = 230 \cdot 6 \cdot 0,05/[0,71 (1 - 0,05 \cdot 6^{1,41})] = 259,4$ К.

Зная T_h , по табл. 9.1 несложно определить возможные значения высоты полета: $h = 4$ и 42 км.

9.37. При атмосферном давлении 0,11 МПа в газгольдере постоянного давления содержится азот при температуре 30 °C. В колоколе газгольдера образовалось отверстие площадью 2,5 мм², вследствие чего за 1 ч теряется 0,6 % газа от его исходного количества. Объем газгольдера 180 м³, коэффициент расхода $\mu_0 = 0,7$. Определить избыточное давление, создаваемое колоколом.

9.38. Какой двухатомный газ с начальными параметрами 6 МПа, 300 К, вытекая в среду с давлением 3,5 МПа через суживающееся сопло с площадью выходного сечения 15 мм², имеет расход 0,22 кг/с? Каковы конечные температура и его скорость?

9.39. Известно, что начальные температуры аргона и углекислого газа, с одинаковой скоростью истекающих через суживающееся сопло в атмосферу (0,1 МПа) из резервуара с давлением 0,204 МПа, различаются на 60 К. Определить температуру аргона.

9.40. Газовая турбина работает на дизельном топливе, состав которого в массовых долях: $C = 0,865$, $H = 0,13$,

$O = 0,005$; избыток воздуха $\alpha_a = 4,0$. Продукты сгорания подводятся к соплам при давлении 1 МПа, давление за соплами 0,12 МПа. Отнесенный к одному соплу расход газа равен 0,4 кг/с; в выходном сечении сопла газ имеет скорость 960 м/с. Найти температуру газа перед соплом и сравнить ее с соответствующей температурой воздуха, найти также критическую скорость истечения газа и площадь критического сечения. Значение k принять равным отношению средних теплоемкостей, определяемых по таблицам.

9.41. Температура в камере сгорания ЖРД 2800 К, давление 7 МПа. Расход продуктов сгорания, содержащих CO_2 , H_2O и N_2 , равен 5 кг/с. В выходном сечении сопла площадью 220 см² температура и скорость газа равны 1200 К и 2470 м/с соответственно. Определить состав продуктов сгорания в массовых долях, принимая k равным отношению средних теплоемкостей, определяемых с помощью табл. 2 Приложения.

9.42. В реактивном самолетном двигателе, работающем на топливе ТС-1 (состав в массовых долях: $C = 0,86$, $H = 0,137$, $O = 0,003$), используется сопло с отношением сечений $F_2/F_{кр} = 0,1774$. Какой избыток воздуха предусмотрен на расчетном режиме, если при этом отношение давлений в крайних сечениях сопла $p_1/p_2 = 20$. Для оценки показателя адиабаты использовать значения истинных теплоемкостей газов (табл. 1 Приложения) при температуре 600 °C, близкой к средней температуре газа в сопле.

9.43. Расход отработавшего пара, поступающего из паровой турбины в конденсатор со скоростью 110 м/с при давлении 0,005 МПа, равен 30 кг/с; диаметр входного патрубка конденсатора 3 см. Определить степень сухости пара.

9.44. Расширяющаяся часть сопла обдувочного аппарата имеет длину $l = 55$ мм при угле конусности $2\gamma = 11^\circ$. В аппарате используется сухой насыщенный пар, начальное давление которого 2,5 МПа, конечное — 0,11 МПа. Определить площади критического и выходного сечений сопла, а также расход пара.

9.45. Пар с давлением 1 МПа, температурой 250 °C и начальной скоростью 100 м/с истекает через суживающееся сопло в атмосферу ($p_2 = 0,1$ МПа). Найти скорость и температуру пара в выходном сечении. Оценить погрешность, связанную с пренебрежением начальной скоростью.

9.46. В паровой турбине через сопло Лавалья вытекает пар с начальными параметрами $p_1 = 3$ МПа, $t_1 = 400$ °C. Давление в конденсаторе 0,01 МПа. Определить отношение

площадей выходного сечения сопла $(F_2/F_n)^*$, рассчитанных для одного и того же расхода пара без учета трения и с учетом трения. Коэффициент потери энергии вследствие трения в сопле $\xi = 0,25$. Рассчитать это отношение для параметров: $p_1 = 1,5$ МПа, $t_1 = 350$ °С. Сравнить полученные значения.

9.47. Водяной пар с параметрами 1,5 МПа, 350 °С истекает в среду с разрежением 80 %. Определить скорость истечения без трения через суживающееся сопло и сопло Лавала, через длинную трубу при значении $\varphi = 0,85$ и через сопло Лавала с трением лишь в расширяющейся части, для которой $\varphi = 0,85$.

9.48. Оценить погрешности расчета величин $\beta_{кр}$, α и ψ_{max} по формулам из [21; 2] при $k = 1,135$ для сухого насыщенного водяного пара, истекающего с температурой 250 °С.

Решение. По табл. 5 Приложения находим для сухого насыщенного пара ($x = 1$): $p_1 = 4,056$ МПа; $v_1 = 0,05006$ м³/кг; $s_1 = 6,071$ кДж/(кг·К). Основная трудность решения задачи связана с подбором значения k , удовлетворяющего соотношению

$$k = \ln \beta_{кр} [\ln (v_1/v_{кр})]^{-1}. \quad (9.6)$$

Здесь: $\beta_{кр} = [0,5 (k + 1)]^{k/(1-k)}$; $v_{кр}$ определяется из табл. 5 Приложения по значениям $p_{кр} = \beta_{кр} p_1$ и $s_{кр} = s_1$. Задавись значением $k^{(1)} = 1,12$, получим

$$\begin{aligned} \beta_{кр} &= 0,5805, \quad p_{кр} = 2,355, \quad x_{кр} = (s_1 - s')/(s'' - s') = \\ &= (6,0712 - 2,5155)/(6,2867 - 2,5155) = 0,9428, \quad v_{кр} = \\ &= v'' x_{кр} + v' (1 - x_{кр}) = 0,08645 \cdot 0,9428 + 0,00119 (1 - \\ &- 0,9428) = 0,08158 \text{ и вычислим по уравнению (9.6) } k^{(2)} = \\ &= \ln 0,5805 [\ln (0,05006/0,08158)]^{-1} = 1,114. \end{aligned}$$

Одним штрихом отмечены величины, характеризующие состояние кипящей жидкости ($x = 0$), двумя штрихами — состояние сухого насыщенного пара ($x = 1$).

Так как значения $k^{(1)}$, $k^{(2)}$ различаются, целесообразно сделать следующее приближение. Если теперь принять, что $k^{(3)} = 1,115$, то $\beta_{кр} = 0,5815$; $p_{кр} = 2,359$;

$$x_{кр} = (6,0712 - 2,5164)/(6,2864 - 2,5164) = 0,9429;$$

* Индекс «д» используется для величин, определяемых с учетом трения.

$$v_{кр} = 0,08633 \cdot 0,9429 + 0,0119 \cdot 0,0571 = 0,08147;$$

$$k^{(4)} = \ln 0,5815 [\ln (0,05006/0,08147)]^{-1} = 1,113.$$

Очевидно, что $k = 1,114$ можно считать окончательным решением уравнения (9.6). При этом

$$\begin{aligned} \beta_{кр} &= [0,5 \cdot 2,114]^{1,114/(-0,114)} = 0,5818, \quad \alpha = \sqrt{2k/(k+1)} = \\ &= \sqrt{2 \cdot 1,114/2,114} = 1,027, \quad \psi_{max} = \sqrt{k} \beta_{кр}^{0,5(1+1/k)} = \\ &= \sqrt{1,114} \cdot 0,5818^{0,5(1+1/1,114)} = 0,631. \end{aligned}$$

Из табл. 9.3 видно, что при $k = 1,135$ $\beta_{кр} = 0,577$; $\alpha = 1,029$; $\psi_{max} = 0,640$, так что искомые погрешности равны —0,82 % для $\beta_{кр}$, 0,24 % для α и 1,4 % для ψ_{max} .

9.49. Известно, что скорость истечения водяного пара 458 м/с, его расход 0,2 кг/с и конечная степень сухости $x = 0,93$. Площадь выходного сечения сопла равна 243 мм². Определить начальные параметры пара (использовать табл. 7 Приложения) и указать форму сопла.

9.50. Каким должно быть сечение предохранительного клапана парового котла производительностью 5000 кг/ч (при давлении 10 МПа), чтобы при внезапном прекращении отбора пара давление не превысило 10 МПа (использовать табл. 7 Приложения).

9.51. Используя таблицы Приложения и формулу $w_{кр} = \alpha \sqrt{p_1 v_1}$ для пара, имеющего в критическом сечении сопла давление 4,5 МПа и степень сухости $x = 0,915$, определить критическую скорость истечения и соответствующее значение k .

9.52. Известны расход пара 0,2 кг/с и скорость $w_{кр} = 477$ м/с в критическом сечении сопла площадью 335 мм². С использованием таблиц Приложения определить начальные параметры пара.

9.53. Параметры пара до и после истечения равны 2,4 МПа, 420 °С и 7,5 м³/кг, 60 °С соответственно. Определить коэффициент потери энергии, скорость истечения и долю потери кинетической энергии на трение от полной теплоты трения ($\Delta l_{тр}/q_{тр}$). Считать, что в sT -диаграмме процесс истечения изображается прямолинейным отрезком.

9.54. Пар под давлением 10 МПа истекает через сопло Лавала (при значении скоростного коэффициента $\varphi = 0,95$) в среду с давлением $5 \cdot 10^{-3}$ МПа. Известно, что при этом потеря кинетической энергии потока вследствие трения составляет 0,55 лт всей теплоты трения. Определить начальную температуру пара и его критическую скорость истече-

ния, рассматривая изображение процесса в sT -диаграмме как прямолинейный отрезок.

Решение. Ввиду оговоренной прямолинейности изображения процесса теплота трения равна

$$q_{тр} = 0,5(T_1 + T_{2д})(s_{2д} - s_1).$$

Поскольку потеря удельной кинетической энергии на трение равна $\Delta i_{тр} = i_{2д} - i_2$, то

$$\psi_{тр}/2 = \Delta i_{тр}/(2q_{тр}) = (i_{2д} - i_2)/[(T_1 + T_{2д})(s_{2д} - s_1)]. \quad (9.7)$$

Задачу следует решать методом подбора. Задавшись значением T_1 , нужно сначала по T_1 и известному значению p_1 найти i_1 и s_1 ; затем требуется определить i_2 по $s_2 = s_1$ и заданному p_2 и вычислить $i_{2д}$ по формуле

$$i_{2д} = i_2 + (1 - \varphi^2)(i_1 - i_2),$$

получаемой с учетом выражения для φ ; наконец, можно определить $s_{2д}$ и $T_{2д}$ по $i_{2д}$ и p_2 и проверить выполнение равенства (9.7) при избранном T_1 . Если равенство (9.7) не выполняется, следует задаться каким-либо другим значением T_1 и т. д. Некоторые результаты расчета приведены в табл. 9.4.

Таблица 9.4

T_1 , К	i_1 , кДж/кг	s_1 , кДж/(кг·К)	$i_{2д}$, кДж/кг	$s_{2д}$, кДж/(кг·К)	$T_{2д}$, К	$\psi_{тр}/2$
823	3484	6,766	2060	2202	7,235	0,270
733	3375	6,607	2010	2146	7,051	0,286
723	3241	6,427	1955	2084	6,842	0,299

Интерполяция результатов дает $\psi_{тр} = 0,55$ при $T_1 = 808$ К. По si -диаграмме находим $v_1 = 0,35$ м³/кг при $T_1 = 808$ К и $p_1 = 10$ МПа, тогда

$$w_{кр} = \varphi \sqrt{p_1 v_1} = 0,95 \cdot 1,061 \sqrt{10 \cdot 10^6 \cdot 0,035} = 596,3 \text{ м/с.}$$

9.55. Исходное состояние пара на si -диаграмме соответствует значению $s_1 = 7110$ кДж/кг; в конце истечения это пар со степенью сухости 0,95 при температуре 45,5 °С. Известно, что критическая скорость истечения, вычисленная без учета трения, равна 570 м/с. Определить начальные параметры пара и коэффициент потери энергии.

9.56. После падения давления до 0,02 МПа при истечении пар становится сухим насыщенным; расход пара равен 0,1 кг/с. Скоростной коэффициент сопла 0,85, площадь его выходного сечения 645 мм². Каковы начальные параметры пара и скорость его истечения?

9.57. Водяной пар с начальными параметрами 4 МПа и 250 °С со скоростью 450 м/с подается в диффузор с изэнтропным к. п. д. $\eta_{sD} = 0,7$. Определить температуру и давление пара, получаемые при его торможении.

9.58. Водяной пар с начальным давлением 0,7 МПа и скоростью 550 м/с в результате полного торможения в диффузоре с изэнтропным к. п. д. $\eta_{sD} = 0,75$ принимает температуру 350 °С. Определить температуру и давление торможения (для пара в исходном состоянии).

§ 9.3. Истечение из сосуда ограниченной вместимости

9.59. Доказать, что соотношения*

$$\left. \begin{aligned} \int_{\tau_n}^{\tau} f_{\tau} \vartheta_{\tau}^{(mr+m-1)} d\tau &= (BY/A) (p_1/p_c)^{1/k} V^{(k-1)/2k}; \\ r &= nv/m; \\ Y &= -\ln(z\vartheta_{\tau}); \quad m=v=0; \quad Y=[1-(z\vartheta_{\tau})^v]/v; \\ v &\neq 0; \quad m=0; \\ Y &= [1-(y\vartheta_{\tau}^m)^{r+1}]/[m(r+1)]; \quad m(r+1) \neq 0; \quad y = \\ &= z^{m/n}; \\ A &= \mu_0 F \sqrt{p_1 v_1}/V; \quad m=(1-n)/2; \\ z &= p_{1\tau}/p_1; \quad \vartheta_{\tau} = V_{\tau}/V \end{aligned} \right\} \quad (9.8)$$

представляют решение дифференциальной задачи:

$$D_{\tau} = -(F_{\tau}/F) A V_{\tau}^{m-1} d\tau; \quad V_{\tau}|_{\tau=\tau_n} = V; \quad z_{\tau}|_{\tau=\tau_n} = 1;$$

$$D_{\tau}|_{n=1} = d(V_{\tau} z)/(\psi_z V_{\tau} z); \quad D_{\tau}|_{n \neq 1} = d(V_{\tau}^m y)/(\psi_z m);$$

$$p_c > \beta_{кр} p_{1\tau}; \quad (9.9)$$

* В этом параграфе нижние индексы y и z указывают на зависимость функций от аргументов y или z . Индекс τ относится к значениям величин для момента времени τ ; для значений величин в начальный момент времени $\tau=\tau_n$ этот индекс опускается.

$$\psi_z = (\xi/z)^{1/k} \sqrt{[1 - (\xi/z)^{1-1/k}] 2k/(k-1)}; \quad \xi_\tau = p_c/p_{1\tau};$$

$$F_\tau = f_v f_\tau F; \quad f_v \sqrt{1 - (\xi/z)^{1-1/k}} z^{1/k} = z - v/B; \quad B = \text{const.} \quad (9.10)$$

9.60. Для площади выходного сечения резервуара постоянного объема установить функциональный характер ее изменения со временем, обеспечивающий постоянство расхода при истечении газа в сверхзвуковой области. Состояние газа в резервуаре изменяется по политропе с $n \neq 1$.

9.61. Решить задачу 9.60 применительно к истечению в дозвуковой области. Определить время, необходимое для снижения давления до 0,12 МПа внутри резервуара объемом 5 м³, заполненного воздухом с начальными параметрами 0,18 МПа, 200 °С. Состояние воздуха изменяется по политропе с показателем $n = 1,2$ вследствие его истечения в атмосферу через отверстие с начальным диаметром 2,5 мм; коэффициент расхода равен 0,7. Определить также конечный диаметр отверстия (при $p_{1\tau} = 0,12$ МПа) и массу $M_{\Sigma\tau}$ оставшегося воздуха.

9.62. Каким образом следует изменять объем резервуара во времени, с тем чтобы вследствие истечения газа в сверхзвуковой области через постоянное сечение состояние газа изменялось по политропе с $n \neq 1$ при экспоненциальной зависимости давления от времени:

$$p_{1\tau} = p_1 \exp(bt\tau) \quad (9.11)$$

Начальный объем 5 м³; величины b , n и коэффициент расхода принять равными ($-4 \cdot 10^{-4}$); 1,25; 0,7 соответственно; какова масса воздуха, оставшегося в резервуаре к моменту перехода истечения в дозвуковую область? Как быстро наступит этот момент? Сравнить с соответствующими значениями при неизменном объеме резервуара. Считать, что истечение в атмосферу происходит через отверстие диаметром 3 мм. Начальные параметры воздуха 2 МПа, 150 °С.

Решение. Здесь применимо решение дифференциальной задачи (9.9) (см. задачу 9.59) в форме

$$\int_{\tau_n}^{\tau} \vartheta_\tau^{m-1} d\tau = (1 - y \vartheta_\tau^n) / (mA\psi_{\max}); \quad y = (p_{1\tau}/p_1)^{m/n} =$$

$$= \exp(mbr\tau/n) \quad (9.12)$$

при дополнительных условиях:

$$V_\tau = \vartheta_\tau V; \quad F_\tau = F; \quad p_c \leq \beta_{кр} p_{1\tau}; \quad \psi_z = \psi_{\max}. \quad (9.13)$$

Дифференцирование (9.12) по τ дает уравнение

$$\vartheta_\tau^{m-1} = -[\vartheta_\tau^m dy/d\tau + m y \vartheta_\tau^{m-1} d\vartheta_\tau/d\tau] / (mA\psi_{\max}),$$

откуда $\vartheta_\tau b/n + d\vartheta_\tau/d\tau = -A\psi_{\max} \exp(-mb\tau/n). \quad (9.14)$

Решение линейного уравнения (9.14) с учетом очевидного начального условия ($\vartheta_\tau = 1$) имеет вид

$$\vartheta_\tau = \exp(-b\tau/n) \{1 + [1 - \exp(0,5b\tau(1+n)/n)] \times$$

$$\times 2An\psi_{\max}/[b(1+n)]\}.$$

Для заданных условий перехода в дозвуковую область истечения получаем:

$$p_{1\tau} = p_c/\beta_{кр} = 0,1/0,528 = 0,19 \text{ МПа}; \quad v_{1\tau} = (p_1/p_{1\tau})^{1/n} \times$$

$$\times RT_1/p_1 = (2/0,19)^{1/1,25} 287 \cdot 423 / (2 \cdot 10^6) = 0,399 \text{ м}^3/\text{кг};$$

$$A = \mu_0 \pi d^2 \sqrt{RT_1} / (4V) = 0,7\pi \cdot 0,003^2 \sqrt{287 \cdot 423} / (4 \cdot 5) =$$

$$= 0,00345, \quad \tau = b^{-1} \ln(p_{1\tau}/p_1) = (-10^4/4) \ln(0,19/2) =$$

$$= 5885 \text{ с}; \quad \vartheta_\tau = \exp(4 \cdot 0,5885) \{1 + [1 - \exp(-4 \cdot 0,5885 \times$$

$$\times 2,25/(2 \cdot 1,25))] 2 \cdot 0,00345 \cdot 1,25 \cdot 0,686 / [-4 \cdot 10^{-4} \times$$

$$\times (1 + 1,25)]\} = 2,773; \quad M_{\Sigma\tau} = V\vartheta_\tau/v_{1\tau} = 34,7 \text{ кг}. \quad (9.15)$$

Результаты (9.15) остаются справедливыми для момента перехода в дозвуковую область истечения и в случае неизменного объема резервуара; при этом

$$\tau = [1 - (p_{1\tau}/p_1)^{m/n}] / mA\psi_{\max} \doteq [1 -$$

$$- (0,19/2)^{-0,25/(2 \cdot 1,25)}] / [(-0,25/2) 0,00345 \cdot 0,686] =$$

$$= 8980 \text{ с}; \quad M_{\Sigma\tau} = V/v_{1\tau} = 5/0,399 = 12,5 \text{ кг}.$$

9.63. Из цилиндра, содержащего 0,2 кг воздуха с параметрами 1,5 МПа, 200 °С, начинается истечение в атмосферу через отверстие площадью 2,5 мм². С какой постоянной скоростью следует при этом перемещать поршень, с тем чтобы за первые 10 с из цилиндра вытекло в полтора раза больше воздуха, чем в случае с неподвижным поршнем? Каким к тому времени должен стать расход воздуха? Температуру воздуха в цилиндре считать неизменной. Диаметр поршня, как и внутренний диаметр цилиндра, равен 0,2 м; коэффициент расхода $\mu_0 = 0,8$.

9.64. Углекислый газ с критической скоростью истекает в атмосферу через отверстие, площадь которого сначала

равна 10 мм², а затем изменяется пропорционально давлению $p_{1\tau}$ внутри резервуара. Объем резервуара изменяется пропорционально $\sqrt{p_{1\tau}}$, начиная от значения $V = 0,2 \text{ м}^3$. Газ внутри резервуара сохраняет постоянную температуру. Через 10 с после начала процесса скорость истечения и расход равны 228 м/с и 0,145 кг/с соответственно. Определить начальные параметры газа, а также расход газа в момент перехода в дозвуковую область истечения. Коэффициент расхода и скоростной коэффициент принять равными 0,75 и 0,9 соответственно.

9.65. В баке с азотом, имевшим начальные параметры 0,5 МПа, 30 °С, состояние газа изменяется по политропе с показателем $n = 1,25$ вследствие истечения газа в среду с давлением 0,05 МПа через отверстие. Объем бака и площадь отверстия, начальные значения которых 20 л и 10 мм², изменяются пропорционально корню кубическому из давления в баке. Определить время, необходимое для падения давления до $p_{2\text{кон}} = 0,055 \text{ МПа}$. Какими станут к этому моменту скорость истечения и расход газа? Принять для коэффициентов расхода и потери энергии значения 0,8 и 0,15.

9.66. Решить задачу 9.65, считая, что давление в баке падает только до $p_{2\text{кон}} = 0,08 \text{ МПа}$, площадь отверстия постоянна, а объем бака изменяется по закону: $V_\tau = V \times (1 - B\tau)$, где $B = 2 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}$.

9.67. Внутри отсека летательного аппарата установлен баллон объемом 400 л с кислородом. Сохраняя в баллоне температуру, соответствующую избранной высоте полета, газ в течение $\tau = 218 \text{ с}$ истекал в окружающую среду через вентиль диаметром 8 мм. Поэтому давление в баллоне понизилось с 3 до 0,065 МПа. Известно, что только первые 195 с ($\tau_{кр}$) скорость истечения была неизменной. Определить высоту полета; принять коэффициент расхода $\mu_0 = 0,8$.

Решение. Ясно, что через 195 с истечения в баллоне было достигнуто критическое давление; поэтому [21]:

$$A = \mu_0 F \sqrt{p_1 v_1} / V = \ln(p_1 \beta_{кр} / p_c) / (\tau_{кр} \Psi_{\max}) = \\ = [\ln(3 \cdot 0,528) - \ln p_c] / (195 \cdot 0,686). \quad (9.16)$$

С учетом же истечения в докритической области получается

$$A = Z / (\tau - \tau_{кр}) = Z_* / 23; \quad Z_* = Z |_{\tau = p_c / 0,065}; \\ \xi_\tau = p_c / p_{1\tau}; \quad (9.17)$$

$$Z = \int_{\beta_{кр}}^{\xi_\tau} \Psi_*^{-1} \xi_\tau^{- (n+1)/2n} d\xi_\tau \quad (p_c, \text{ МПа}). \quad (9.18)$$

Таблица 9.5

ξ_τ	$z \cdot 10^4$		
	$k=1,4$		$k=1,135$
	$n=1,0$	$n=1,25$	$n=1,0$
0,528	0	0	—
0,550	595,1	548,3	—
0,575	1251	1176	—
0,577	1504	1410	0,000
0,600	1881	1755	579,3
0,625	2474	2316	1251
0,650	3067	2912	1800
0,675	3655	3447	2497
0,700	4215	3978	3063
0,725	4759	4478	3605
0,750	5313	5063	4162
0,775	5888	5597	4864
0,800	6419	6132	5309
0,825	6982	6698	5913
0,850	7567	7305	6514
0,875	8146	7874	7131
0,900	8801	8488	7773
0,925	9487	9171	8459
0,950	10 277	9961	9250
0,975	11 258	10 941	10 246
0,990	12 112	11 795	11 090
0,995	12 523	12 213	11 511
1,000	13 535	13 218	12 523

Значение Ψ_z определяется так же, как и в задаче 9.59. Из сопоставления (9.16) и (9.17) видно, что

$$A = \ln(1,584/p_c) / 133,8 = Z_* / 23 \quad \text{и} \quad \ln p_c + 5,816 Z_* = \\ = 0,460. \quad (9.19)$$

Уравнение (9.19) относительно p_c решается методом подбора с использованием табл. 9.5. Некоторые результаты решения представлены в табл. 9.6.

Таблица 9.6

p_c	$\ln p_c$	ξ_τ	Z	$\ln p_c + 5,816 Z$
0,0600	—2,814	0,923	0,9432	2,671
0,0500	—2,996	0,769	0,5750	0,348
0,0505	—2,986	0,777	0,5928	0,461

Уравнение (9.19) удовлетворяется при $p_c = p_h = 0,0505$ МПа; $A = 0,5928/23 = 0,02577$ с⁻¹.

Из выражения A и уравнения Клапейрона следует

$$T_1 = T_h = (AV/\mu_0 F)^2/R = \\ = [0,02577 \cdot 0,4 \cdot 4 / (0,8 \cdot \pi \cdot 8^2 \cdot 10^{-6})]^2 (32/8314) = 252,9 \text{ K}.$$

Из табл. 9.1 находим, что значениям p_h и T_h соответствует высота полета $h = 5,5$ км.

9.68. Из баллона вместимостью 300 л в среду с давлением 0,2 МПа происходит истечение водяного пара через вентиль диаметром 5 мм; коэффициент расхода отверстия $\mu_0 = 0,9$. Каковы будут расход пара и давление в баллоне через $\tau = 30$ с после начала истечения, если параметры пара внутри баллона изменяются по закону: $p\upsilon = \text{const}$. В начале процесса давление и температура пара равны 0,5 МПа и 190 °С соответственно.

Решение. В исходном состоянии пар является перегретым ($k = 1,3$) и для него, с учетом таблиц для пара и формул из [21]:

$$\begin{aligned} v_1 &= 0,4232 \text{ м}^3/\text{кг}; A = \mu_0 \pi d^2 \sqrt{p_1 v_1} / (4V) = 0,9 \cdot 3,14 \times \\ &\times 0,005^2 \sqrt{0,5 \cdot 10^6 \cdot 0,4232} / (4 \cdot 0,3) = 0,0271 \text{ с}^{-1}; \\ \beta_{кр} &= 0,546; \psi_{\max} = 0,67; \tau_{кр} = \ln(p_1/p_{1,\tau_{кр}}) / (A\psi_{\max}) = \\ &= \ln(0,5/0,366) / (0,0271 \cdot 0,67) = 17,1 \text{ с}. \\ p_{1,\tau_{кр}} &= p_c / \beta_{кр} = 0,2/0,546 = 0,366 \text{ МПа}; \\ v_{1,\tau_{кр}} &= p_1 v_1 / p_{1,\tau_{кр}} = 0,5 \cdot 0,4232 / 0,366 = \\ &= 0,580 \text{ м}^3/\text{кг}. \end{aligned} \quad (9.20)$$

Здесь $\tau_{кр}$ — время истечения пара со сверхзвуковой скоростью.

Полученные результаты (9.20), на основании таблиц Приложения для пара, позволяют установить, что в момент времени $\tau_{кр}$ пар еще остается перегретым. Естественно допустить, что в дозвуковой области истечения ввиду малой продолжительности процесса

$$\sqrt{1 - (p_c/p_1 z)^{1-1/k}} / z^{1/k} = z^{-\upsilon}/B, \quad (9.21)$$

где $z = p_{1\tau}/p_1$ и $k = 1,3$. При условии выполнения равенства (9.21) для определения констант B и υ можно использовать соотношения, вытекающие из (9.21), для моментов

времени $\tau_{кр}$ (при $z = 1$) и $\tau = 30$ с (при $z = z_\tau$); соответственно получается, что

$$\begin{aligned} B^{-1} &= \sqrt{1 - (p_c/p_1)^{1-1/k}} = \sqrt{1 - (0,2/0,366)^{1-1/1,3}} = \\ &= 0,361, \\ \upsilon &= 1/k - [\ln B + \ln \sqrt{1 - (p_c/p_1 z_\tau)^{1-1/k}}] / \ln z_\tau = \\ &= 1/1,3 - [-\ln 0,361 + \ln \sqrt{1 - (0,2/0,366 z_\tau)^{1-1/1,3}}] / \\ &/ \ln z_\tau. \end{aligned} \quad (9.22)$$

Из соотношения (9.8) (см. задачу (9.59) следует, что

$$\begin{aligned} \tau - \tau_{кр} &= B(1 - z_\tau^\upsilon)(p_{1,\tau_{кр}}/p_c)^{1/k} \sqrt{(k-1)/2k} / (\upsilon A) = \\ &= 0,361^{-1} (1 - z_\tau^\upsilon) (0,366/0,2)^{1/1,3} \sqrt{(1,3-1)/2 \cdot 1,3} / \\ &/ (0,0271). \end{aligned} \quad (9.23)$$

Таким образом,

$$12,9 = 76,17 (1 - z_\tau^\upsilon) / \upsilon,$$

причем для υ справедливо уравнение (9.22). Решение уравнения (9.24) методом подбора дает:

$$z_\tau = 0,843; \quad \upsilon = -0,145; \quad p_{1\tau} = 0,308 \text{ МПа}; \quad v_{1\tau} = 0,687 \text{ м}^3/\text{кг}. \quad (9.25)$$

В справедливости соотношения (9.21) можно убедиться следующим образом: из таблиц для пара следует, что при полученных значениях $p_{1\tau}$ и $v_{1\tau}$ пар остается перегретым и, следовательно, $k = 1,3$. Подстановка любого значения z из интервала $0,843 < z < 1$ указывает на достаточную точность соотношения (9.21). Например, при $z = 0,92$ левая и правая части этого соотношения равны 0,3591 и 0,3567. На этом основании можно считать, что конечное состояние пара определено правильно.

Расход пара

$$\begin{aligned} M_\tau &= \mu_0 (\pi/4) d^2 \sqrt{[(p_c/p_{1\tau})^{2/k} - (p_c/p_{1\tau})^{1+1/k}] \times} \\ &\times 2kp_{1\tau}/v, (k-1) = 0,9 (\pi/4) 0,005^2 \times \\ &\times \sqrt{[(0,2/0,308)^{2/1,3} - (0,2/0,308)^{1+1/1,3}] \cdot 2 \cdot 1,3 \times} \\ &\times 0,308 \cdot 10^6 / 0,687 (1,3-1) = 77 \cdot 10^{-4} \text{ кг/с}. \end{aligned}$$

9.69. Для каждого из трех баллонов одинакового объема, содержащих при температуре 120 °С по 0,4 кг гелия (He), фтористого водорода (HF) или сухого насыщенного

пара (H_2O), определить время, потребное для истечения в атмосферу 0,1 кг газа через отверстие площадью 5 мм². Принять коэффициент расхода равным 0,75; показатель политропы изменения состояния в баллоне $n = 1,25$ для всех газов.

9.70. Решить задачу 9.69 при условии изменения состояния каждого из газов в резервуаре по закону $pv = \text{const.}$

§ 9.4. Дросселирование газов и паров

9.71. Сухой насыщенный водяной пар с давлением 9 МПа дросселируется до давления 2 МПа. Используя таблицы Приложения, определить средний дифференциальный дроссель-эффект, параметры пара после дросселирования и потерю работоспособности при дросселировании. Температура окружающей среды $T_0 = 300$ К.

Решение. Из таблиц имеем при $p_1 = 9$ МПа $t_1 = 303,32$ °С; $i_1' = 1363,7$ кДж/кг; $i_1'' = 2743$ кДж/кг; $s_1' = 5,678$ кДж/(кг·К); при $p_2 = 2$ МПа $t_2 = 212,37$ °С; $i_2' = 908,5$ кДж/кг; $i_2'' = 2799$ кДж/кг; $s_2' = 2,447$ кДж/(кг·К); $s_2'' = 6,340$ кДж/(кг·К).

Средний дифференциальный дроссель-эффект

$$\Delta t/\Delta p = (212,37 - 303,32)/(2 - 9) = 12,99 \text{ К/МПа.}$$

Степень сухости пара после дросселирования находится из уравнения $i_2 = i_2' + x(i_2'' - i_2') = i_1'$:

$$x = (i_1' - i_2')/(i_2'' - i_2') = (2743 - 908,5)/(2799 - 908,5) = 0,97.$$

Энтропия пара после дросселирования

$$s_2 = s_2' + x(s_2'' - s_2') = 2,447 + 0,97(6,34 - 2,447) = 6,223 \text{ кДж/(кг·К).}$$

Потери работоспособности

$$\Delta \mathcal{E} = -T_0(s_2 - s_1') = -300(6,223 - 5,678) = -163,5 \text{ кДж/кг.}$$

9.72. Влажный водяной пар при давлении $p_1 = 3$ МПа и влажности $1 - x_1 = 10\%$ дросселируется до давления $p_2 = 0,2$ МПа. Используя таблицы Приложения, определить интегральный дроссель-эффект, а также температуру и удельный объем пара после дросселирования.

9.73. Определить изменение температуры и энтропии при дросселировании воздуха [$R = 0,287$ кДж/(кг·К)] от $p_1 = 0,2$ МПа до $p_2 = 0,1$ МПа.

9.74. Показать, что при дросселировании идеального газа дифференциальный дроссель-эффект $\alpha_i = (\partial T/\partial p)_i$ равен нулю.

Решение. Подставляя в выражение $\alpha_i = (T/c_p) \times [(\partial v/\partial T)_p - (v/T)]$ частную производную $(\partial v/\partial T)_p = v/T$, найденную из уравнения состояния идеального газа $pv = RT$, получаем $\alpha_i = 0$.

9.75. Газ массой 2 кг, для которого $c_v = 0,718$ и $c_p = 1,005$ кДж/(кг·К), дросселируется от начального объема 4 м³. При этом энтропия увеличивается на 0,79 кДж/(кг·К). Определить конечный объем газа.

9.76. Получить выражение для дифференциального дроссель-эффекта газа, подчиняющегося уравнению Ван дер Ваальса.

9.77. Получить уравнение кривой инверсии газа, подчиняющегося уравнению состояния Ван дер Ваальса.

9.78. Определить потерю работоспособности при дросселировании воздуха от давления 4 МПа до давления 2 МПа. Температура окружающей среды $T_0 = 300$ К.

9.79. Определить состояние пара в паропроводе, если давление в нем $p_1 = 1,2$ МПа, а давление и температура пара в дроссель-калориметре, применяемом для определения состояния пара, соответственно равны $p_2 = 0,1$ МПа и $t_2 = 135$ °С.

Решение. В si -диаграмме находится точка 2 с параметрами p_2 и t_2 . Через эту точку проводится линия постоянной энтальпии ($i = \text{const}$) до пересечения с изобарой $p_1 = \text{const}$. Параметры точки пересечения 1 характеризуют состояние пара в паропроводе — влажный пар с параметрами: $p = 1,2$ МПа, $t = 187$ °С, $x = 0,98$.

9.80. Влажный пар с давлением $p_1 = 1,5$ МПа и степенью сухости $x = 0,95$ перепускается в паропровод низкого давления $p_2 = 0,28$ МПа. Используя si -диаграмму, определить состояние пара в паропроводе после дроссельного вентиля и средний дифференциальный дроссель-эффект.

9.81. По условиям работы производственной аппаратуры в цех завода необходимо подавать пар с давлением 0,1 МПа и температурой 135 °С. Котельная завода имеет котлы, работающие при давлении 2 МПа. Используя si -диаграмму, найти, каково должно быть состояние пара, подаваемого от этих котлов к редукционному клапану, чтобы за ним получился пар требуемых параметров.

9.82. Перегретый водяной пар с давлением $p_1 = 13$ МПа и температурой $t_1 = 520^\circ\text{C}$ дросселируется до давления 4 МПа. Используя si -диаграмму, определить интегральный дроссель-эффект и потерю работоспособности. Температура окружающей среды 20°C .

9.83. В последней ступени установки для получения жидкого гелия перегретый пар гелия с давлением 2 МПа дросселируется при $i = 30$ кДж/кг до давления 0,13 МПа. Используя sT -диаграмму гелия [21], определить температуру влажного пара гелия за дроссельным вентилем и интегральный дроссель-эффект.

ГЛАВА 10

СЖАТИЕ ГАЗА В КОМПРЕССОРЕ

10.1. Идеальный одноступенчатый компрессор (рис. 10.1) всасывает $100 \text{ м}^3/\text{ч}$ воздуха при $p_1 = 0,1$ МПа и $t_1 = 27^\circ\text{C}$ и сжимает его до давления $p_2 = 0,8$ МПа. Определить работу, затраченную на сжатие воздуха в компрессоре, отведенное количество теплоты и температуру воздуха для случаев: а) изотермического (I); б) адиабатного (II); в) политропного (III, $n = 1,2$) сжатия воздуха.

10.2. В одноступенчатом компрессоре (рис. 10.1) сжимается воздух, начальное давление которого $p_1 = 0,098$ МПа и температура $t_1 = -10^\circ\text{C}$. Определить максимально допустимое давление воздуха в цилиндре компрессора при: а) адиабатном (II) и б) политропном (III, $n = 1,25$) сжатии, если в обоих случаях максимальное давление ограничивается температурой вспышки масла, несколько превышающей 165°C .

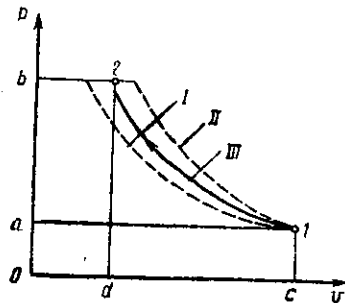


Рис. 10.1

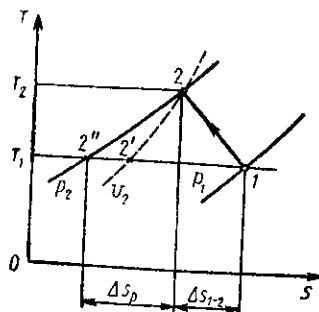


Рис. 10.2

10.3. В идеальном одноступенчатом компрессоре, массовая подача которого $M = 180$ кг/ч, сжимается воздух до давления $p_2 = 0,5$ МПа. Начальное давление воздуха $p_1 = 0,1$ МПа и температура $t_1 = 0^\circ\text{C}$. Определить тепловую мощность, необходимую для охлаждения цилиндра компрессора, и теоретическую мощность привода компрессора, если сжатие происходит политропно ($n = 1,3$). Решить задачу графически по sT -диаграмме.

Решение. Показатель политропы (рис. 10.2) $n = 1,3 = (1-2'')/(1-2')$. По sT -диаграмме для 1 кг воздуха находим отрезок $1-2'' = 110$ мм. Следовательно, отрезок $1-2' = 110/1,3 = 85$ мм. Пользуясь значением отрезка $1-2'$, находим точку 2. Получаем $T_2 = 396 \text{ K}$.

$$\Delta s_{1-2} = -0,088 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{K)}.$$

Отведенное количество теплоты на 1 кг воздуха

$$q = (T_1 + T_2)/(2 \cdot \Delta s_{1-2}) = (273 + 396)/(-2 \cdot 0,088) = -29,4 \text{ кДж/кг}.$$

Тепловая мощность

$$|Q| = |q| M = 29,4 \cdot 180 = 5290 \text{ кДж/ч} = 1,47 \text{ кВт}.$$

По sT -диаграмме получим

$$\Delta s_p = 0,375 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{K)}.$$

Теоретическая работа сжатия газа в компрессоре, согласно первому закону термодинамики,

$$l_k = -(|q| + \Delta i) = -(T_1 + T_2)/2 (\Delta s_{1-2} + \Delta s_p) = -(273 + 396)/[2(0,088 + 0,375)] = -155 \text{ кДж/кг}.$$

Теоретическая мощность привода компрессора

$$|N_k| = |l_k| M = 155 \cdot 180/3600 = 7,75 \text{ кВт}.$$

10.4. Воздух изотермически сжимается в одноступенчатом идеальном компрессоре от $p_1 = 0,1$ МПа, $t_1 = 0^\circ\text{C}$ до $p_2 = 0,4$ МПа. Объемная подача компрессора, отнесенная к параметрам p_1 , t_1 , составляет $V = 350 \text{ м}^3/\text{ч}$. Определить мощность, необходимую для привода компрессора.

10.5. Идеальный одноступенчатый компрессор, объемная подача которого $500 \text{ м}^3/\text{ч}$ (н.у.) сжимает воздух по адиабате от $p_1 = 0,098$ МПа и $t_1 = 20^\circ\text{C}$ до $p_2 = 0,6$ МПа. Определить температуру в конце сжатия и теоретическую мощность, затрачиваемую на привод компрессора.

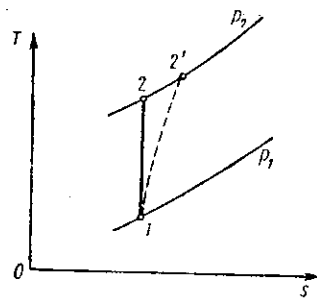


Рис. 10.3

10.6. Одноступенчатый компрессор с массовой подачей 175 кг/ч адиабатно сжимает воздух от $p_1 = 0,1$ МПа до $p_2 = 0,65$ МПа. Определить действительную температуру воздуха в конце сжатия (рис. 10.3) и эффективную мощность привода компрессора, если внутренний относительный к. п. д. компрессора $\eta_{ик} = 0,80$, механический к. п. д. компрессора $\eta_{мк} = 0,85$, температура всасываемого воздуха $t_1 = 30^\circ\text{C}$.

Решение. Теоретическая температура воздуха в конце адиабатного сжатия

$$T_2 = T_1 (p_2/p_1)^{(k-1)/k} = 303 (0,65/0,1)^{(1,41-1)/1,41} = 522 \text{ К.}$$

По определению, внутренний относительный к. п. д. компрессора (рис. 10.3):

$$\eta_{ик} = (i_2 - i_1)/(i_2' - i_1) = (T_2 - T_1)/(T_2' - T_1) = 0,8,$$

откуда действительная температура воздуха в конце сжатия

$$T_2' = T_1 + (T_2 - T_1)/\eta_{ик} = 303 + (522 - 303)/0,8 = 577 \text{ К.}$$

Теоретическая работа, затрачиваемая на компрессор,

$$|l_k| = kRT_1 [(p_2/p_1)^{(k-1)/k} - 1]/(k-1) = 1,41 \cdot 0,287 \cdot 303 \times \\ \times [(0,65/0,1)^{(1,41-1)/1,41} - 1]/(1,41-1) = 216 \text{ кДж/кг.}$$

Эффективная мощность привода компрессора

$$N_e = M |l_k| / (\eta_{ик} \eta_{мк}) = 175 \cdot 216 / (0,8 \cdot 0,85 \cdot 3600) = 15,4 \text{ кВт.}$$

10.7. Определить теоретическую мощность двигателя, предназначенного для привода компрессора, подача которого 1000 м³/ч (н.у.), если сжатие воздуха происходит по политропе $n = 1,21$. Начальные параметры воздуха $p_1 = 0,1$ МПа, $t_1 = 10^\circ\text{C}$, конечное давление $p_2 = 0,6$ МПа. Определить расход охлаждающей воды, если при охлаждении цилиндра компрессора вода нагревается на 20 К.

10.8. Азот сжимается по политропе $n = 1,15$ от $p_1 = 0,102$ МПа и $t_1 = 20^\circ\text{C}$ до $p_2 = 0,95$ МПа. Определить

объемную подачу компрессора, отнесенную к н. у., если мощность двигателя для привода компрессора составляет 42 кВт.

10.9. Идеальный одноступенчатый компрессор, объемная подача которого $V = 150$ м³/ч, сжимает воздух от давления $p_1 = 0,1$ МПа до давления $p_2 = 0,4$ МПа. Как изменится теоретическая мощность двигателя для привода компрессора, если его использовать для сжатия углекислого газа, сохранив прежнюю объемную подачу. В обоих случаях процесс сжатия адиабатный, начальная температура $t_1 = 20^\circ\text{C}$. Изохорная теплоемкость углекислого газа $c_v = 0,94$ кДж/(кг·К).

10.10. Воздух сжимается в одноступенчатом компрессоре от начальных параметров $p_1 = 0,1$ МПа, $t_1 = 20^\circ\text{C}$ до конечных $p_2 = 0,6$ МПа, $t_2 = 85^\circ\text{C}$. В результате уменьшения интенсивности охлаждения компрессора теоретическая работа, затрачиваемая на компрессор, увеличивается на 15 %. Определить температуру воздуха в конце сжатия при уменьшенной интенсивности охлаждения.

10.11. Воздух сжимается в охлаждаемом компрессоре от $p_1 = 0,102$ МПа и $t_1 = 20^\circ\text{C}$ до $p_2 = 0,68$ МПа. Действительная температура воздуха в конце сжатия равна 175°C . Определить эффективную мощность привода компрессора и количество теплоты, отводимое в процессе сжатия, если подача компрессора, отнесенная к нормальным условиям, $V_n = 500$ м³/ч, эффективный изотермический к. п. д. компрессора $\eta_{ек.из} = 0,8$ и механический к. п. д. $\eta_{мк} = 0,86$.

Решение. Массовая подача компрессора

$$M = p^n V^n / (RT^n) = 101,33 \cdot 500 / (0,287 \cdot 273) = 647 \text{ кг/ч.}$$

Эффективная мощность привода компрессора

$$N_{ек} = MRT \ln(p_2/p_1) / (3600 \eta_{ек}) = \\ = 647 \cdot 0,287 \cdot 293 \ln(0,68/0,102) / (3600 \cdot 0,8) = 35,8 \text{ кВт.}$$

Индикаторная мощность, требуемая для привода компрессора,

$$N_{ик} = \eta_{мк} N_{ек} = 0,86 \cdot 35,8 = 30,8 \text{ кВт.}$$

Работа при необратимом политропном сжатии в компрессоре

$$|l_{ик}| = N_{ик} / M = (30,8 \cdot 3600) / 647 = 171,4 \text{ кДж/кг.}$$

Изменение энтальпии воздуха в процессе необратимого политропного сжатия

$$\Delta i = c_p (T_2 - T_1) = 1,005 (175 - 20) = 155,8 \text{ кДж/кг.}$$

Количество теплоты, отводимое в процессе необратимого политропного сжатия,

$$Q = M (\Delta i + l_{ik}) = 647 (155,8 - 171,4) = -10\,093 \text{ кДж/ч.}$$

10.12. Воздух политропно сжимается в одноступенчатом компрессоре от состояния $p_1 = 0,1$ МПа, $t_1 = 0^\circ\text{C}$ до $p_2 = 0,4$ МПа. Плотность нагнетаемого воздуха $\rho_2 = 3,9$ кг/м³; эффективный к. п. д. компрессора $\eta_{ek} = 0,7$. Определить объемную подачу компрессора при н.у., если мощность двигателя, необходимая для привода компрессора, $N_{ek} = 850$ кВт.

10.13. В одноступенчатом компрессоре, подача которого 800 м³/ч (н.у.), сжимается воздух от давления $p_1 = 0,1$ МПа и температуры $t_1 = 20^\circ\text{C}$ до давления 0,6 МПа по политропе с показателем $n = 1,35$. В целях экономии электроэнергии электродвигатель заменили на другой, мощность которого на 12 % меньше. Каким должен быть расход охлаждающей воды, чтобы при работе с новым электродвигателем сохранить подачу компрессора и максимальное давление воздуха? Какова температура воздуха в конце сжатия после замены электродвигателя? Перепад температуры охлаждающей воды $\Delta t = 10$ К. Какой получилась суточная экономия электроэнергии, если затраты на охлаждающую воду составляют 2,4 Вт·ч/кг?

Решение. Массовая подача компрессора

$$M = p^n V^n / (RT^n) = 101,33 \cdot 800 / (0,287 \cdot 273) = 1034,7 \text{ кг/ч.}$$

Работа компрессора до замены электродвигателя

$$l_k = [n' RT_1 / (n' - 1)] [(p_2/p_1)^{(n' - 1)/n'} - 1] = \\ = [1,35 \cdot 0,287 \cdot 293 / (1,35 - 1)] [(0,6/0,1)^{(1,35 - 1)/1,35} - 1] = \\ = 192 \text{ кДж/кг.}$$

Работа компрессора, работающего с новым электродвигателем,

$$l_k'' = 192 - 192 \cdot 12/100 = 169 \text{ кДж/кг.}$$

Показатель политропы сжатия после замены электродвигателя

$$169 = [n'' / (n'' - 1)] 0,287 \cdot 293 [(0,6/0,1)^{(n'' - 1)/n''} - 1],$$

откуда

$$n'' \cong 1,15.$$

Температура воздуха в конце сжатия после замены электродвигателя

$$T_2'' = T_1 (p_2/p_1)^{(n'' - 1)/n''} = 293 \cdot 6^{(1,15 - 1)/1,15} = 370 \text{ К;} \\ t_2'' = 97^\circ\text{C.}$$

Количество теплоты, которое необходимо отвести в рубашку цилиндра,

$$Q'' = M c_p (n'' - k) (t_2'' - t_1) / (n'' - 1) = 1034,7 \cdot 0,71 (1,15 - 1,41) (97 - 20) / (1,15 - 1) = 98\,050 \text{ кДж/ч.}$$

Расход охлаждающей воды после замены электродвигателя

$$m'' = Q'' / (4,187 \cdot 10) = 98\,050 / (4,187 \cdot 10) = 2342 \text{ кг/ч.}$$

Расход охлаждающей воды до замены электродвигателя

$$m' = M c_p (n' - k) T_1 [(p_2/p_1)^{(n' - 1)/n'} - 1] / [(n' - 1) \times \\ \times 4,187 \cdot \Delta t] = 1034,7 \cdot 0,71 (1,35 - 1,41) \times \\ \times 293 (6^{(1,35 - 1)/1,35} - 1) / [(1,35 - 1) 4,187 \cdot 10] = 521 \text{ кг/ч.}$$

Суточная экономия электроэнергии $\mathcal{E} = [0,12 l_k M / 3600 - (m'' - m') 0,0024] 24 = [0,12 \cdot 192 \cdot 1034,7 / 3600 - (2342 - 521) 0,0024] 24 = 54,1 \text{ кВт·ч.}$

10.14. Одноступенчатый поршневой компрессор имеет диаметр цилиндра $D = 300$ мм, ход поршня $H = 450$ мм, относительный объем вредного пространства $\epsilon_0 = 3\%$ и частоту вращения вала $n = 980$ об/мин. Давление воздуха в конце сжатия в 3,2 раза превышает начальное. Определить объемную подачу компрессора для случаев: а) адиабатного; б) политропного ($m = 1,18$); в) изотермического расширения остающегося во вредном пространстве воздуха.

Решение. С учетом влияния объема вредного пространства V_0 (рис. 10.4) на объемную подачу компрессора последняя подсчитывается по формуле

$$V = \lambda_0 V_n n, \quad (10.1)$$

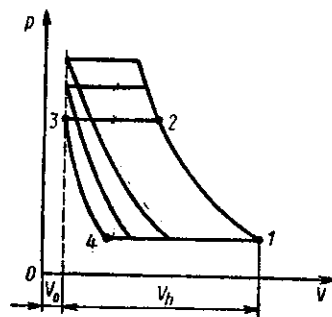


Рис. 10.4

где $\lambda_v = (V_1 - V_4)/V_h$ — объемный к. п. д. компрессора; V_h — рабочий объем компрессора, м^3 ; n — частота вращения вала компрессора, об/мин.

Обозначив относительную величину вредного пространства $\epsilon_0 = V_0/V_h$ и показатель политропы расширения газа из вредного пространства m , получим

$$\lambda_v = (V_1 - V_4)/V_h = (V_h + V_0 - V_4)/V_h = 1 + \epsilon_0 - (V_4/V_h)(V_0/V_h).$$

Так как по уравнению политропы расширения из вредного пространства $V_4/V_0 = (p_2/p_1)^{1/m}$, то

$$\lambda_v = 1 + \epsilon_0 [1 - (p_2/p_1)^{1/m}]. \quad (10.2)$$

Рабочий объем компрессора

$$V_h = \pi D^2 H / 4 = \pi \cdot 0,3^2 \cdot 0,45 / 4 = 0,0318 \text{ м}^3.$$

Подсчет объемного к. п. д. по формуле (10.2):

$$\text{а) } \lambda_v = 1 + 0,03 (1 - 3,2^{1/1,41}) = 0,96;$$

$$\text{б) } \lambda_v = 1 + 0,03 (1 - 3,2^{1/1,18}) = 0,95;$$

$$\text{в) } \lambda_v = 1 + 0,03 (1 - 3,2) = 0,934.$$

Подсчет объемной подачи компрессора по формуле (10.1):

$$\text{а) } V = 0,96 \cdot 0,0318 \cdot 980 = 29,94 \text{ м}^3/\text{мин};$$

$$\text{б) } V = 0,95 \cdot 0,0318 \cdot 980 = 29,58 \text{ м}^3/\text{мин};$$

$$\text{в) } V = 0,934 \cdot 0,0318 \cdot 980 = 29,10 \text{ м}^3/\text{мин}.$$

10.15. Показать, что объемный к. п. д. компрессора уменьшается при увеличении степени повышения давления. Определить предельную степень повышения давления, при которой подача неохлаждаемого компрессора станет равной нулю, если относительный объем вредного пространства $\epsilon_0 = 0,1$.

Решение. По определению, объемный к. п. д. компрессора, характеризующий влияние объема вредного пространства V_0 (рис. 10.4) на подачу, $\lambda_v = (v_1 - v_4)/v_h$. Так как при повышении давления в конце сжатия объем v_4 увеличивается, то объемный к. п. д. λ_v уменьшается.

Подача компрессора станет равной нулю при $\lambda_v = 0$, а так как $\lambda_v = 1 - \epsilon_0 [(p_2/p_1)^{1/k} - 1]$, то

$$p_2/p_1 = [1/(1 - \epsilon_0) + 1]^k = [1/(1 - 0,1) + 1]^{1,41} = 29,4.$$

10.16. Показать, что при одинаковых значениях показателей политропы сжатия и политропы расширения из вредного пространства удельная работа компрессора не зависит от объема вредного пространства.

Решение. Удельная работа на один оборот вала компрессора без учета вредного объема

$$l_k = [np_1 v_1 / (n - 1)] [1 - (p_2/p_1)^{(n-1)/n}].$$

Здесь v_1 — удельный объем газа.

Полная работа цикла компрессора, имеющего вредный объем,

$$\begin{aligned} L'_k &= [np_1 v_1 / (n - 1)] [1 - (p_2/p_1)^{(n-1)/n}] - [np_1 v_4 / (n - 1)] \times \\ &\times [1 - (p_2/p_1)^{(n-1)/n}] = [np_1 (v_1 - v_4) / (n - 1)] \times \\ &\times [1 - (p_2/p_1)^{(n-1)/n}]. \end{aligned}$$

Так как (см. задачу 10.15) $v_1 - v_4 = \lambda_v V_h = V$, где V — объемная подача компрессора за один оборот вала, отнесенная к условиям на входе (p_1 , T_1) и $V = MRT_1/p_1$, где M — массовая подача за один оборот вала, то

$$L'_k = \{np_1 MRT_1 / [(n - 1) p_1]\} [1 - (p_2/p_1)^{(n-1)/n}],$$

или

$$l'_k = [nRT_1 / (n - 1)] [1 - (p_2/p_1)^{(n-1)/n}] = l_k.$$

10.17. Воздух сжимается в одноступенчатом поршневом неохлаждаемом компрессоре от $p_1 = 0,1$ МПа, $t_1 = 0^\circ\text{C}$ до $p_2 = 0,45$ МПа. Диаметр цилиндра $D = 0,18$ м, ход поршня $H = 0,25$ м, частота вращения коленчатого вала $n = 720$ об/мин, относительный объем вредного пространства $\epsilon_0 = 0,08$. Определить объемную подачу компрессора при условиях всасывания и теоретическую мощность привода.

10.18. Одноступенчатый компрессор сжимает газ от состояния $p_1 = 0,1$ МПа, $t_1 = 20^\circ\text{C}$ до $p_2 = 0,6$ МПа по политропе $n = 1,15$. Относительный объем вредного пространства составляет $\epsilon_0 = 5\%$, показатель политропы расширения газа из вредного пространства $m = n = 1,15$. Определить теоретическую мощность двигателя для привода компрессора и рабочий объем цилиндра, если подача компрессора равна $180 \text{ м}^3/\text{ч}$, а частота вращения вала $n = 450$ об/мин.

10.19. Одноступенчатый поршневой компрессор сжимает кислород, начальные параметры которого $p_1 = 0,16$ МПа, $t_1 = 15^\circ\text{C}$, до давления $p_2 = 0,65$ МПа по политропе $n = 1,2$. Диаметр цилиндра $D = 100$ мм, ход поршня $S = 220$ мм, относительный объем вредного пространства $\epsilon_0 = 5\%$; частота вращения вала компрессора $n = 270$ об/мин. Показатель политропы расширения из вредного пространства $m = n = 1,2$. Определить мощность, необходимую для привода компрессора, и расход охлаждающей воды, которая нагревается на 20 К.

10.20. Одноступенчатый неохлаждаемый поршневой компрессор сжимает воздух от давления $p_1 = 988$ гПа и температуры $t_1 = 10^\circ\text{C}$ до давления $p_2 = 0,8$ МПа. Эффективная мощность, необходимая для привода компрессора, $N_{\text{ек}} = 50$ кВт, частота вращения вала компрессора $n = 350$ об/мин. Определить объемную подачу компрессора, отнесенную к н. у., и полный объем цилиндра, если объемный к. п. д. $\lambda_v = 0,88$. Эффективный к. п. д. компрессора $\eta_{\text{ек}} = 0,7$.

10.21. Определить теоретическую работу, затрачиваемую на идеальный компрессор в случаях: а) одноступенчатого; б) двухступенчатого; в) трехступенчатого сжатия воздуха от начального состояния $p_1 = 0,1$ МПа, $t_1 = 20^\circ\text{C}$ до давления $p_k = 2,5$ МПа, если сжатие во всех ступенях компрессора происходит по политропе $n = 1,25$. В случаях (б) и (в) подразумевается, что происходит промежуточное охлаждение воздуха до первоначальной температуры, при этом степень повышения давления в различных ступенях компрессора одна и та же. Определить также предельно допустимое давление в конце сжатия воздуха в трехступенчатом компрессоре, если предельно допустимое значение температуры в конце сжатия равно 120°C .

10.22. Определить экономию (%), получаемую от введения в двухступенчатом компрессоре промежуточного охлаждения воздуха до первоначальной температуры. Начальное давление и температура воздуха $p_1 = 0,1$ МПа; $t_1 = 0^\circ\text{C}$, степени повышения давления в ступенях: в первой $\lambda_1 = 4$, во второй $\lambda_2 = 3$, показатель политропы сжатия $n = 1,18$ в обеих ступенях. Решить задачу аналитически и графически по sT -диаграмме.

10.23. Определить суммарное количество теплоты, отводимое в рубашку и холодильники двухступенчатого идеального компрессора, если после каждой ступени воздух охлаждается в холодильниках до начальной температуры. Воздух перед компрессором имеет давление $p_1 = 0,1$ МПа

и температуру $t_1 = 10^\circ\text{C}$, давление после второй ступени $p_4 = 0,9$ МПа. Сжатие воздуха в обеих ступенях компрессора происходит политропно при $n = 1,3$ и $t_2 = t_4$. Подача компрессора 12 кг/мин. Решить задачу аналитически и графически по sT -диаграмме.

10.24. Определить мощность, затрачиваемую на двухступенчатый идеальный компрессор, сжимающий воздух от начальных параметров $0,1$ МПа, 20°C до конечного давления $2,5$ МПа. Подача компрессора 5000 м³/ч (при параметрах всасывания в I ступень). Сжатие в обеих ступенях адиабатное, воздух охлаждается в промежуточном холодильнике до начальной температуры.

10.25. В двухступенчатом компрессоре воздух сжимается от $0,1$ до $3,6$ МПа. Определить плотность и давление в конце сжатия в первой ступени; температуру конца сжатия, одинаковую в обеих ступенях; количество теплоты, отведенное в промежуточном холодильнике, и работу, затрачиваемую компрессором. Сжатие воздуха в компрессоре происходит по адиабате, начальная температура воздуха 17°C .

10.26. Азот сжимается в двухступенчатом компрессоре без вредного объема от давления $p_1 = 0,1$ МПа до $p_2 = 6,4$ МПа. Начальная температура азота $t_1 = 35^\circ\text{C}$. Эффективная мощность, необходимая для привода компрессора, равна 75 кВт. Определить объемную подачу компрессора, отнесенную к н. у., если в обеих ступенях сжатие происходит по политропе с показателем $n = 1,15$, а степени повышения давления одинаковы. Эффективный к. п. д. компрессора $\eta_{\text{ек}} = 0,7$.

10.27. Воздух сжимается в двухступенчатом идеальном компрессоре с промежуточным охлаждением от $0,095$ до $4,655$ МПа по политропе $n = 1,2$. Начальная температура воздуха в каждой ступени 20°C , степени повышения давления в первой и второй ступенях одинаковые. Объемная подача компрессора при условиях всасывания составляет 400 м³/ч. Определить мощность электродвигателя и расход воды на охлаждение цилиндров и холодильника, если температура воды возрастает на 25 К.

10.28. Воздух перед компрессором имеет температуру $t_1 = 10^\circ\text{C}$ и давление $p_1 = 0,1$ МПа. Давление конца сжатия в трехступенчатом компрессоре равно $6,4$ МПа. Сжатие воздуха во всех ступенях компрессора происходит политропно, $n = 1,15$. Для всех ступеней одинаковы температуры начала сжатия и одинаковы температуры конца сжатия. Определить теоретическую работу трехступенчатого компрессора с промежуточным охлаждением воздуха и выигрыш

в затрате работы по сравнению с двухступенчатым компрессором на то же конечное давление. Начертить теоретическую диаграмму трехступенчатого сжатия в координатах v , p и s , T .

10.29. Воздух сжимается в пятиступенчатом компрессоре от $p_1 = 0,1003$ МПа и $t_1 = 0^\circ\text{C}$ до $p_k = 9,8$ МПа. Сжатие воздуха во всех ступенях происходит по политропе $n = 1,2$, степень повышения давления во всех ступенях одна и та же. Воздух охлаждается в промежуточных холодильниках до его начальной температуры. Построить процесс пятиступенчатого сжатия воздуха в sT -диаграмме; пользуясь этой же диаграммой, определить теоретическую работу компрессора и суммарное количество теплоты, отведенное в рубашки цилиндров и промежуточные холодильники компрессора. Определить также показатель политроты сжатия n' для случая, если отводимое количество теплоты было бы на 5 % меньше при прочих равных условиях.

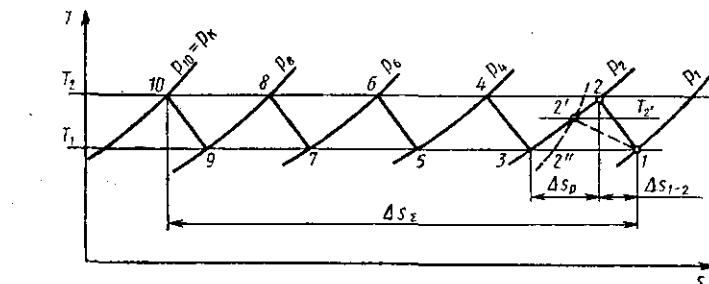


Рис. 10.5

Решение. Степень повышения давления в одной ступени компрессора

$$\lambda = \sqrt[n]{p_k/p_1} = \sqrt[1,2]{9,8/0,1003} = 2,5.$$

Давление конца сжатия в первой ступени компрессора

$$p_2 = \lambda p_1 = 2,5 \cdot 0,1003 = 0,251 \text{ МПа.}$$

На sT -диаграмме наносим точку 1 (рис. 10.5) и, используя значение показателя политроты, строим точку 2, как показано в задаче 10.3. Затем, проводя изобары: $p_2 = 0,251$ МПа; $p_4 = \lambda^2 p_1 = 2,5^2 \cdot 0,1003 = 0,627$ МПа; $p_6 = \lambda^3 p_1 = 2,5^3 \cdot 0,1003 = 1,57$ МПа; $p_8 = \lambda^4 p_1 = 2,5^4 \cdot 0,1003 = 3,92$ МПа, $p_{10} = \lambda^5 p_1 = 2,5^5 \cdot 0,1003 = 9,8$ МПа, и изотермы $T_1 = \text{const}$ и $T_2 = \text{const}$, получаем точки 3,

4, 5, 6, 7, 8, 9, 10 и строим процесс пятиступенчатого сжатия воздуха с промежуточным охлаждением.

Из рис. 10.5 видно, что суммарное количество теплоты, отведенное в рубашки цилиндров и промежуточные холодильники, может быть подсчитано по формуле

$$|q_\Sigma| = (T_1 + T_2) |\Delta s_\Sigma| / 2 = (273 + 325) 1,04 / 2 = 311 \text{ кДж/кг.}$$

Теоретическая работа пятиступенчатого компрессора, согласно первому закону термодинамики,

$$l_k = -5 (|q_{1-2}| + \Delta i) = -5 (T_1 + T_2) (\Delta s_{1-2} + \Delta s_p) / 2 = -5 (273 + 325) (0,08 + 0,16) / 2 = -358,8 \text{ кДж/кг.}$$

При уменьшенном на 5 % суммарном количестве отведенной теплоты

$$T_1 + T_2' = 2q_\Sigma' / \Delta s_\Sigma = 2 \cdot 295,25 / 1,04 = 568 \text{ К,}$$

откуда $T_2' = 568 - 273 = 295 \text{ К.}$

При этом показатель политроты сжатия

$$n' = (1-3)/(1-2'') = 60/54 = 1,11.$$

10.30. Воздух подается потребителю компрессором, имеющим подачу $150 \text{ м}^3/\text{мин}$ при н. у. Параметры всасываемого воздуха $0,102$ МПа и 17°C . Мощность, затрачиваемая на компрессор, не более $1,6$ МВт. Подобрать максимально возможное число ступеней компрессора и определить давление воздуха на выходе из последней ступени, если количество теплоты, отводимое при сжатии и охлаждении воздуха в одной ступени, составляет 15 кДж/кг ; сжатие в каждой ступени происходит по политропе $n = 1,15$; степень повышения давления во всех ступенях одна и та же.

10.31. Необходимо сжимать 480 кг/ч атмосферного воздуха ($0,102$ МПа, 10°C) до давления $3,2$ МПа. В распоряжении имеется три электродвигателя мощностью 10 , 20 и 30 кВт . Подобрать число ступеней компрессора, если температура воздуха не должна превышать 120°C и для всех ступеней компрессора одинаковы показатели политроты сжатия ($n = 1,3$), а также температуры в начале сжатия и температуры в конце сжатия.

Какими из указанных электродвигателей можно обеспечить необходимую мощность привода компрессора и опреде-

лить общий расход воды, m , кг/ч, для охлаждения цилиндров и холодильников, если температура воздуха, поступающего к потребителю, должна быть равна 50°C , а температура входа и выхода охлаждающей воды равна соответственно 5 и 25°C .

ГЛАВА 11

ЦИКЛЫ ТЕПЛОВЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

§ 11.1. Циклы тепловых двигателей с газообразным рабочим телом

11.1. Провести термодинамический анализ цикла, изображенного на рис. 11.1. Цикл определен следующими данными: начальные параметры рабочего тела $p_1 = 0,1$ МПа, $t_1 = 10^\circ\text{C}$, степень сжатия $\epsilon = v_1/v_2 = 7,5$, давление $p_3 = 6,4$ МПа. Рабочее тело — 1 кг сухого воздуха.

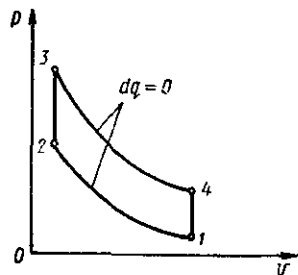


Рис. 11.1

Решение. Основная задача термодинамического анализа цикла теплового двигателя заключается в оценке к. п. д. и полезной работы цикла. В рассматриваемом случае необходимо определить термический к. п. д., так как задан термодинамический (т. е. обратимый) цикл.

На рис. 11.1 изображен термодинамический цикл двигателя внутреннего сгорания, работающего со сгоранием топлива при $v = \text{const}$. Термический к. п. д. этого цикла

$$\eta_t = 1 - 1/\epsilon^{k-1}.$$

Для воздуха и двухатомных газов показатель адиабаты $k = 1,41$, следовательно,

$$\eta_t = 1 - 1/7,5^{1,41-1} = 0,562.$$

Работа цикла

$$l_{ц} = l_{3-4} - |l_{1-2}| = RT_3 [1 - (v_3/v_4)^{k-1}] / (k-1) - \\ - RT_2 [1 - (v_2/v_1)^{k-1}] / (k-1).$$

В рассматриваемом цикле $v_3/v_4 = v_2/v_1 = 1/\epsilon$. Тогда

$$l_{ц} = R(1 - 1/\epsilon^{k-1})(T_3 - T_2)/(k-1).$$

Из уравнения изохоры $2-3$ $T_3 = T_2 p_3/p_2$. Из уравнения изобары $1-2$ $T_2 = T_1 (v_1/v_2)^{k-1} = T_1 \epsilon^{k-1}$; $p_2 = p_1 \epsilon^k$.

Следовательно,

$$l_{ц} = RT_1 \eta_t \epsilon^{k-1} [p_3/(p_1 \epsilon^k) - 1] / (k-1) = 0,287 \cdot 283 \cdot 0,562 \times \\ \times 7,5^{1,41-1} [6,4/(0,1 \cdot 7,5^{1,41}) - 1] / (1,41 - 1) = 695,7 \text{ кДж/кг}.$$

Здесь $R = 0,287$ кДж/(кг · К) — газовая постоянная сухого воздуха.

11.2. Определить температуру T_3 (рис. 11.1), если количество теплоты, подведенное в цикле, будет на 15 % меньше, чем в задаче 11.1 при тех же значениях степени сжатия ϵ и начальных параметров рабочего тела. Как при этом изменится работа цикла и термический к. п. д.?

11.3. В задаче 11.1 рассматривается цикл, по которому работают ДВС с принудительным зажиганием. Определить максимально допустимую степень сжатия ϵ^* для бензина, имеющего температуру самовоспламенения 283°C . Подсчитать термический к. п. д. при степени сжатия, составляющей 90% от максимально допустимой, и сравнить его значение с полученным в условиях задачи 11.1. Какое количество теплоты нужно подвести к рабочему телу в новых условиях, чтобы не изменилась работа цикла?

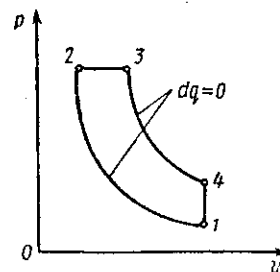


Рис. 11.2

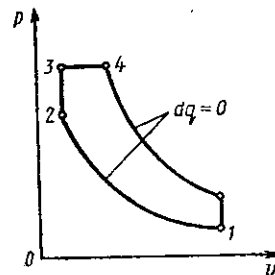


Рис. 11.3

11.4. Для цикла ДВС с подводом теплоты в процессе $p = \text{const}$ (рис. 11.2) определить термический к. п. д. η_t , работу $l_{ц}$ и подведенное количество теплоты q_{2-3} , если известно: рабочее тело — 1 кг сухого воздуха; параметры воздуха на входе в цилиндры $p_1 = 0,1$ МПа, $t_1 = 0^\circ\text{C}$; давление в конце процесса подвода теплоты $p_3 = 5,2$ МПа; расширение рабочего тела происходит до давления $p_4 = 0,4$ МПа.

11.5. Для цикла ДВС со смешанным подводом теплоты (рис. 11.3) определить параметры p , v , T всех крайних точек

процессов и термический к. п. д. η_t по следующим данным: $p_1 = 0,1$ МПа; $t_1 = 0^\circ\text{C}$; $p_3 = 5$ МПа; $p_4 = 0,25$ МПа; количество теплоты, подведенное в изобарном процессе, $q_{2-3} = 400$ кДж/кг; рабочее тело — 1 кг сухого воздуха.

11.6. Построить цикл, рассчитанный в задаче 11.5, в координатах s, T , соблюдая масштабы. Изохоры и изобару строить по промежуточным точкам.

11.7. Выяснить, как влияет на термический к. п. д. цикла ДВС со смешанным подводом теплоты (рис. 11.3) изменение параметров цикла ϵ, ρ и λ , выбирая значения параметров из следующих интервалов: $10 \leq \epsilon \leq 18$; $1 \leq \lambda \leq 3,5$; $1 \leq \rho \leq 2,5$. Построить графики $\eta_t = \eta_t(\epsilon)$, $\eta_t = \eta_t(\rho)$, $\eta_t = \eta_t(\lambda)$.

11.8. Выяснить с помощью относительного к. п. д. $\eta_0 = \eta_t/\eta_k$, какой из циклов, рассмотренных в задачах 11.4 и 11.5, является более совершенным в термодинамическом смысле. Здесь η_k — к. п. д. цикла Карно.

11.9. Для условий задачи 11.5 определить общее подведенное количество теплоты. Каким станет термический к. п. д. цикла, если в изобарном процессе подвести только 100 кДж/кг, а остальное — в изохорном процессе? Проанализировать полученный результат, пользуясь решением задачи 11.6. Как изменится работа цикла?

11.10. Для цикла ДВС с подводом теплоты при $v = \text{const}$ (см. рис. 11.1) определить термический к. п. д. η_t , теоретическую мощность N_t и среднее теоретическое давление цикла p_t по следующим данным: рабочее тело — сухой воздух; $p_1 = 0,1$ МПа; $t_1 = 10^\circ\text{C}$; степень сжатия $\epsilon = v_1/v_2 = 5,5$; расход топлива составляет $m = 0,024$ кг на 1 кг рабочего тела; теплотворная способность топлива $Q_p^H = 27\,000$ кДж/кг, диаметр цилиндра двигателя $D = 220$ мм, ход поршня $H = 320$ мм, частота вращения коленчатого вала $n = 350$ об/мин; двигатель четырехтактный.

Решение. Термический к. п. д.

$$\eta_t = 1 - 1/\epsilon^{k-1} = 1 - 1/5,5^{1,41-1} = 0,503.$$

Работа цикла

$$l_{ц} = q_{2-3} \eta_t = Q_p^H m \eta_t = 2700 \cdot 0,024 \cdot 0,503 = 326 \text{ кДж/кг}.$$

Здесь $m = 0,024$ кг/кг раб. тела — расход топлива.

Массовый расход рабочего тела:

$$M_{p,т} = V/(v_1 - v_2) = 0,035/0,66 = 0,053 \text{ кг/с}.$$

Здесь $V = \pi D^2 H n / (4 \cdot 2 \cdot 60) = \pi \cdot 0,22^2 \cdot 0,32 \cdot 350 / (4 \cdot 2 \cdot 60) = 0,035 \text{ м}^3/\text{с}$ — объемный расход рабочего тела; $v_1 - v_2 = RT_1/p_1 - v_1/\epsilon = RT_1(1 - 1/\epsilon)/p_1 = 0,287 \times \times 283(1 - 1/5,5)/100 = 0,66 \text{ м}^3/\text{кг}$ — удельное значение рабочего объема цилиндра.

Теоретическая мощность цикла

$$N_t = l_{ц} M_{p,т} = 326 \cdot 0,053 = 17,3 \text{ кВт}.$$

Среднее теоретическое давление цикла

$$p_t = l_{ц}/(v_1 - v_2) = 326/0,66 = 494 \text{ кДж/м}^3 = 494 \text{ кПа}.$$

Проверка: $N_t = p_t V = 494 \cdot 0,035 = 17,3 \text{ кВт}.$

11.11. Определить термический к. п. д. η_t , теоретическую мощность N_t и рабочий объем цилиндра V_h четырехцилиндрового четырехтактного ДВС, работающего по циклу со сгоранием при $p = \text{const}$ (см. рис. 11.2), если принять: рабочее тело — сухой воздух; $p_1 = 0,1$ МПа; $T_1 = 290$ К; $\epsilon = v_1/v_2 = 17$; $T_3 = 1600$ К; подведенное количество теплоты $Q = 640\,000$ кДж/ч; частота вращения коленчатого вала $n = 1600$ об/мин. Подсчитать также мощность, приходящуюся на 1 л рабочего объема цилиндра (литровую мощность).

11.12. Среднее теоретическое давление цикла ДВС с подводом теплоты при $v = \text{const}$ $p_1 = 4,8 \cdot 10^5$ Па, степень сжатия $\epsilon = 5,5$; $p_1 = 0,1$ МПа; $t_1 = 20^\circ\text{C}$. При снятии индикаторной диаграммы было получено значение среднего индикаторного давления $p_i = 2,58 \cdot 10^5$ Па. Определить термический к. п. д. цикла Карно η_k для интервала температур $T_{\min} - T_{\max}$; термический к. п. д. η_t рассматриваемого цикла ДВС; относительный к. п. д. $\eta_0 = \eta_t/\eta_k$; внутренний (индикаторный) к. п. д. η_i ; внутренний относительный к. п. д. $\eta_{oi} = \eta_i/\eta_t$.

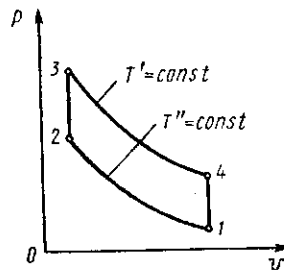


Рис. 11.4

11.13. На рис. 11.4 изображен цикл, составленный из двух изохор и двух изотерм, называемый циклом Стирлинга. Введя параметры цикла: $T_{\max}/T_{\min} = T'/T'' = \tau$ и $v_1/v_2 = v_4/v_3 = \epsilon$, получить выражение для термического к. п. д. этого цикла.

11.14. Получить зависимость термического к. п. д. цикла Стирлинга (см. задачу 11.13) от параметров τ, ϵ и σ , где σ — степень регенерации теплоты в цикле.

Решение. $\eta_t = 1 - |q_{отв}|/q_{подв}$. Степенью регенерации называется отношение количества теплоты $q_{2-3'}$, переданного рабочему телу в регенераторе, к предельному количеству теплоты, которое могло бы участвовать в процессе регенерации. В цикле Стирлинга (рис. 11.4) $\sigma = q_{2-3'}/q_{2-3}$. Количество теплоты, подводимое от внешнего источника,

$$q_{подв} = q_{2-3} - q_{2-3'} + q_{3-4} = q_{2-3} - \sigma q_{2-3} + q_{3-4} = q_{2-3} \times (1 - \sigma) + q_{3-4}.$$

Количество теплоты, отведенное в окружающую среду,

$$|q_{отв}| = |q_{4-1}| - \sigma |q_{4-1}| + |q_{1-2}| = |q_{4-1}|(1 - \sigma) + |q_{1-2}|.$$

Тогда

$$\begin{aligned} \eta_t^{\sigma} &= 1 - [c_v(T' - T'')(1 - \sigma) + c_p(k - 1)T'' \ln \epsilon] / [c_v(T' - T'')(1 - \sigma) + c_p T' (k - 1) \ln \epsilon] = 1 - T''[(\tau - 1)(1 - \sigma) + (k - 1) \ln \epsilon] / \{T'[(1 - 1/\tau)(1 - \sigma) + (k - 1) \ln \epsilon]\} = \\ &= 1 - [(\tau - 1)(1 - \sigma) + (k - 1) \ln \epsilon] / [(\tau - 1)(1 - \sigma) + \tau(k - 1) \ln \epsilon]. \end{aligned}$$

11.15. В цикле Стирлинга (рис. 11.4) известны следующие параметры: $p_1 = 4,5$ МПа; $T_1 = 324$ К; $T_3 = 973$ К; $\epsilon = v_1/v_2 = 1,5$. Рабочее тело — гелий Не. Определить: а) термический к. п. д. η_t для случая $\sigma = 0$ (без регенерации) и максимальное давление цикла p_{max} ; б) термические к. п. д. для случаев $\sigma = 0,7$ и $\sigma = 1$.

11.16. Двигатель Стирлинга, имеющий теоретическую мощность 115 кВт, работает в интервале температур 60... 650 С; степень сжатия $\epsilon = 2,0$, рабочее тело — углекислый газ. Определить термический к. п. д. цикла двигателя при степени регенерации $\sigma = 0,9$ и массовый расход углекислого газа. Среднюю теплоемкость углекислого газа принять $c_p = 1,13$ кДж/(кг · К).

11.17. Необходимо сжимать 0,125 м³/с воздуха (при условиях на всасывании) от $p_0 = 0,1$ МПа, $t_0 = 0$ °С до $p_k = 2,0$ МПа в двухступенчатом компрессоре со степенью повышения давления в первой ступени $\lambda_1 = 5$. Для привода компрессора имеется четырехцилиндровый двухтактный дизель с диаметром цилиндров $D = 108$ мм и ходом поршня $H = 127$ мм. Рассчитать необходимый расход топлива, если на номинальном режиме работы дизеля среднее индикаторное давление $p_i = 720$ кПа, частота вращения коленчатого вала $n = 2000$ об/мин; зависимость удельного эффективно-

го расхода топлива от нагрузки (нагрузочная характеристика дизеля) задана следующими числами:

100 ($N_e/N_{e\text{ном}}$)	40%	60%	80%	100%
g_e , г/(кВт·ч)	370	303	255	264

При расчете принять, что температура начала сжатия в обеих ступенях компрессора одна и та же, сжатие адиабатное, эффективный к. п. д. компрессора $\eta_{ек} = 0,72$, механический к. п. д. дизеля $\eta_m = 0,85$.

11.18. На рис. 11.5 дано изображение принципиальной схемы комбинированного двигателя внутреннего сгорания (КДВС) с газотурбинным наддувом и схемы (рис. 11.6, а, б) его термодинамического цикла в координатах p и v и s , T . Сущность этого составного термодинамического цикла заключается в том, что количество теплоты q_2 , отводимое от рабочего тела в цикле поршневого двигателя 2-3-4-5-2, целиком подводится к рабочему телу

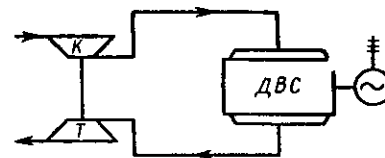


Рис. 11.5

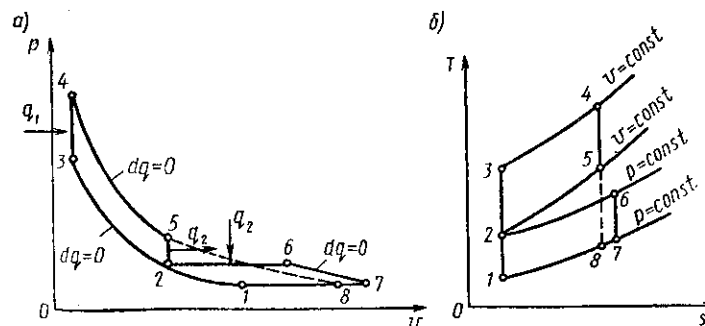


Рис. 11.6

в цикле 1-2-6-7-1 турбокомпрессора. Определить: параметры p , v , T всех точек цикла 1-2-3-4-5-2-6-7-1; термический к. п. д. η_t цикла поршневого двигателя; термический к. п. д. $\eta_{то}$ цикла комбинированного двигателя; работу цикла турбокомпрессора $l_{п.тк}$. Расчет провести по следующим исходным данным: рабочее тело — 1 кг сухого воздуха; $p_1 = 0,1$ МПа; $t_1 = 20$ °С; $\beta = p_2/p_1 = 3$; $\epsilon = v_2/v_3 = 10$; $\lambda = p_4/p_3 = 2,0$.

Указание. Термический к. п. д. цикла комбинированного двигателя может быть подсчитан по формуле

$$\eta_{tc} = 1 - (\lambda p^k - 1) / \{\varepsilon_0^{k-1} [\lambda - 1 + k\lambda (\rho - 1)]\},$$

где $\varepsilon_0 = \varepsilon_{\varepsilon_1}$ — общая степень сжатия; $\varepsilon_1 = v_1/v_2$ — степень сжатия в трубокомпрессоре.

11.19. Определить термический к. п. д. η_t , относительный к. п. д. $\eta_o = \eta_t/\eta_k$ и работу цикла $l_{ц}$ газотурбинной установки (ГТУ) с подводом теплоты по изобаре (рис. 11.7), если параметры рабочего тела на входе в компрессор $p_1 =$

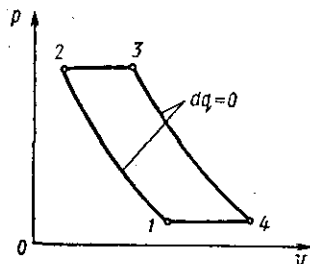


Рис. 11.7

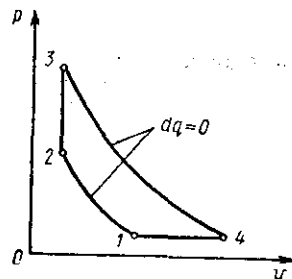


Рис. 11.8

$= 0,1$ МПа, $t_1 = 0^\circ\text{C}$; степень повышения давления в компрессоре $\beta = p_2/p_1 = 9$; температура газов, поступающих на лопатки турбинного колеса, $t_3 = 510^\circ\text{C}$; рабочее тело — 1 кг сухого воздуха.

11.20. Для условий предыдущей задачи определить термический к. п. д. η_t , работу турбины $l_{от}$, работу компрессора $l_{ок}$ и массовый расход рабочего тела, если в качестве последнего будет использован углекислый газ, а теоретическая мощность установки $N_t = 400$ кВт. Принять среднюю теплоемкость углекислого газа $c_p = 0,92$ кДж/(кг · К), считая его идеальным газом.

11.21. В термодинамическом цикле ГТУ с подводом теплоты при $p = \text{const}$ (рис. 11.7) известны следующие параметры: $t_1 = 17^\circ\text{C}$; $p_2/p_1 = 3,5$; $t_3 = 650^\circ\text{C}$. Определить удельные индикаторный и эффективный расходы топлива в установке, если теплотворная способность топлива $Q_p^H = 41\,000$ кДж/кг, расход воздуха $M_a = 5000$ кг/ч, относительный индикаторный (внутренний) к. п. д. установки $\eta_{oi} = 0,73$, механический к. п. д. $\eta_m = 0,88$. При расчете пренебречь разницей в физических свойствах воздуха и продуктов сгорания топлива, а также количеством теплоты,

идущим на нагревание топлива и стенок камеры сгорания, и потерями теплоты от неполноты сгорания топлива.

11.22. Определить параметры p , v , T крайних точек всех процессов, работу цикла $l_{ц}$ и термический к. п. д. η_t цикла ГТУ с подводом теплоты по изохоре (рис. 11.8), если известны $p_1 = 0,1$ МПа; $t_1 = 0^\circ\text{C}$, $p_2 = 0,95$ МПа; $p_3 = 1,4$ МПа; рабочее тело — 1 кг сухого воздуха.

11.23. Определить мощность ГТУ, работающей с подводом теплоты при $v = \text{const}$ (рис. 11.8), термический к. п. д. 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 $M_a = 8,3$ кг/с, теплотворная способность топлива $Q_p^H = 40\,000$ кДж/кг, рабочее тело имеет физические свойства сухого воздуха.

Решение. Температура в конце адиабатного сжатия в компрессоре ГТУ

$$T_2 = T_1 (p_2/p_1)^{(k-1)/k} = 290 (0,82/0,10)^{(1,41-1)/1,41} = 535 \text{ K}.$$

Работа, получаемая при расширении рабочего тела в турбине,

$$l_{от} = kR(T_3 - T_4)/(k-1) = N/M_a, \text{ откуда } T_4 = T_3 - N_T/(k-1)/(kM_a R).$$

Учитывая полученный результат, можно следующим образом выразить температуру в конце изохорного подвода теплоты:

$$T_3 = T_4 (p_3/p_4)^{(k-1)/k} = [T_3 - N_T/(k-1)/(kM_a R)] \times (p_3/p_4)^{(k-1)/k}.$$

Из уравнения изохоры $p_3 = p_2 T_3/T_2$, следовательно,

$$T_3 = [T_3 - N_T/(k-1)/(kM_a R)] \{p_2 T_3/(p_4 T_2)\}^{(k-1)/k},$$

или

$$T_3 = [T_3 - 5000(1,41-1)/(1,41 \cdot 8,3 \cdot 0,287)] \{0,82 \times T_3/(0,1 \cdot 535)\}^{(1,41-1)/1,41}.$$

Решив это уравнение, получим $T_3 = 1090 \text{ K}$.

Мощность, затраченная на изменение давления воздуха в компрессоре и камере сгорания,

$$N_k + N_{k.c} = M_v kR (T_2 - T_1)/(k-1) + M_v v_2 (p_3 - p_2) = \\ M_v kR (T_2 - T_1)/(k-1) + M_v RT_2 (p_2 T_3/T_2 - p_2)/p_2 = \\ = M_v R [k(T_2 - T_1)/(k-1) + T_3 - T_2] = 8,3 \cdot 0,287 \times \\ \times [1,41 (535 - 290)/(1,41 - 1) + 1090 - 535] = 3330 \text{ кВт.}$$

Мощность газотурбинной установки

$$N_{ГТУ} = N_T - (N_k + N_{k.c}) = 5000 - 3330 = 1670 \text{ кВт.}$$

Подведенное количество теплоты

$$Q_{2-3} = M_v c_p (T_3 - T_2) = 8,3 \cdot 1,005 (1090 - 535) = \\ = 4629,5 \text{ кВт.}$$

Термический к. п. д. цикла

$$\eta_t = N_{ГТУ}/Q_{2-3} = 1670/4629,5 = 0,36.$$

Расход топлива

$$B = 3600 Q_{2-3}/Q_p^n = 3600 \cdot 4629,5/40\,000 = 416,7 \text{ кг/ч.}$$

11.24. Рассчитать расход топлива на единицу полезной мощности g [г/(кВт · ч)] в ГТУ с подводом теплоты при $v = \text{const}$ (рис. 11.8), если работа турбины $l_{\text{от}} = 500$ кДж/кг, давление и температура $p_1 = 0,1$ МПа, $t_1 = 0^\circ\text{C}$, $p_2 = 0,95$ МПа, теплотворная способность топлива $Q_p^n = 42\,000$ кДж/кг, расход рабочего тела $M_{p.t} = 4,2$ кг/с, рабочее тело имеет физические свойства сухого воздуха.

11.25. На рис. 11.9, а, б изображены схема газотурбинной установки ГТ700-5, работающей с подводом теплоты при постоянном давлении с регенерацией, и схема ее теоретического цикла. Давление воздуха на входе в компрессор

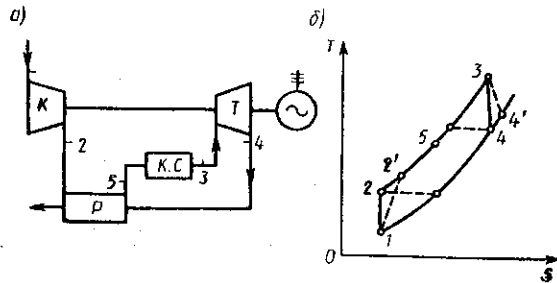


Рис. 11.9

(К) $p_1 = 0,098$ МПа, температура $T_1 = 288$ К, степень повышения давления $\beta = p_2/p_1 = 3,9$, температура газов на входе в турбину (Т) $T_3 = 973$ К, степень регенерации $\sigma = 0,75$. Определить термический к. п. д. цикла при заданной степени регенерации, с предельной регенерацией ($\sigma = 1,0$) и без регенерации. Найти количество теплоты, передаваемое в регенераторе (Р) при $\sigma = 0,75$, если расход рабочего тела $M_{p.t} = 162 \cdot 10^3$ кг/ч, а его средняя теплоемкость $c_p = 1,005$ кДж/(кг · К).

Решение. Степенью регенерации называется отношение фактически регенерированного количества теплоты к предельно возможному, или, другими словами, отношение действительного повышения температуры воздуха в регенераторе к предельно возможному.

Термический к. п. д. цикла ГТУ с регенерацией может быть подсчитан по формуле

$$\eta_t^\sigma = (p - 1) (\beta^{(k-1)/k} - 1) / [\beta^{(k-1)/k} (p - 1) - \\ - \sigma (p - \beta^{(k-1)/k})] = (2,27 - 1) (3,9^{(1,41-1)/1,41} - \\ - 1) / [3,9^{(1,41-1)/1,41} (2,27 - 1) - 0,75 (2,27 - \\ - 3,9^{(1,41-1)/1,41})] = 0,474.$$

Здесь $\sigma = 0,75$ — степень регенерации теплоты в цикле; $p = v_3/v_2$ — степень предварительного расширения;

$$p = v_3/v_2 = T_3/T_2; T_2 = T_1 (p_2/p_1)^{(k-1)/k} = \\ = 288 \cdot 3,9^{(1,41-1)/1,41} = 428 \text{ К.}$$

Следовательно, $p = T_3/T_2 = 973/428 = 2,27$.

Термический к. п. д. цикла с предельной регенерацией подсчитывается по той же формуле

$$\eta_t^{\sigma=1} = (2,27 - 1) (3,9^{(1,41-1)/1,41} - 1) / [3,9^{(1,41-1)/1,41} \times \\ \times (2,27 - 1) - (2,27 - 3,9^{(1,41-1)/1,41})] = 0,560.$$

Термический к. п. д. цикла без регенерации

$$\eta_t^{\sigma=0} = 1 - 1/\beta^{(k-1)/k} = 1 - 1/3,9^{(1,41-1)/1,41} = 0,326.$$

Из соотношения $\sigma = (T_5 - T_2)/(T_4 - T_2)$ определим температуру

$$T_5 = T_2 + \sigma (T_4 - T_2) = 428 + 0,75 (656 - 428) = \\ = 599 \text{ К.}$$

Здесь $T_4 = T_3/\beta^{(k-1)/k} = 973/3,9^{(1,41-1)/1,41} = 656 \text{ К.}$

Количество теплоты, передаваемое в регенераторе (при $\sigma = 0,75$),

$$Q_{\text{рег}} = M_{\text{p.т}} c_p (T_3 - T_2) = 162\,000 \cdot 1,005 (599 - 428) = 27,84 \cdot 10^6 \text{ кДж/ч}$$

11.26. Определить экономию топлива за счет регенерации в газотурбинной установке ГТУ-3 с подводом теплоты в процессе $p = \text{const}$ (см. рис. 11.7), если мощность установки 300 кВт; $T_1 = 293 \text{ К}$; $\beta = p_2/p_1 = 3,25$; $T_3 = 1023 \text{ К}$, степень регенерации $\sigma = 0,52$; теплотворная способность топлива $Q_p^* = 41\,900 \text{ кДж/кг}$, рабочее тело имеет свойства сухого воздуха.

11.27. По условиям задачи 11.25 определить температуры на выходе из турбины и компрессора и внутренний к. п. д. ГТУ без регенерации с учетом необратимости процессов расширения газов в турбине и сжатия воздуха в компрессоре. Внутренний относительный к. п. д. турбины принять равным $\eta_{oiT} = 0,86$, а компрессора $\eta_{oiK} = 0,80$.

Решение. На рис. 11.9, б линиями 1-2' и 3-4' условно показаны процессы сжатия и расширения с учетом необратимости, приводящей к росту энтропии в адиабатических процессах.

Внутренний относительный к. п. д. турбины

$$\eta_{oiT} = (i_3 - i_4') / (i_3 - i_4) = (T_3 - T_4') / (T_3 - T_4),$$

откуда

$$T_4' = T_3 - \eta_{oiT} (T_3 - T_4) = 973 - 0,86 (973 - 656) = 700 \text{ К}$$

Здесь $T_4 = T_3 / \beta^{(k-1)/k} = 973 / 3,9^{(1,41-1)/1,41} = 656 \text{ К}$.

Внутренний относительный к. п. д. компрессора

$$\eta_{oiK} = (i_2 - i_1) / (i_2' - i_1) = (T_2 - T_1) / (T_2' - T_1),$$

откуда

$$T_2' = T_1 + (T_2 - T_1) / \eta_{oiK} = 288 + (428 - 288) / 0,8 = 463 \text{ К}.$$

Здесь $T_2 = T_1 \beta^{(k-1)/k} = 288 \cdot 3,9^{(1,41-1)/1,41} = 428 \text{ К}$

Внутренним к. п. д. установки называется отношение разности действительных перепадов энтальпии в турбине и компрессоре к изменению энтальпии в камере сгорания:

$$\eta_{\text{ГТУ}} = [(i_3 - i_4') - (i_2' - i_1)] / (i_3 - i_2) = [(T_3 - T_4') - (T_2' - T_1)] / (T_3 - T_2) = [(973 - 700) - (463 - 288)] / (973 - 463) = 0,192.$$

11.28. В цикле ГТУ с подводом теплоты при $p = \text{const}$ и двухступенчатым сжатием воздуха без регенерации (рис. 11.10, а, б) известны значения параметров $p_1 = 0,1 \text{ МПа}$; $t_1 = t_3 = 17^\circ \text{C}$; $p_5 = 0,9 \text{ МПа}$ и теоретический теплотеперепад в турбине $\Delta i_T = 500 \text{ кДж/кг}$. Определить удельный эффективный расход топлива в установке, если теплотворная способность топлива $Q_p^* = 40\,000 \text{ кДж/кг}$, массовый расход воздуха $M_a = 12\,000 \text{ кг/ч}$, к. п. д. камеры сгорания $\eta_{\text{к.с.}} = 0,95$, внутренний относительный к. п. д.

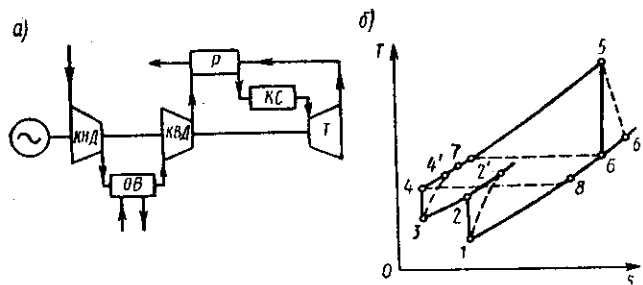


Рис. 11.10

турбины $\eta_{oiT} = 0,87$, внутренние относительные к. п. д. компрессоров $\eta_{oiKВД} = \eta_{oiKНД} = 0,82$, механический к. п. д. установки $\eta_m = 0,85$. При расчете принять $t_2 = t_4$.

11.29. Газотурбинная установка ГТ-25-700-1, схема которой дана на рис. 11.10, а, работает по циклу с двухступенчатым сжатием, подводом теплоты при $p = \text{const}$ и регенерацией. Теоретический цикл в координатах s, T изображен на рис. 11.10, б. Определить давления и температуры во всех точках цикла, термический к. п. д. цикла, теоретическую мощность ГТУ и количества теплоты, передаваемые в охладителе воздуха (ОВ) и в регенераторе (Р), принимая следующие значения величин: температура воздуха на входе в компрессор низкого давления (КНД) $T_1 = 290 \text{ К}$; давление $p_1 = 0,098 \text{ МПа}$; степени повышения давления в КНД и КВД $\beta = p_2/p_1 = p_4/p_3 = 3,16$; температура воздуха после охладителя $T_3 = 313 \text{ К}$; температура газа перед турбиной (Т) $T_5 = 973 \text{ К}$; степень регенерации $\sigma = 0,80$. Рабочее тело по всему тракту установки имеет физические свойства воздуха; расход рабочего тела составляет 190 кг/с .

11.30. Исходя из условий задачи 11.29, определить термический к. п. д. цикла η_t для работы без регенерации ($\sigma = 0$); температуры на выходе из КНД (T_2'), КВД (T_4') и

турбины (T_6) с учетом необратимости процессов расширения и сжатия; внутренний к. п. д. цикла η_i ; внутренний относительный к. п. д. цикла η_{oi} . Принять следующие значения внутренних относительных к. п. д. элементов установки: $\eta_{oi\text{кнд}} = 0,85$; $\eta_{oi\text{квд}} = 0,82$; $\eta_{oi\text{т}} = 0,87$.

11.31. В качестве рабочего тела в ГТУ закрытого цикла с подводом теплоты при $p = \text{const}$ используется смесь гелия He и ксенона Xe следующих составов: а) $g_{\text{He}} = 0$; $g_{\text{Xe}} = 100\%$; б) $g_{\text{He}} = 50\%$; $g_{\text{Xe}} = 50\%$; в) $g_{\text{He}} = 100\%$; $g_{\text{Xe}} = 0$. Считая рабочее тело идеальным газом, вычислить для этих составов термический к. п. д. цикла η_t ; работу цикла l_d ; теоретическую мощность турбины N_t ; полезную теоретическую мощность установки N_y .

Расчет провести по следующим данным (см. рис. 11.7): $p_2 = 5 \text{ МПа}$; $T_2 = 1000 \text{ К}$; $T_3 = 1300 \text{ К}$; $\beta = p_2/p_1 = 3$; массовый расход рабочего тела $M_{p.t} = 23 \text{ кг/с}$; средние массовые теплоемкости: $c_{p\text{He}} = 5,2 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{К)}$, $c_{p\text{Xe}} = 0,158 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{К)}$.

11.32. В ГТУ закрытого цикла, предназначенной для работы в космосе (питание бортовой аппаратуры летательных аппаратов), теплота подводится к рабочему телу в ядерном реакторе, а сброс теплоты в космическое пространство производится холодильником-излучателем. Термодинамический цикл ГТУ, работающей с регенерацией теплоты, показан на рис. 11.9, б.

Изобразить принципиальную схему такой установки, для случая полной регенерации определить термический к. п. д. цикла, сравнив его с к. п. д. при отсутствии регенерации. Определить также состав рабочего тела (смесь гелия He и ксенона Xe), обеспечивающий получение теоретической мощности установки $N_y = 3000 \text{ кВт}$. Для расчета использовать следующие данные: $p_1 = 1,8 \text{ МПа}$; $t_1 = 100^\circ \text{C}$; $t_3 = 850^\circ \text{C}$; $p_2/p_1 = 2,5$; $M_{p.t} = 20 \text{ кг/с}$; $c_{p\text{He}} = 5,2 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{К)}$, $c_{p\text{Xe}} = 0,158 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{К)}$.

11.33. Будущее крупной энергетики связано с применением ядерного горючего. В СССР проведены проектные исследования характеристик блока АЭС с высокотемпературным газоохлаждаемым реактором на тепловых нейтронах и одноконтурной гелиевой газотурбинной установкой закрытого цикла (ГТУЗЦ), действительной (внутренней) мощностью 1200 МВт*. Конструктивные варианты ГТУЗЦ проектировались по циклу с однократным подводом теплоты,

* Канаев А. А., Ратников Е. Ф., Копп И. З. Термодинамические циклы, схемы и энергооборудование атомных электростанций. М., 1976. С. 256.

двукратным охлаждением газа в процессе сжатия и регенерацией. Один из вариантов представляет собой одновальную установку с однокорпусной турбиной, тремя последовательно расположенными по газовому тракту компрессорами, тремя охладителями гелия и регенератором.

Изобразить принципиальную схему такой установки и ее цикл в координатах s, T и рассчитать: тепловую мощность реактора, действительную (внутреннюю) мощность турбины; мощность, затрачиваемую на компрессоры; количество теплоты, отводимое в охладителях гелия; эффективный к. п. д. ГТУ; степень регенерации и количество теплоты, передаваемое в регенераторе; полный электрический к. п. д. и электрическую мощность блока АЭС.

Расчет провести по следующим данным: давление и температура гелия перед турбиной 8,07 МПа и 1200 °С, температура гелия на входе в реактор 675 °С, степень понижения давления в турбине 3,3; расход гелия 731,5 кг/с. Сжатие гелия в компрессорах и расширение в турбине считать адиабатными. Принять внутренние относительные к. п. д. турбины и компрессоров $\eta_{oi\text{т}} = 0,88$ и $\eta_{oi\text{к}} = 0,86$; механический к. п. д. $\eta_m = 0,94$; к. п. д. электрогенератора $\eta_g = 0,97$. Ступенчатое сжатие гелия рассматривать при условии, что степени повышения давления во всех компрессорах одинаковы при одинаковых температурах начала сжатия. Принятые параметры рассмотренного варианта схемы ГТУЗЦ выбирались при проектных исследованиях на основе оптимизационных расчетов.

11.34. Самолет с прямоточным воздушно-реактивным двигателем (ПВРД) летит со скоростью 420 км/с. Температура окружающего воздуха $t = -20^\circ \text{C}$. Определить степень повышения давления в диффузоре ВРД и термический к. п. д. цикла (см. рис. 11.7), считая рабочим телом сухой воздух.

Решение. Степень повышения давления в диффузоре ВРД определяется из уравнения $d(w^2/2) = -vdp$.

Интегрируя это уравнение для случая полного торможения воздуха (т. е. в пределах от w до 0) с использованием уравнения адиабаты $pv^k = \text{const}$ и уравнения состояния $pv = RT$, имеем

$$-w^2/2 = kRT_1 [1 - (p_2/p_1)^{(k-1)/k}] / (k-1),$$

откуда

$$\beta^{(k-1)/k} = (p_2/p_1)^{(k-1)/k} = 1 + w^2 (k-1) / (2kRT_1) =$$

$$= 1 + 420^2 (1,41 - 1) / (2 \cdot 1,41 \cdot 287 \cdot 253) = 1,35;$$

$$\beta = 1,35^{k/(k-1)} = 1,35^{1,41/(1,41-1)} = 2,8.$$

Термический к. п. д. цикла

$$\eta_t = 1 - 1/\beta^{(k-1)/k} = 1 - 1/1,35 = 0,260.$$

11.35. Определить степень повышения давления и термический к. п. д. цикла ПВРД (см. рис. 11.7) при скорости самолета, характеризующийся числом Маха $M = 1,2$. Определить также работу цикла и диаметр выходного сечения реактивного сопла, если давление и температура окружающего воздуха $0,085$ МПа и -13°C , расход воздуха $M_v = 13,8$ кг/с, расход топлива $m_T = 580$ кг/ч и его теплотворная способность $Q_p^* = 42\,000$ кДж/кг. Как изменится термический к. п. д., если скорость самолета уменьшится до $M = 0,8$?

11.36. По исходным данным и результатам задачи 11.34 определить скорость истечения газов в атмосферу (при полном использовании располагаемого перепада давлений), а также тягу и полетный к. п. д. двигателя, если диаметр входного сечения диффузора $D = 200$ мм, расход и теплотворная способность топлива $m_T = 920$ кг/ч и $Q_p^* = 42\,000$ кДж/кг, атмосферное давление $p_1 = 0,08$ МПа.

Решение. Площадь входного сечения диффузора $F = \pi D^2/4 = \pi 0,2^2/4 = 0,0314$ м².

Плотность воздуха в набегающем потоке

$$\rho_1 = p_1/(RT_1) = 80/(0,287 \cdot 253) = 1,1 \text{ кг/м}^3.$$

Расход воздуха

$$M_v = F \omega \rho_1 = 0,0314 \cdot 420 \cdot 1,1 = 14,5 \text{ кг/с}.$$

Подведенное количество теплоты

$$q_{2-3} = m_T Q_p^*/M_v = 920 \cdot 42\,000/(14,5 \cdot 3600) = 740,2 \text{ кДж/кг}.$$

Температура на входе в камеру сгорания

$$T_2 = T_1 \beta^{(k-1)/k} = 253 \cdot 2,8^{(1,41-1)/1,41} = 341 \text{ К}.$$

Температура на выходе из камеры сгорания

$$T_3 = q_{2-3}/c_p + T_2 = 740,2/1,005 + 341 = 1077 \text{ К}.$$

Скорость истечения газов в атмосферу

$$\begin{aligned} \omega_k &= \sqrt{2kRT_3[1 - (p_4/p_3)^{(k-1)/k}]/(k-1)} = \\ &= \sqrt{2 \cdot 1,41 \cdot 287 \cdot 1077 [1 - (1/2,8)^{(1,41-1)/1,41}]/(1,41-1)} = \\ &= 741 \text{ м/с}. \end{aligned}$$

Уравнение силы тяги ВРД

$$P = \omega_k (M_v + m_T) - \omega M_v = 741 (14,5 + 0,255) - 420 \cdot 14,5 = 4843 \text{ Н}.$$

Полезная мощность, т. е. мощность, затрачиваемая на движение самолета,

$$N = P\omega = 4843 \cdot 420 = 2034 \text{ кН} \cdot \text{с/кг}.$$

Располагаемая мощность газового потока, вытекающего из реактивного сопла,

$$N_p = (M_v + m_T) \omega_k^2/2 - M_v \omega^2/2 = (14,5 + 0,255) 741^2/2 - 14,5 \cdot 420^2/2 = 2772 \text{ кН} \cdot \text{с/кг}.$$

Полетный к. п. д.

$$\eta_{\text{пол}} = N/N_p = 2034/2772 = 0,73.$$

11.37. В цикле турбокомпрессорного ВРД (рис. 11.11) общая степень повышения давления $\beta_0 = p_3/p_1 = 10$. Двигатель установлен на самолете, который летит со скоростью 750 км/ч. Температура воздуха на входе в диффузор $t_1 = 0^\circ\text{C}$, давление на выходе из диффузора $p_2 = 0,12$ МПа. Подведенное количество теплоты в цикле составляет 450 кДж/кг. Определить: термический к. п. д. η_t цикла ТКВРД; степень повышения давления в компрессоре $\beta_k = p_3/p_2$; степень расширения газов в соплах $\sigma_c = p_6/p_5$. Считать, что продукты сгорания топлива имеют физические свойства воздуха.

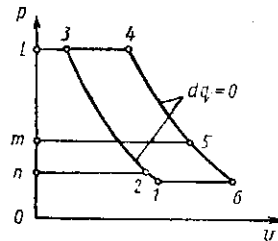


Рис. 11.11

11.38. Как одна из перспектив использования газотурбинного двигателя (ГТД) в авиации рассматривается комбинированный двигатель для межконтинентального самолета, летающего без дозаправки горючим. В такой установке к рабочему телу ТКВРД теплота подводится в теплообменнике от горячего гелия, циркулирующего в контуре атомного ГТД. Изобразить циклы гелия и воздуха в координатах s, T и рассчитать суммарную теоретическую тягу двигателя в полете, если скорость самолета 850 км/ч; температура и давление окружающего воздуха 0°C и $0,09$ МПа; мощность ядерного реактора 150 МВт; степень повышения давления гелия в компрессоре $2,5$; степень понижения давления воздуха в турбине $6,0$; давление в теп-

лообменнике 1 МПа; диаметр входного сечения диффузора ТКВРД 800 мм; к. п. д. воздушного винта 25%.

Примечание. К. п. д. воздушного винта представляет собой отношение мощности тяги винта к мощности двигателя, вращающего винт.

11.39. На рис. 11.12, а, б изображен цикл жидкостного ракетного двигателя (ЖРД). Введя параметры цикла: $\sigma = p_3/p_2$ — степень расширения газа в сопле и $\varepsilon = p_4/p_2$ — степень возможного расширения, получить выражение для

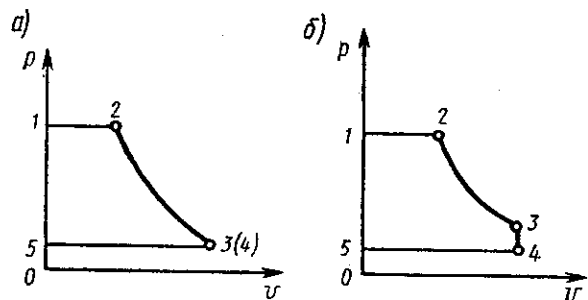


Рис. 11.12

подсчета термического к. п. д. η_t цикла в двух случаях. а) $p_3 = p_4$ (расчетный режим, рис. 11.12, а); б) $p_3 > p_4$ (рис. 11.12, б).

Решение. а) $\eta_t = l_u/q_{1-2} = (i_2 - i_3)/(i_2 - i_1) = (T_2 - T_3)/(T_2 - T_1) = 1 - T_3/T_2 / (1 - T_1/T_2) = (1 - \delta^{(k-1)/k}) / (1 - \varepsilon^{(k-1)/k})$, а так как $v_1 \approx 0$ (объем жидкого топлива пренебрежимо мал по сравнению с объемом продуктов сгорания), то

$$\eta_t = 1 - \delta^{(k-1)/k}$$

$$\begin{aligned} \text{б) } \eta_t &= [i_2 - i_3 + v_3(p_3 - p_4)] / (i_2 - i_1) = [c_p(T_2 - T_3) + \\ &+ R(T_3 - T_4)] / [c_p(T_2 - T_1)] = \{1 - T_3/T_2 + (k-1) \times \\ &\times [T_3/T_2 - T_4/T_3] / k\} / (1 - v_1/v_2) = 1 - \delta^{(k-1)/k} + \\ &+ (k-1) (\delta^{(k-1)/k} - \varepsilon \delta^{(k-1)/k} / \delta) / k = 1 + \delta^{(k-1)/k} \{k-1 - \\ &- k - (k-1) \varepsilon / \delta\} / k = 1 - \delta^{(k-1)/k} [e(k-1)/\delta + 1] / k. \end{aligned}$$

11.40. При сжигании смеси кислород — керосин в камере сгорания ЖРД температура в ней достигает $T_2 = 3600$ К при давлении $p_2 = 3,6$ МПа. Степень расширения продуктов сгорания в сопле $\delta = p_3/p_2 = 0,025$. Пользуясь выра-

жениями, полученными в задаче 11.39, и считая показатель адиабаты равным $k = 1,14$, определить: температуру продуктов сгорания на срезе сопла T_3 ; термический к. п. д. η_t при работе двигателя на расчетном режиме (рис. 11.12, а); термический к. п. д. η_i при работе двигателя на высоте с давлением окружающей среды $p_4 = 0,06$ МПа (т. е. $p_3 > p_4$, рис. 11.12, б); термический к. п. д. η_i для указанной высоты, если бы продукты сгорания могли расширяться в сопле двигателя до давления окружающей среды p_4 .

Примечание. Степень расширения газов в сопле $\delta = p_3/p_2$ зависит только от геометрии сопла и не зависит от режима его работы. Во всех задачах данного раздела, связанных с ЖРД, имеются в виду сопла Лавалья с неизменяющейся геометрией («постоянные» сопла).

11.41. Степень расширения газа в сопле ЖРД $\delta = p_3/p_2 = 0,02$. При сгорании горючей смеси давление в камере сгорания $p_2 = 5$ МПа. Определить термический к. п. д. цикла двигателя при работе его на высоте с давлением $p_4 = 0,05$ МПа (рис. 11.12, б), приняв $k = 1,3$.

11.42. Определить, на сколько процентов увеличится термический к. п. д. цикла ЖРД при подъеме двигателя с земли (давление 0,1 МПа), где он работал на расчетном режиме, на высоту с давлением $p = 0,05$ МПа. Степень расширения газа в сопле принять $\delta = 0,02$, а $k = 1,22$.

11.43. Определить, во сколько раз увеличится термический к. п. д. ЖРД со степенью расширения в сопле $\delta = 0,023$ при переводе с топлива, обеспечивающего показатель адиабаты продуктов сгорания $k_1 = 1,15$, на топливо, обеспечивающее $k_2 = 1,45$.

11.44. ЖРД установлен на зенитной ракете, скорость полета которой $w = 550$ м/с. Степень расширения газа в сопле $\delta = p_3/p_2 = 0,025$ (рис. 11.12); давление в камере сгорания 3,5 МПа; температура в конце сгорания 3000 К; диаметр выходного сечения сопла $d_3 = 300$ мм. Рассчитать удельную тягу двигателя и полетный к. п. д. для полета: а) на расчетной высоте; б) на высоте 6500 м. Определить, какую часть общей массы двигателя составляет полный запас энергокомпонентов на борту ракеты, если он рассчитан на 15 с работы двигателя, а удельная масса ЖРД без горючего равна 0,005 кг/Н. Для продуктов сгорания принять $k = 1,35$, $c_p = 1,25$ кДж/(кг · К). Давление атмосферы на уровне моря $p_0 = 101\,325$ Па.

Решение. Удельная тяга (Н·с/кг) — это отношение тяги к массовому расходу энергокомпонентов: $P_{уд} = P/M$.

Уравнение силы тяги ЖРД $P = M\omega_3 + f_3(p_3 - p_4)$. Следовательно, удельная тяга

$$P_{уд} = \omega_3 + f_3(p_3 - p_4)/M.$$

Скорость истечения продуктов сгорания

$$\omega_3 = \sqrt{2kRT_2[1 - \delta^{(k-1)/k}]/(k-1)} = \\ = \sqrt{2 \cdot 1,35 \cdot 324 \cdot 3000 [1 - 0,025^{(1,35-1)/1,35}]/(1,35-1)} = \\ = 2150 \text{ м/с.}$$

Здесь $R = c_p - c_v = 1,25 - 1,25/1,35 = 0,324 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{К)}$.

а) Определение удельной тяги и полетного к. п. д. на расчетной высоте. Согласно полученному выше выражению для $P_{уд}$, удельная тяга на расчетной высоте ($p_3 = p_4$)

$$P_{уд} = \omega_3 = 2150 \text{ Н} \cdot \text{с/кг.}$$

Удельная мощность тяги

$$N_{т.уд} = P_{уд}\omega = 2150 \cdot 550 \cdot 10^{-3} = 1183 \text{ кВт} \cdot \text{с/кг}$$

Удельная мощность двигателя

$$N_{д.уд} = l_0 = \omega_3^2/2 = 2150^2/(2 \cdot 10^3) = 2311 \text{ кВт} \cdot \text{с/кг.}$$

Полетный к. п. д.

$$\eta_{пол} = N_{т.уд}/N_{д.уд} = 1183/2311 = 0,512.$$

б) Давление атмосферы на высоте $H = 6500 \text{ м}$ определим по формуле (см. задачу 1.12):

$$p_4 = B_0 (1 - H/44\,300)^{5,256} = 101\,325 (1 - 6500/44\,300)^{5,256} = 44\,006 \text{ Па} \approx 0,44 \text{ МПа.}$$

Давление газов на срезе сопла

$$p_3 = p_2 \delta = 3,5 \cdot 0,025 = 0,0875 \text{ МПа, т. е. } p_3 > p_4.$$

Плотность газов на срезе сопла

$$\rho_3 = p_2 \delta^{1/k}/(RT_2) = 3500 \cdot 0,025^{1/1,35}/(0,324 \cdot 3000) = \\ = 0,234 \text{ кг/м}^3.$$

По уравнению неразрывности течения в сопле расход энергокомпонентов

$$M = \rho_3 f_3 \omega_3 = 0,234 \cdot 0,07 \cdot 2150 = 35,2 \text{ кг/с.}$$

Здесь $f_3 = \pi d_3^2/4 = \pi 0,3^2/4 = 0,070 \text{ м}^2$.

Удельная тяга

$$P'_{уд} = \omega_3 + f_3(p_3 - p_4)/M = 2150 + 0,07(87,5 - 44,0) 10^3/35,2 = 2237 \text{ Н} \cdot \text{с/кг.}$$

Удельная мощность тяги

$$N'_{т.уд} = P_{уд}\omega = 2237 \cdot 550 \cdot 10^{-3} = 1230 \text{ кВт} \cdot \text{с/кг.}$$

Удельная мощность двигателя

$$N'_{д.уд} = \omega_3^2/2 + (p_3 - p_4)/\rho_3 = 2150^2/(2 \cdot 10^3) + (87,5 - 44)/0,234 = 2497 \text{ кВт} \cdot \text{с/кг.}$$

Полетный к. п. д.

$$\eta_{пол} = 1230/2497 = 0,492.$$

Абсолютная тяга двигателя на расчетном режиме

$$P = M\omega_3 = 35,2 \cdot 2150 = 75\,680 \text{ Н,}$$

следовательно, масса двигателя без горючего составляет

$$M_d = 0,005 \cdot 75\,680 = 378,4 \text{ кг.}$$

Масса двигателя с полным запасом горючего

$$M_{\Sigma} = M_d + \tau M = 378,4 + 15 \cdot 35,2 = 906,4 \text{ кг.}$$

Доля горючего в общей массе двигателя в начальный момент

$$15 \cdot 35,2 \cdot 100/906,4 = 58,3\%.$$

11.45. Определить термический к. п. д. и располагаемую мощность ЖРД, работающего на расчетной высоте (рис. 11.12, а), если давление в камере сгорания $p_2 = 8 \text{ МПа}$, температура продуктов сгорания $T_2 = 2500 \text{ К}$, давление окружающей среды $p_3 = 0,1 \text{ МПа}$, диаметр выходного сечения сопла 200 мм . Принять теплоемкость и среднюю молярную массу продуктов сгорания $c_p = 1,24 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{К)}$ и $\mu = 30,3 \text{ кг/кмоль}$.

§ 11.2. Циклы паросиловых установок

11.46. Определить термический к. п. д. паросиловой установки, работающей по циклу Ренкина. Начальное давление пара $p_1 = 3 \text{ МПа}$; температура перегрева $T_1 = 773 \text{ К}$. Расчеты выполнить для трех конечных давлений: $p_2 = 0,2 \text{ МПа}$; $p_2' = 0,04 \text{ МПа}$; $p_2'' = 0,004 \text{ МПа}$.

Решение. Термический к. п. д. цикла Ренкина определяется по формуле

$$\eta_t = (i_1 - i_2)/(i_1 - i_3),$$

где i_1, i_2, i_3 — значения энтальпии пара на входе в турбину, на выходе из нее и воды конденсата при p_2 соответственно. Из таблиц теплотехнических свойств воды и водяного пара (см. Приложение) находим (кДж/кг): $i_1 = 3456$; $i_2 = 2754$; $i_3 = 505$; $i'_1 = 3456$; $i'_2 = 2488$; $i'_3 = 317,5$; $i''_1 = 3456$; $i''_2 = 2180$; $i''_3 = 122$.

К. п. д. циклов

$$\eta_t = (i_1 - i_2) / (i_1 - i_3) = (3456 - 2754) / (3456 - 505) = 0,237;$$

$$\eta'_t = (i'_1 - i'_2) / (i'_1 - i'_3) = (3456 - 2488) / (3456 - 317,5) = 0,308;$$

$$\eta_t = (i''_1 - i''_2) / (i''_1 - i''_3) = (3456 - 2180) / (3456 - 122) = 0,382.$$

При уменьшении давления в конце расширения к. п. д. цикла Ренкина возрастает.

11.47. Что произойдет с термическим к. п. д. паросиловой установки, если при постоянном конечном давлении за турбиной $p_2 = 0,005$ МПа и неизменной температуре перегрева пара $T_1 = 823$ К в пределах допустимого изменения сухости пара в конце расширения увеличить первоначальное давление перед турбиной с $p_1 = 3$ МПа до $p'_1 = 9$ МПа?

Решение выполнить по si -диаграмме водяного пара.

11.48. Сколько потребуется пара и какое количество теплоты при этом будет затрачено на единицу работы паросиловой установки, работающей на перегретом водяном паре по циклу Ренкина. Параметры цикла: $T_{пер} = 773$ К; $p_1 = 5$ МПа; $p_2 = 0,005$ МПа; $x_2 = 0,822$. Задачу решить либо с использованием таблиц теплотехнических свойств воды и водяного пара (см. Приложение), либо по si -диаграмме.

Решение. Энтальпия пара в конце расширения

$$i_2 = i'' x_2 + (1 - x_2) i'_3 = 2561 \cdot 0,822 + (1 - 0,822) \times 137 = 2130 \text{ кДж/кг},$$

где $i'_3 = c_{ж} t_n = 4,1686 \cdot 32,88 = 137$ кДж/кг — энтальпия конденсата, при температуре насыщения $T_n = 32,88 + 273 = 305,88$ К.

Термический к. п. д. цикла

$$\eta_t = (i_1 - i_2) / (i_1 - i_3) = (3433 - 2130) / (3433 - 137) = 0,395.$$

Удельный расход пара на единицу работы

$$d = 1000 / (i_1 - i_2) = 1000 / 1303 = 0,762 \text{ кг/МДж}.$$

Удельный расход теплоты на единицу работы

$$q = 1000 / \eta_t = 1000 / 0,395 = 2531 \text{ кДж/МДж}.$$

11.49. Как изменится термический к. п. д. паросиловой установки, если (см. предыдущую задачу): а) перегрев пара увеличить до $T_{пер} = 873$ К; б) увеличить перегрев пара до $T_{пер} = 873$ К и давление до $p_1 = 8,5$ МПа. Решение выполнить по si -диаграмме.

11.50. Как изменится расчетный термический к. п. д. паросиловой установки, работающей на насыщенном паре по циклу Ренкина, если при его подсчете в одном случае учесть затраты, связанные со сжатием воды от давления конденсата $p_2 = 0,005$ МПа до давления пара в парогенераторе $p_1 = 8$ МПа, а в другом учитывая малость этих затрат, пренебречь ими?

11.51. Во сколько раз нужно увеличить количество воды, необходимой для охлаждения конденсатора, в случае перевода паросиловой установки на режим работы расширения с $p_2 = 0,05$ МПа на $p'_2 = 0,005$ МПа? Считать, что охлаждающая вода в конденсаторе и в первом и во втором случае нагревается до температуры насыщения. Температура холодной воды, поступающей в конденсатор, 288 К. Влажность пара в конце расширения за турбиной увеличивается от $x_2 = 0,06$ до $x'_2 = 0,15$.

11.52. Как изменятся показатели термической экономичности паросиловой установки, работающей по циклу Ренкина на перегретом паре $T_1 = 773$ К и $p_1 = 10$ МПа, если в одном случае пар в турбине количественно весь расширяется до $p_2 = 0,05$ МПа, а во втором — расширение идет с двумя частичными отборами пара из проточной части турбины для регенеративного подогрева питательной воды. Первый отбор $g_m = 0,1$ кг/кг при $i_m = 2800$ кДж/кг, второй $g_n = 0,1$ кг/кг при $i_n = 2600$ кДж/кг.

Решение. Термический к. п. д. цикла без отбора пара из турбины

$$\eta_t = (i_1 - i_2) / (i_1 - i_3) = (3375 - 2300) / (3375 - 40) = 0,354.$$

Энтальпии пара (кДж/кг) на входе в турбину, на выходе из нее и воды конденсата: $i_1 = 3375$; $i_2 = 2300$; $i_3 = 340$, находим из таблиц Приложения.

Энтальпия пара, отобранного на подогрев воды: от первого отбора $i_m g_m = 2800 \cdot 0,1 = 280$ кДж/кг; от второго отбора $i_n g_n = 2600 \cdot 0,1 = 260$ кДж/кг; суммарная —

$$i_{\Sigma} = i_m g_m + i_n g_n = 280 + 260 = 540 \text{ кДж/кг.}$$

Энтальпия питательной воды после регенеративного подогрева

$$i_3' = i_n' + i_{\Sigma} = 272 + 540 = 812 \text{ кДж/кг;}$$

$$i_n' = i_3 (1 - g_m - g_n) = 272 \text{ кДж/кг.}$$

Расход теплоты на получение 1 кг пара в парогенераторе в случае регенеративного подогрева

$$q_i' = i_1 - i_3' = 3375 - 812 = 2563 \text{ кДж/кг.}$$

Работа цикла с двумя отборами

$$l_u' = (i_1 - i_2) - (i_m - i_2) g_m - (i_n - i_2) g_n = (3375 - 2300) - (2800 - 2300) 0,1 - (2600 - 2300) 0,1 = 995 \text{ кДж/кг.}$$

Термический к. п. д. цикла с отборами

$$\eta_i' = l_u' / q_i' = 995 / 2563 = 0,388.$$

Удельные расходы пара на 1 МДж

$$d = 1000 / l_u = 1000 / 1075 = 0,93 \text{ кг/МДж; } d' = 1000 /$$

$$l_u' = 1000 / 995 = 1,01 \text{ кг/МДж.}$$

Удельные расходы теплоты на 1 МДж

$$q = dq_1 = 1000 / \eta_i = 1000 / 0,354 = 2875 \text{ кДж/кг;}$$

$$q' = d' q_i' = 1000 / \eta_i' = 1000 / 0,388 = 2577 \text{ кДж/кг; } q' < q.$$

11.53. Как будет изменяться к. п. д. цикла паросиловой установки, а также какие изменения произойдут с рабочим телом в конце расширения, если изменить начальные параметры пара $p_1 = 1,5$ МПа и $T_1 = 623$ К следующим образом: в первом случае повысить температуру перегрева до $T_1' = 823$ К при неизменном давлении p_1 , во втором — увеличить давление до $p_1' = 5$ МПа при неизменной температуре T_1 ; в третьем — одновременно повысить давление и температуру до $p_1'' = 5$ МПа и $T_1'' = 823$ К. Расширение вести до давления $p_2 = 0,005$ МПа. Задачу решить по si -диаграмме водяного пара.

11.54. До какой температуры необходимо увеличить перегрев пара в паросиловой установке, чтобы изменить сухость пара в конце адиабатного расширения в турбине с $x_2 = 0,78$ до $x_2' = 0,88$. Как при этом изменится термический

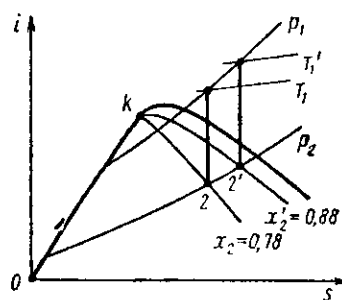


Рис. 11.13

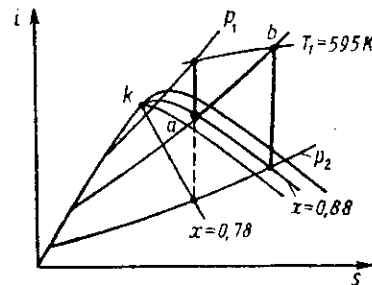


Рис. 11.14

к. п. д. цикла. Параметры цикла: $p_1 = 3$ МПа; $T_1 = 595$ К; $p_2 = 0,005$ МПа. Решение выполнить по si -диаграмме.

Решение. Для цикла с сухостью $x_2 = 0,78$ (рис. 11.13): $i_1 = 3056$ кДж/кг; $i_2 = 2028$ кДж/кг; $i_3 = 137$ кДж/кг. Для цикла с сухостью $x_2' = 0,88$ при том же $p_2 = 0,005$ МПа начальная температура должна возрасти до $T_1' = 853$ К, чему будут соответствовать $i_1' = 3636$ кДж/кг, $i_2' = 2270$ кДж/кг, $i_3' = 137$ кДж/кг.

Термические к. п. д. цикла:

$$\eta_i = (i_1 - i_2) / (i_1 - i_3) = (3056 - 2028) / (3056 - 137) = 0,352;$$

$$\eta_i' = (i_1' - i_2') / (i_1' - i_3') = (3636 - 2270) / (3636 - 137) = 0,39.$$

11.55. Решить предыдущую задачу об увеличении сухости пара с $x_2 = 0,78$ до $x_2' = 0,88$, но не за счет увеличения температуры перегрева пара $T_1 = 595$ К до значения $T_1' = 853$ К, а за счет промежуточного (вторичного) перегрева пара до той же температуры $T_1 = 595$ К (рис. 11.14). Сравнить теоретический к. п. д. нового цикла с к. п. д. цикла предыдущей задачи (см. рис. 11.13).

11.56. В паротурбинной установке, работающей по циклу Ренкина, давление и температура пара перед турбиной составляют $p_1 = 8,826$ МПа и $T_1 = 808$ К (рис. 11.15). Давление в конденсаторе $p_2 = 3,923 \times 10^{-3}$ МПа. Определить внеш-

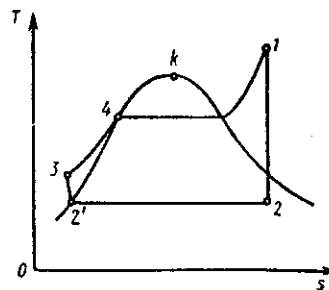


Рис. 11.15

11.57. Цикл паросиловой установки осуществляется с двумя отборами пара из проточной части турбины (рис. 11.16, а). Пар используется для регенеративного подогрева питательной воды парогенератора в двух подогревателях до температуры $T_{II}'' = 473$ К. Параметры цикла: $p_1 = 5$ МПа; $T_1 = 773$ К. Расширение в турбине производится до давления $p_2 = 0,005$ МПа. Определить, какое количество

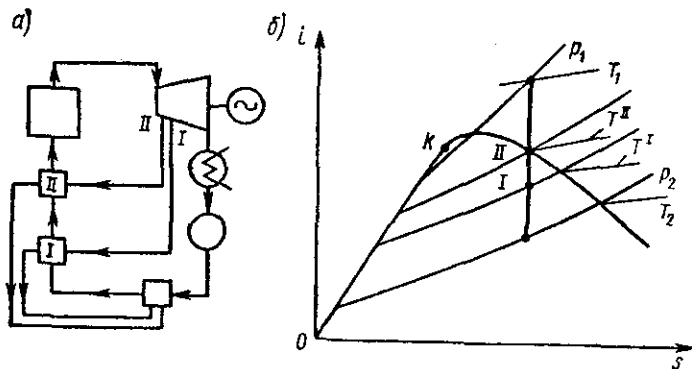


Рис. 11.16

Решение. На рис. 11.16, б в координатах s, i изображен процесс расширения в турбине и отмечены точки отборов. Используя si -диаграмму, находим энтальпии (кДж/кг): $i'_2 = 138$ — воды за конденсатором; i_6 — питательной воды за баком; $i_1 = 2538$ — пара из I отбора $t_n = 373$; $i_{II} = 2855$ — пара из II отбора $t_n = 473$; $i'_1 = 417,4$ — конденсата I отбора; $i'_{II} = 664$ — конденсата II отбора.

Для определения отборов необходимо написать уравнения тепловых балансов подогревателей и бака питательной воды.

$$i_6 = i'_2 (1 - g_I - g_{II}) + i_I q_I + i'_{II} g_{II},$$
$$g_1(i_1 - i'_1) = t_1 c_8 - i_6.$$
$$g_{II}(i_{II} - i'_{II}) = c_{II} t_{II} - c_{II} t_I.$$
$$g_{11} (2855 - 664) = 4,187 (478 - 373);$$

$$g_{11} = 418,7/2191 = 0,190 \text{ кг/кг.}$$

$$i_6 = t_1 c_{\text{B}} - g_1 (i_1 - i_1').$$
$$t_1 c_b - g_1 (i_1 - i_1') = i_2' (1 - g_I - g_{II}) + i_1' g_I + i_{II}' g_{II};$$

$$100 \cdot 4,187 - g_1 (2538 - 417,4) = 0,138 (1 - g_1 - 0,19) + 417,4g_1 + 664 \cdot 0,19;$$

$$g_1 = 0,076 \text{ кг/кг.}$$

$$1 - (g_1 + g_{II}) = 1 - (0,076 + 0,19) = 0,784 \text{ кг/кг.}$$
$$i_6 = t_1 c_B - g_1 (i_1 - i'_{11}) = 100 \cdot 4,187 - 0,07 \cdot 2121 = 258 \text{ кДж/кг.}$$
$$t = i_6/c_n = 258/4,187 = 61,6^\circ\text{C}.$$

11.58. Вычислить значение внутреннего относительного к. п. д. паровой турбины, если состояние пара перед турбиной соответствует давлению 13 МПа и температуре 838 К. Давление в конденсаторе 4 кПа. Внутренние потери вследствие необратимости процесса расширения составляют 225 кДж/кг

§ 11.3. Работоспособность термодинамических систем. Эксергия

11.59. Определить эксергию 1 кг углекислого газа, находящегося при давлении $p = 1$ МПа и температуре $T = 600$ К по отношению к окружающей среде с параметрами $p_0 = 0,1$ МПа и $T_0 = 293$ К.

Решение. $\mathcal{E} = (i - i_0) - T_0 (s - s_0) = c_p (T - T_0) - T_0 [c_p \ln (T/T_0) - R \ln (p/p_0)] = 0,97 (600 - 293) - 2,3 \cdot 293 [0,97 \lg (600/293) - (8,314/44) \lg (1/0,1)] = 211,8$ кДж/кг.

11.60. Определить эксергию количества вещества воздуха 1 кмоль, находящегося при температуре окружающей среды и давлении $p = 10$ МПа. Температура окружающей среды $T_0 = 293$ К и давление $p_0 = 0,1$ МПа.

11.61. Определить увеличение эксергии 1 кг воздуха, который находится в равновесии с окружающей средой, имеющей параметры $p_0 = 0,1$ МПа, $T_0 = 293$ К, если его адиабатно сжать до $T = 500$ К.

11.62. Определить потерю эксергии воздуха при дросселировании его от давления $p_1 = 10$ МПа до $p_2 = 5$ МПа. Температура окружающей среды $T_0 = 300$ К.

Решение.

$$-\Delta \mathcal{E} = \mathcal{E}_1 - \mathcal{E}_2 = (i_1 - i_2) - T_0 (s_1 - s_2),$$

так как процесс дросселирования протекает при $i = \text{const}$

$$-\Delta \mathcal{E} = -T_0 (s_1 - s_2) = RT_0 \ln (p_1/p_2) = 2,3 \cdot 0,287 \times \times 300 \lg (10/5) = 61,6 \text{ кДж/кг.}$$

11.63. Определить потерю эксергии при дросселировании CO_2 от давления $p_1 = 2,0$ МПа до $p_2 = 1,0$ МПа. Температура окружающей среды $T_0 = 285$ К.

11.64. Определить уменьшение эксергии при переходе 1 кг азота (N_2) из состояния, определяемого давлением $p_1 = 0,7$ МПа и температурой $T_1 = 770$ К, в состояние с параметрами $p_2 = 0,2$ МПа и $T_2 = 320$ К. Температура окружающей среды $T_0 = 283$ К.

$$\text{Решение. } -\Delta \mathcal{E} = (i_1 - i_2) - T_0 (s_1 - s_2) = c_p (T_1 - T_2) - T_0 [c_p \ln (T_1/T_2) - R \ln (p_1/p_2)];$$

$$c_p = 1,065 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{К)}; R = 8,314/28 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{К)};$$

$$-\Delta \mathcal{E} = 1,065 (770 - 320) - 2,3 \cdot 283 [1,065 \lg (770/320)$$

$$- (8,314/28) \lg (0,7/0,2)] = 321 \text{ кДж/кг.}$$

11.65. Определить увеличение энтропии и уменьшение эксергии при смешении 4 кг H_2 и 1 кг CO_2 , находившихся при одинаковых температуре и давлении. Температура окружающей среды $T_0 = 293$ К.

Решение. Суммарная энтропия газов до смешения

$$s' = \sum_i g_i [c_{pi} \ln (T/T_0) - R \ln (p_i/p_0) + s_{0i}].$$

Энтропия смеси газов

$$s'' = \sum_i g_i [c_{pi} \ln (T/T_0) - R \ln (p_i/p_0) + s_{0i}],$$

где T_0, p_0 — параметры окружающей среды, принятые за начало отсчета энтропии; T, p — температура и давление газов в смеси; p_i, g_i — парциальное давление и массовая доля газа в смеси.

Необратимое приращение энтропии при смешении

$$\Delta S_{\text{н}} = s'' - s' = \sum_i g_i R_i \ln (p/p_i) = \sum_i g_i R_i \ln (1/r_i);$$

$$r_i = \frac{g_i/\mu_i}{\sum g_i/\mu_i}; R = \frac{8,314}{\mu};$$

$$\Delta S_{\text{н}} = \sum_i g_i R_i \ln \frac{\sum g_i/\mu_i}{g_i/\mu_i} = 2,3 \cdot 8,314 \sum \frac{g_i}{\mu_i} \lg \frac{\sum g_i/\mu_i}{g_i/\mu_i};$$

$$g_{\text{H}_2} = 4/5 = 0,8; g_{\text{CO}_2} = 1/5 = 0,2;$$

$$\Delta S_{\text{н}} = 2,3 \cdot 8,314 \left(\frac{0,8}{3} \lg \frac{0,8/2 + 0,2/44}{0,8/2} + \right. \\ \left. + \frac{0,2}{44} \lg \frac{0,8/2 + 0,2/44}{0,2/44} \right) = 0,598 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{К)}.$$

Уменьшение эксергии

$$-\Delta \mathcal{E} = \Pi = T_0 \Delta S_{\text{н}} = 293 \cdot 0,598 = 175 \text{ кДж/кг.}$$

11.66. 1 кмоль N_2 и 1 кмоль CO_2 , находившиеся при $T = 500$ К и $p = 0,2$ МПа, смешаны при этих условиях. Определить уменьшение эксергии при смешении. Температура окружающей среды $T_0 = 293$ К.

11.67. В регенеративном воздухоподогревателе ГТУ воздух нагревается от $T'_2 = 425$ К, а выхлопные газы охлаждаются от $T'_1 = 650$ К до $T''_1 = 500$ К. Полагая, что газ обладает свойствами воздуха, а температура окружающей среды $T = 290$ К, и пренебрегая потерями, определить: уменьшение эксергии газов; увеличение эксергии воздуха;

эксергетический к. п. д. воздухоподогревателя. Теплоемкость воздуха принять $c_p = 1,005 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{К)}$.

Решение. Температура воздуха определяется из уравнения теплового баланса $T''_b - T'_b = T'_r - T''_r$: $T''_b = 650 - 500 + 425 = 575 \text{ К}$.

Уменьшение эксергии газов

$$\begin{aligned} -\Delta \mathcal{E}_r &= (\mathcal{E}_1 - \mathcal{E}_2) = (i_1 - i_2)_r - T_0 (s_1 - s_2)_r = c_p (T'_r - T''_r) - \\ &- T_0 c_p \ln (T'_r / T''_r) = 1,005 (650 - 500) - \\ &- 2,3 \cdot 293 \cdot 1,005 \lg (650/500) = 74,3 \text{ кДж/кг.} \end{aligned}$$

Увеличение эксергии воздуха

$$\begin{aligned} \Delta \mathcal{E}_a &= (i_2 - i_1)_a - T_0 (s_2 - s_1)_a = c_p (T''_b - T'_b) - \\ &- T_0 c_p \ln (T''_b / T'_b) = 1,005 (575 - 425) - 2,3 \cdot 293 \times \\ &\times 1,005 \lg (575/425) = 63,0 \text{ кДж/кг.} \end{aligned}$$

Потеря работоспособности системы

$$\Pi = |\Delta \mathcal{E}_r| - |\Delta \mathcal{E}_a| = 74,3 - 63,0 = 11,3 \text{ кДж/кг.}$$

Эксергетический к. п. д. воздухоподогревателя

$$\eta_{\mathcal{E}} = 1 - \frac{\Pi}{|\Delta \mathcal{E}_r|} = 1 - \frac{11,3}{74,3} = 0,848.$$

11.68. Определить эксергетический к. п. д. регенеративного теплообменника газовой турбины, в котором воздух нагревается от $T'_a = 400 \text{ К}$ до $T = 535 \text{ К}$, а выхлопные газы охлаждаются от $T'_r = 615 \text{ К}$ до $T''_r = 480 \text{ К}$. Для газов и воздуха принять теплоемкость $c_p = 1,005 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{К)}$. Температура окружающей среды $T_0 = 275 \text{ К}$.

11.69. В части высокого давления (ЧВД) паровой турбины К-200-130 пар расширяется адиабатно от начальных параметров $p_1 = 12,75 \text{ МПа}$ и $T_1 = 838 \text{ К}$ до $p_2 = 2,45 \text{ МПа}$ и $T_2 = 613 \text{ К}$. Определить эксергетический к. п. д. ЧВД, пользуясь диаграммами состояния водяного пара. Температура окружающей среды $T_0 = 273 \text{ К}$.

Решение. 1) Нанеся на si -диаграмму точки, соответствующие начальному и конечному состояниям пара, проводим через них прямые $\mathcal{E} = \text{const}$, наклон которых определяется выражением $\text{tg } \alpha = (\partial i / \partial s)_a = T_0$. Затем находим уменьшение эксергии пара ($-\Delta \mathcal{E}$) и произведенную располагаемую работу $l_0 = -\Delta i$ (рис. 11.17, а): $-\Delta \mathcal{E} = 448 \text{ кДж/кг}$; $-\Delta i = 410 \text{ кДж/кг}$.

Эксергетический к. п. д. определяем из выражения

$$\eta_{\mathcal{E}} = l_0 / |\Delta \mathcal{E}| = 410/448 = 0,915.$$

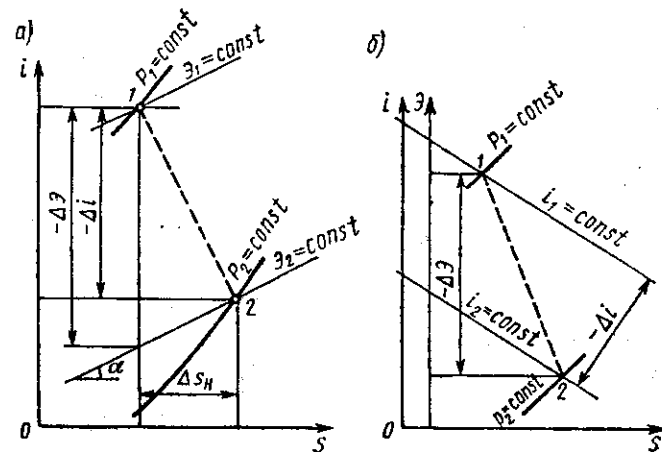


Рис. 11.17

2) С помощью эксергетической $s\mathcal{E}i$ -диаграммы (рис. 11.17, б) соответствующие величины находятся непосредственно: $-\Delta \mathcal{E} = 448 \text{ кДж/кг}$; $-\Delta i = 410 \text{ кДж/кг}$; $\eta_{\mathcal{E}} = 410/448 = 0,915$.

11.70. Определить эксергетический к. п. д. части среднего давления (ЧСД) паровой турбины К-200-130, если пар в ней расширяется адиабатно от $p_1 = 2,05 \text{ МПа}$ и $T_1 = 838 \text{ К}$ до $p_2 = 0,16 \text{ МПа}$ и $T_2 = 508 \text{ К}$.

11.71. В адиабатно изолированных цилиндрах А и Б, разделенных клапаном, находятся одинаковые массы воздуха (рис. 11.18). Давление в цилиндре А $p_{a1} = 1,0 \text{ МПа}$, в цилиндре Б $p_{b1} = 0,1 \text{ МПа}$. Температуры воздуха в цилиндрах равны $T_{a1} = T_{b1} = 400 \text{ К}$. В цилиндре Б имеется поршень, не допускающий теплообмена. После открытия клапана поршень под действием разности давлений начинает перемещаться и сжимать воздух в цилиндре Б до наступления равновесия. Температура окружающей среды $T = 293 \text{ К}$. Требуется определить: давление p_2 , при котором наступает равновесие; температуры воздуха справа и слева от поршня при равновесии; потерю работоспособности и эксергетический к. п. д.

Примечание. Индексом «а» обозначены параметры воздуха слева от поршня, а индексом «б» — соответственно справа.

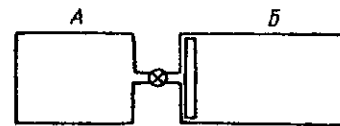


Рис. 11.18

Решение. Равновесное давление находится из уравнения сохранения энергии $U_{a1} + U_{b1} = U_{a2} + U_{b2}$. Подставляя $U = mc_v T$ и $T = pV/(mR)$, имеем

$$p_{a1} V_{a1} + p_{b1} V_{b1} = p_{a2} V_{a2} + p_{b2} V_{b2}.$$

Так как $p_{a2} = p_{b2} = p_2$, а $V_{a2} + V_{b2} = V_{a1} + V_{b1}$, то

$$p_{a1} V_{a1} = mRT_1, \quad p_{b1} V_{b1} = mRT_1, \quad \text{поэтому}$$

$$V_{b1} = V_{a1} (p_{a1}/p_{b1}) = V_{a1} (1/0,1);$$

$$p_2 = \frac{p_{a1} V_{a1} + 10 p_{b1} V_{a1}}{V_{a1} + 10 V_{a1}} = \frac{p_{a1} + 10 p_{b1}}{11} = \frac{1,0 + 10 \cdot 0,1}{11} =$$

$$= 0,182 \text{ МПа.}$$

Температура справа от поршня определяется на основе соотношения между параметрами в адиабатном процессе сжатия

$$T_{b2} = T_{b1} (p_2/p_{b1})^{(k-1)/k} = 400 (0,182/0,1)^{(1,41-1)/1,41} = 473 \text{ К.}$$

Температура слева от поршня находится из уравнения сохранения энергии

$$T_{a2} = T_{a1} + T_{b1} - T_{b2} = 400 + 400 - 473 = 327 \text{ К.}$$

Уменьшение эксергии воздуха слева от поршня

$$\begin{aligned} -\Delta \mathcal{A}_a &= (i_1 - i_2)_a - T_0 (s_1 - s_2)_a = c_p (T_{a1} - T_{a2}) - \\ &- T_0 [c_p \ln (T_{a1}/T_{a2}) - R \ln (p_{a1}/p_2)] = 1,005 (400 - 327) - \\ &- 2,3 \cdot 293 [1,005 \lg (400/327) - 0,287 \lg (1/0,182)] = \\ &= 156,7 \text{ кДж/кг.} \end{aligned}$$

Увеличение эксергии воздуха справа от поршня

$$\begin{aligned} \Delta \mathcal{A}_b &= (i_2 - i_1)_b - T_0 (s_2 - s_1)_b = c_p (T_{b2} - T_{b1}) - \\ &- T_0 [c_p \ln (T_{b2}/T_{b1}) - R \ln (p_2/p_{b1})] = 1,005 (473 - 400) - \\ &- 2,3 \cdot 293 [1,005 \lg (473/400) - 0,287 \lg (0,182/0,1)] = \\ &= 73,4 \text{ кДж/кг.} \end{aligned}$$

Потеря эксергии (работоспособности)

$$\Pi = -\Delta \mathcal{A}_a - \Delta \mathcal{A}_b = 156,7 - 73,4 = 83,3 \text{ кДж/кг.}$$

Эксергетический к. п. д.

$$\eta_{\mathcal{A}} = 1 - \frac{\Pi}{-\Delta \mathcal{A}_a} = 1 - \frac{83,3}{156,7} = 0,47.$$

11.72. В условии предыдущей задачи принять вместо равенства масс воздуха в цилиндрах А и Б равенство объемов в начальном состоянии, т. е. $V_{a1} = V_{b1} = V$, и давление в цилиндре А $p_{a1} = 0,3 \text{ МПа}$. Оставив остальные данные прежними, определить равновесное давление, температуры воздуха слева и справа от поршня при равновесии и эксергетический к. п. д.

ГЛАВА 12

ЦИКЛЫ ХОЛОДИЛЬНЫХ МАШИН

12.1. В идеальной холодильной машине осуществляется равновесный обратный цикл Карно. Сравнить значение холодильного коэффициента такого цикла и затрачиваемую мощность при отводе 200 Вт теплоты в окружающую среду, имеющую температуру $T_0 = 298 \text{ К}$: а) от морозильной камеры бытового холодильника, в которой поддерживается температура $T_{х.к} = 258 \text{ К}$ (-15°C); б) от криостата с жидким азотом, в котором при проведении физического эксперимента должна поддерживаться температура $T_{х.к} = 75 \text{ К}$. Изобразить схемы циклов в sT -диаграмме, соблюдая масштабы, и указать площади, соответствующие холодильным мощностям циклов и затрачиваемым мощностям.

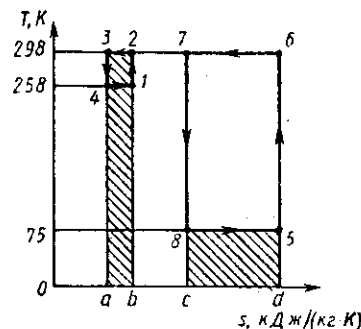


Рис. 12.1

Решение. а) Холодильный коэффициент $\epsilon_k = T_{х.к}/(T_0 - T_{х.к}) = (273 - 15)/(298 - (273 - 15)) = 6,7$. Мощность цикла $|L_n| = Q_0/\epsilon_k = 200/6,7 = 29,9 \text{ Вт}$. Холодильная мощность пропорциональна площади $a41b$ (рис. 12.1), затрачиваемая мощность — площади 1234.

б) Холодильный коэффициент

$$\epsilon_k = 75/(298 - 75) = 0,336.$$

Мощность цикла $|L_n| = 200/0,336 = 595 \text{ Вт}$.

Холодильная мощность пропорциональна площади $c85d$, которая равна площади $a41b$; затрачиваемая мощность пропорциональна площади 5678.

12.2. Для отопления жилого помещения, где поддерживается температура 25°C применяется тепловой насос, работающий по циклу Карно и использующий в качестве источника теплоты атмосферный воздух. Сопоставить электрическую мощность, потребляемую теплонасосной установкой на отопление помещения при температурах наружного воздуха 0°C и -30°C , с электрической мощностью, потребляемой для тех же целей электрическими нагревателями. Тепловые потери помещения принять равными 20 МДж/ч при температуре 0°C и 54 МДж/ч при -30°C .

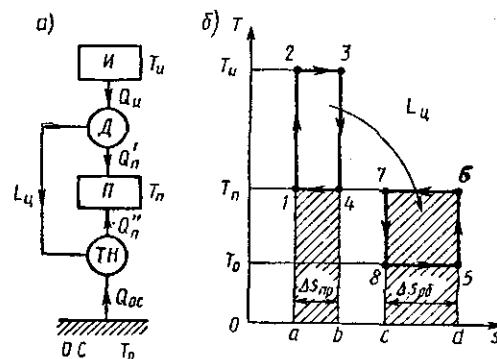


Рис. 12.2

12.3. Теплонасосная установка, которая служит в зимнее время для отопления курортного зала, использует в качестве источника теплоты морскую воду. При этом температура кипения хладагента в испарителе, обогреваемом морской водой с температурой 10°C , равна 0°C ; температура конденсации, при которой теплота передается обогреваемому воздуху, имеющему температуру 25°C , равна 35°C ; мощность привода установки 45 кВт . Определить тепловую мощность установки, если действительное значение отопительного коэффициента составляет $4,2$. Как изменится тепловая мощность установки, если она будет работать по внутреннему обратному циклу Карно при тех же температурных напорах в испарителе и конденсаторе? Как изменится отопительный коэффициент, если устранить внешнюю необратимость в теплообменниках установки, работающей по обратному циклу Карно?

12.4. На рис. 12.2, а показана условная схема понижающего трансформатора теплоты, в котором высокопотенциальная теплота Q_u источника теплоты $И$ при температуре

T_u используется для осуществления прямого цикла Карно в двигателе $Д$; приемником теплоты для этого цикла служит потребитель теплоты низкого потенциала $П$ при температуре T_n . Работа прямого цикла используется в обратном цикле Карно теплового насоса $ТН$ для передачи потребителю $П$ дополнительного количества теплоты Q_o от окружающей среды, имеющей температуру T_o . В результате потребитель получает количество теплоты низкого потенциала $Q_n = Q_n' + Q_o \geq Q_u$. Изобразить схемы прямого и обратного циклов в sT -диаграмме и указать площади, соответствующие затраченному количеству теплоты высокого потенциала и полученному количеству теплоты низкого потенциала. Выразить коэффициент преобразования теплоты $\psi = Q_n/Q_u$ через температуры источника и потребителя теплоты и температуру окружающей среды.

Решение. Схемы циклов показаны на рис. 12.2, б. Затраченное количество теплоты пропорционально площади $a23b$, полученное количество теплоты — сумме площадей $a14b$ и $c76d$. Площади 1234 и 5678 пропорциональные мощностям прямого и обратного циклов, равны между собой:

$$\begin{aligned}\psi &= Q_n/Q_u = (T_n \Delta s_{np} + T_n \Delta s_{об}) / (T_u \Delta s_{np}) = \\ &= \frac{T_n}{T_u} \left(1 + \frac{L_{об}/(T_n - T_o)}{L_{пр}/(T_n - T_o)} \right) = \frac{T_n}{T_u} \frac{T_n - T_o}{T_n - T_o}.\end{aligned}$$

12.5. Повышающий трансформатор теплоты, работающий по циклу Карно, из воды, предварительно подогретой до 104°C , вырабатывает $2,3\text{ кг/с}$ насыщенного пара давлением 2 МПа используя теплоту конденсации насыщенного водяного пара давлением $0,8\text{ МПа}$. Температура окружающей среды 300 К . Определить теоретическую мощность цикла и расход пара низкого давления.

12.6. На рис. 12.3, а показана условная схема расщепительного трансформатора теплоты, который, получая теплоту среднего потенциала при температуре $T_n = 415\text{ К}$, передает потребителю $П1$ тепловой поток высокого потенциала мощностью $Q_{п1} = 40\text{ кВт}$ при температуре $T_{п1} = 520\text{ К}$ и потребителю $П2$ тепловой поток низкого потенциала $Q_{п2} = 2000\text{ кВт}$ при температуре $T_{п2} = 340\text{ К}$. Считая, что в установке осуществляются равновесные прямой и обратный циклы Карно, а температура окружающей среды $T_o = 280\text{ К}$, определить мощности, потребляемые тепловыми насосами $ТН1$ и $ТН2$; тепловые мощности, потребляемые от источника двигателем $Д$ ($Q_{нд}$) и тепловым насосом $ТН1$ ($Q_{нт}$), коэффициенты преобразования теплоты для повышаю-

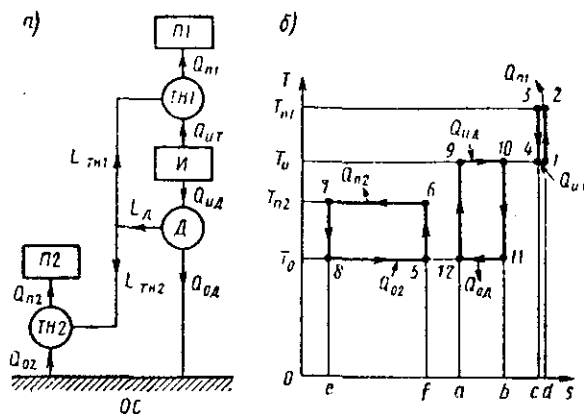


Рис. 12.3

щей и понижающей частей и для всего расщепительного трансформатора в целом. Изобразить, соблюдая масштаб, схемы циклов в координатах s, T и указать площади, соответствующие найденным величинам.

Решение. Мощность, потребляемую тепловым насосом $ТН1$, определим через отопительный коэффициент цикла Карно:

$$|L_{ТН1}| = Q_{П1} / \Phi_{К1} = Q_{П1} (T_{П1} - T_{П2}) / T_{П1} = 40 (520 - 415) / 520 = 8,1 \text{ кВт.}$$

Тепловая мощность, потребляемая тепловым насосом $ТН1$ от источника,

$$Q_{ИТ} = Q_{П2} - |L_{ТН1}| = 40 - 8,1 = 31,9 \text{ кВт.}$$

Мощность теплового насоса $ТН2$:

$$|L_{ТН2}| = Q_{П2} / \Phi_{К2} = Q_{П2} (T_{П2} - T_0) / T_{П2} = 2000 (340 - 280) / 340 = 352,9 \text{ кВт.}$$

Мощность двигателя

$$L_{Д} = |L_{ТН1}| + |L_{ТН2}| = 8,1 + 352,9 = 361 \text{ кВт.}$$

Тепловая мощность, потребляемая двигателем,

$$Q_{ИД} = L_{Д} / \eta_{КД} = 361 \cdot 415 / (415 - 280) = 1110 \text{ кВт.}$$

Коэффициенты преобразования теплоты: для повышающей части

$$\psi_1 = \frac{T_{П1} (T_{И} - T_0)}{T_{И} (T_{П1} - T_0)} = \frac{520 (415 - 280)}{415 (520 - 280)} = 0,705;$$

для понижающей части

$$\psi_2 = \frac{T_{П2} (T_{И} - T_0)}{T_{И} (T_{П2} - T_0)} = \frac{340 (415 - 280)}{415 (340 - 280)} = 1,843;$$

для установки в целом

$$\psi = \frac{Q_{П}}{Q_{И}} = \frac{Q_{П1} + Q_{П2}}{Q_{ИТ} + Q_{ИД}} = \frac{40 + 2000}{31,9 + 1110} = 1,786.$$

Схемы циклов в координатах s, T показаны на рис. 12.3, б. Значениям рассчитанных величин соответствуют площади:

$$|L_{ТН1}| = \text{пл. } 1-2-3-4; |L_{ТН2}| = \text{пл. } 5-6-7-8;$$

$$L_{Д} = \text{пл. } 9-10-11-12; Q_{ИТ} = \text{пл. } a-4-1-b;$$

$$Q_{ИД} = \text{пл. } e-9-10-f; Q_{П1} = \text{пл. } a-3-2-b; Q_{П2} = \text{пл. } c-8-6-d;$$

12.7. На рис. 12.4 показана условная схема расщепительного трансформатора, в которой в отличие от схемы предыдущей задачи двигатель использует в качестве приемника теплоты не окружающую среду, а потребитель низкопотенциальной теплоты. Недостающую до 2000 кВт тепловую мощность этому потребителю доставляет из окружающей среды тепловой насос $ТН2$. Определить для этой схемы величины, указанные в условии задачи 12.6. Имеет ли эта схема какие-либо преимущества по сравнению со схемой задачи 12.6?

12.8. В воздушной холодильной установке (рис. 12.5, а) хладагент (воздух) расширяется в детандере 1 от давления $p_1 = 0,6$ МПа до давления $p_2 = 0,15$ МПа (рис. 12.5, б). Совершаемая при этом работа расширения отдается внешнему потребителю — электрогенератору. Воздух, охлажденный в процессе адиабатного расширения в детандере от температуры T_1 до температуры T_2 , поступает в охлаждаемую емкость 2, из которой необходимо отвести теплоту. Из охлаждаемой емкости воздух подается в компрессор 3, где его давление и температура снова повышают-

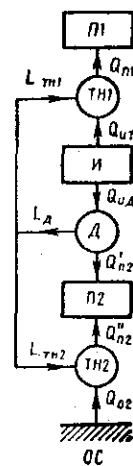


Рис. 12.4

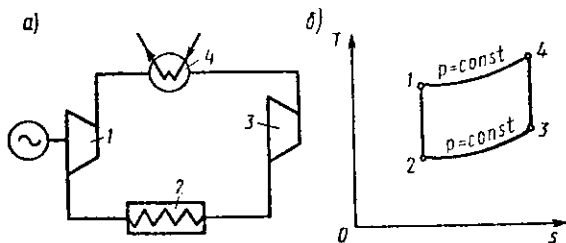


Рис. 12.5

ся от p_3 до p_4 и от T_3 до T_4 соответственно. Определить холодильный коэффициент воздушной холодильной машины, если температура воздуха после сжатия в компрессоре равна 144°C .

12.9. Провести термодинамический расчет цикла Карно воздушной холодильной установки (рис. 12.6). Установка предназначена для поддержания в помещении температуры 20°C при температуре окружающей среды 38°C . Из эксплуатационных соображений давление в воздушных магистралях не должно превышать 500 кПа , а давление воздуха на входе в компрессор 98 кПа . Определить параметры цикла, холодильный коэффициент, холодильную мощность и мощность привода компрессора, если расход воздуха при н. у. составляет $3000\text{ м}^3/\text{ч}$.

12.10. Для воздушной холодильной машины, цикл которой изображен на рис. 12.7, служащей для охлаждения помещения до -5°C , определить удельные значения работы: затраченной на привод компрессора, производимой в детандере и затраченной на охлаждение. Определить также холодильный коэффициент и удельную холодильную мощность.

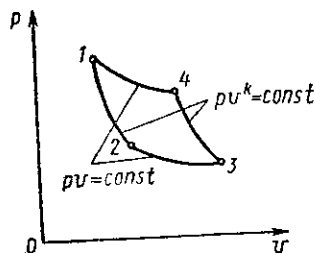


Рис. 12.6

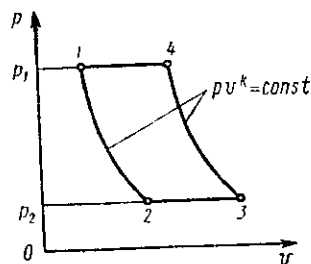


Рис. 12.7

Известно, что сжатие в компрессоре происходит до 300 кПа и расширение в пневматическом двигателе $p_2 = 98\text{ кПа}$. Температура охлаждающей воды равна 20°C . Принять массовую теплоемкость воздуха $c_p = 1,005\text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{K})$ и показатель адиабаты $k = 1,41$.
2.11. Какую массу льда с температурой -5°C можно получить из воды, имеющей температуру 15°C , с помощью воздушной холодильной машины, если поступающий в компрессор воздух при температуре $t_1 = -12^\circ\text{C}$ и давлении $p_1 = 0,1\text{ МПа}$ адиабатно сжимается в нем до давления $p_2 = 0,5\text{ МПа}$? Сжатый воздух охлаждается в холодильной машине до температуры $t_3 = 18^\circ\text{C}$. Холодильная машина расходует $1200\text{ м}^3/\text{ч}$ воздуха (отнесенного к н. у.). Определить холодильный коэффициент и мощность привода компрессора.
Решение. Температура воздуха после сжатия в компрессоре

$$T_2 = T_1 (p_2/p_1)^{(k-1)/k} = 261 (0,5/0,1)^{(1,41-1)/1,41} = 413\text{ К}.$$

Температура воздуха после расширения в детандере

$$T_4 = T_3 (T_1/T_2) = 291/(261/413) = 184\text{ К}.$$

Количество теплоты, которое необходимо отнять у воды для получения 1 кг льда,

$$q = c_w (t_{2в} - t_{1в}) + q_{пл} + c_{л} (t_{1л} - t_{2л}) = 4,187 (15 - 0) + 330,7 + 2,09 [0 - (-5)] = 404,0\text{ кДж/кг}.$$

Холодильная мощность машины

$$Q_0 = c'_p V_w (T_1 - T_4) = 1,298 \cdot 1200 (261 - 184) = 119,9\text{ МДж/ч}.$$

Здесь $c'_p = 1,298\text{ кДж}/(\text{м}^3 \cdot \text{K})$ — объемная теплоемкость воздуха при н. у.

Масса льда, получаемого в 1 ч,

$$M_{л} = Q_0/q = 119,9 \cdot 10^3/404 = 296,8\text{ кг/ч}.$$

Холодильный коэффициент

$$\epsilon = T_1/(T_2 - T_1) = 261/(413 - 261) = 1,72.$$

Мощность привода компрессора

$$N = Q_0/(3600 \epsilon) = 119,9 \cdot 10^3/(3600 \cdot 1,72) = 19,36\text{ кВт}.$$

12.12. Определить расход воздуха и мощность, необходимую для привода компрессора воздушной холодильной машины, если требуется изготовить искусственный лед

толщиной 10 см для катка размером 100×300 м за 5 дней. Известно, что воздушная холодильная машина производит лед при температуре -5°C из воды с температурой 7°C . Воздух засасывается в компрессор при температуре окружающей среды -18°C и давлении 0,0985 МПа и сжимается до 0,6 МПа. Температура воздуха после охлаждения в холодильнике 22°C . При расчетах принять плотность льда 920 кг/м^3 и теплоту плавления льда $330,7 \text{ кДж/кг}$.

12.13. В парокompрессионной холодильной установке (рис. 12.8, а) осуществляется цикл с влажным паром аммиака, изображенный в координатах s, T (рис. 12.8, б). Сжа-

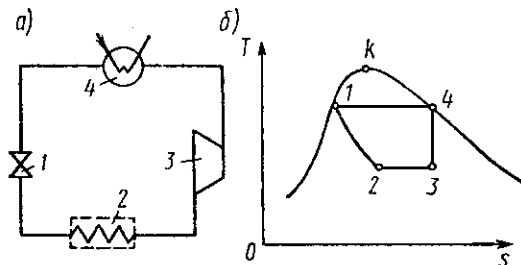


Рис. 12.8

тый в компрессоре 3 до давления p_1 влажный пар поступает в конденсатор 4, где за счет отдачи некоторого количества теплоты охлаждающей воде происходит конденсация пара. Выходящая из конденсатора жидкость в состоянии насыщения направляется в дроссельный вентиль 1, и дросселируется до давления p_2 . Полученный влажный пар с малой степенью сухости в испарителе 2 отбирает от охлаждаемых тел теплоту и превращается в пар высокой степени сухости; далее пар подается в компрессор 3. Определить мощность привода компрессора, если его к. п. д. 75%, а также количество теплоты, отводимое в конденсаторе, и холодильный коэффициент, если температура испарения хладагента -30°C , температура конденсации 25°C и температура охлаждающей воды 10°C . Холодильная мощность установки $Q_0 = 150 \text{ кВт}$. Расчеты провести с использованием таблиц для насыщенного пара аммиака.

12.14. Для компрессионной аммиачной холодильной установки, цикл которой в координатах s, T изображен на рис. 12.9, определить холодильный коэффициент, удельные холодильную мощность и работу, затраченную на сжатие,

необходимую теоретическую мощность привода компрессора, а также расход аммиака и степень его сухости перед испарителем, если холодильная мощность установки $58,3 \text{ кВт}$, давление в испарителе $p_1 = 294 \text{ кПа}$, в конденсаторе $p_2 = 785 \text{ кПа}$. Для решения использовать таблицы насыщенного и перегретого пара аммиака.

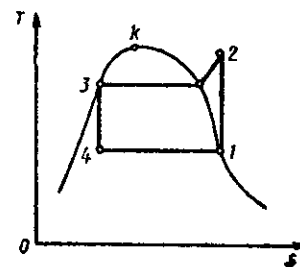


Рис. 12.9

12.15. Как относятся между собой диаметры цилиндров компрессоров двойного действия холодильных установок, использующих в качестве хладагента аммиак, углекислоту и фреон-12, если они имеют одинаковую частоту вращения вала, равную 150 об/мин, отношение хода поршня к диаметру $a = s/d$ и холодильную мощность $Q_0 = 93 \text{ кДж/с}$. Температуры хладагентов на входе в компрессор и на выходе из него принять равными -5°C и 45°C соответственно. Решить, используя sT -диаграмму.

12.16. В парожетторной установке (рис. 12.10, а), цикл которой в координатах s, T изображен на рис. 12.10, б, водяной пар, образовавшийся при расширении воды в редукционном вентиле 1 от давления p_1 до давления p_2 , поступает в испаритель 2, размещенный в охлаждаемом объеме (на этой же диаграмме изображен цикл I-II-III-IV-V, совершаемый в контуре «котел-эжектор-конденсатор-котел», при этом: I-II — процесс повышения давления в насосе; II-III-IV — процесс подвода теплоты в котле по изобаре; IV-V — процесс расширения пара в эжекторе). Из испарителя 2 пар высокой степени сухости при давлении p_2 направляется в камеру парового эжектора, где смешивается

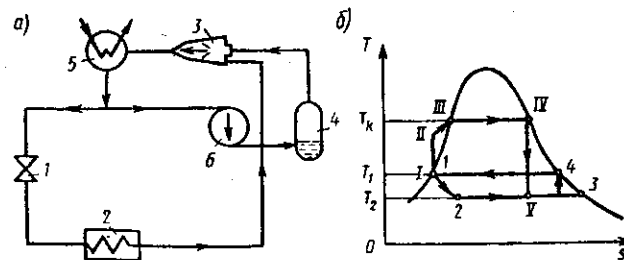


Рис. 12.10

12.17. Абсорбционная холодильная машина использует в качестве хладагента влажный пар аммиака. Жидкий аммиак дросселируется в редукционном вентиле 1 (рис. 12.11) и охлаждается от температуры $t_1 = 15^\circ\text{C}$ до температуры $t_2 = -15^\circ\text{C}$.

Определить холодильную мощность установки, если на работу парогазогенератора затрачивается тепловая мощность 225 кВт, а тепловой коэффициент $\xi = 0,35$. Определить также эксергию греющего теплового потока и эксергетический к. п. д. холодильной машины.

$$Q_0 = Q_{\text{пр}} \xi = 225 \cdot 0,35 = 78,75 \text{ кВт.}$$
$$\partial Q_{\text{nr}} = (1 - T_1/T_5) Q_{\text{nr}} = (1 - 288/312) 225 = 21,4 \text{ кВТ.}$$
$$\partial Q_0 = (T_1/T_2 - 1) Q_0 = (288/258 - 1) 78,75 = 8,8 \text{ кВТ.}$$
$$\eta_9 = \partial Q_0 / \partial Q_{nr} = 8,8 / 21,4 = 0,41.$$

Указание. Задачу решить графически, используя диаграмму $i, \lg p$ для пара аммиака.

164

12.20. В установке для получения сверхнизких температур методом адиабатного размагничивания парамагнитных солей образец из сульфата гадолиния $\text{Gd}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ массой 15 г намагничивается увеличением напряженности магнитного поля от 0 до $0,8 \cdot 10^6$ А/м при постоянной температуре 2 К, после чего изолируется от внешнего теплообмена и полностью размагничивается. Определить изменение энтропии образца при изотермическом намагничивании, отводимое количество теплоты и температуру в конце адиабатного размагничивания.

Решение. Используя основное уравнение термодинамики для терромагнитных систем $du = Tds + HdM$ и уравнение состояния для парамагнетика $M = CH/T$ (закон Кюри), выразим изменение удельной энтропии парамагнетика через изменение температуры и напряженности магнитного поля:

$$ds = c_H dT/T + (\partial M/\partial T)_H dH.$$

Отсюда при изотермическом намагничивании ($T = \text{const}$)

$$\Delta S_T = \int_{H_1}^{H_2} (\partial M/\partial T)_H dH = - \int_{H_1}^{H_2} (CH/T^2) dH = \\ = [C/(2T^2)] (H_1^2 - H_2^2).$$

Для условий задачи имеем: $\Delta S_T = m\Delta s_T = mC (H_1^2 - H_2^2)/(2T^2) = 15 \cdot 10^{-3} \cdot 33,2 \cdot 10^{-11} [-(0,8 \cdot 10^6)^2]/2^2 = -0,797$ Дж.

Отводимое количество теплоты в изотермическом процессе

$$Q_T = T\Delta S_T = -2 \cdot 0,797 = 1,594 \text{ Дж.}$$

Конечная температура адиабатного размагничивания определяется по формуле

$$T_2 = T_1 \sqrt{(A + CH_1^2)/(A + CH_2^2)} = \\ = 2/\sqrt{[7,8 + 33,2 \cdot 10^{-11} (0,8 \cdot 10^6)^2]/7,8} = 0,38 \text{ К,}$$

где H_1 и H_2 — начальная и конечная напряженности магнитного поля. Использованы значения константы Кюри $C = 33,2 \cdot 10^{-11}$ Дж · К/[кг А/м²] и постоянной в формуле теплоемкости $A = 7,8$ Дж · К/кг [10].

12.21. Найти, как изменяется теплоемкость c_H сульфата гадолиния при постоянном магнитном поле в ходе изотермического намагничивания и при последующем адиабатном размагничивании, используя данные задачи 12.20.

Решение. Зависимость теплоемкости c_H от температуры и напряженности магнитного поля выражается формулой

$$c_H = (A + CH^2)/T^2.$$

Используя значения C и A , приведенные в решении предыдущей задачи, получим: в начале намагничивания $T = 2$ К, $H = 0$, $c_H = 7,8/2^2 = 1,95$ Дж/(кг · К); в конце намагничивания $T = 2$ К, $H = 0,8 \cdot 10^6$ А/м, $c_H = [7,8 + 33,2 \cdot 10^{-11} (0,8 \cdot 10^6)^2]/2^2 = 35,9$ Дж/(кг · К); в конце адиабатного размагничивания $T = 0,38$ К, $H = 0$, $c_H = 7,8/0,38^2 = 54$ Дж/(кг · К).

12.22. Для условий задачи 12.20 найти значения дифференциального магнитокалорического эффекта сульфата гадолиния в начале и в конце адиабатного размагничивания.

Решение. Магнитокалорический эффект характеризуется понижением температуры при размагничивании и выражается формулой

$$\alpha_M = (\partial T/\partial H)_S = CHT/(A + CH^2).$$

В начале процесса

$$\alpha_M = 33,2 \cdot 10^{-11} \cdot 0,8 \cdot 10^6 \cdot 2/[7,8 + 33,2 \cdot 10^{-11} \times \\ \times (0,8 \cdot 10^6)^2] = 3,8 \cdot 10^{-6} \text{ К/(А · м)}.$$

В конце процесса $H \rightarrow 0$ и $\alpha_M \rightarrow 0$.

12.23. До какой температуры следует предварительно охлаждать образец из хромокалиевых квасцов $\text{Cr}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot \text{K}_2\text{SO}_4 \cdot 24\text{H}_2\text{O}$, чтобы при его адиабатном размагничивании получить температуру 0,02 К, если установка позволяет создавать магнитное поле напряженностью 2 МА/м? Принять $C = 5,85 \cdot 10^{-11}$ Дж · К/[кг (А/м²)], $A = 0,300$ Дж · К/кг.

Решение.

$$T_1 = T_2 \sqrt{1 + CH_1^2/A} = \\ = 0,02 \sqrt{1 + 5,85 \cdot 10^{-11} (2 \cdot 10^6)^2/0,3} = 0,56 \text{ К.}$$

12.24. Сравнить конечную температуру образцов из сульфата гадолиния и церий-магниевого нитрата (ЦМН) $2\text{Ce}(\text{NO}_3)_3 \cdot 3\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 24\text{H}_2\text{O}$ при их адиабатном размагничивании от начальной напряженности магнитного поля 10^6 А/м и температуры 1 К. Для ЦМН

$C = 0,66 \cdot 10^{-11}$ Дж · К/[кг (А/м²)], $A = 66,7 \cdot 10^{-6}$ Дж · К/кг.

Решение. Для сульфата гадолиния

$$T_2 = T_1 / \sqrt{1 + CH_1^2/A} = 1 / \sqrt{1 + 33,2 \cdot 10^{-11} (10^6)^2 / 7,8} = 0,15 \text{ К};$$

$$\text{для ЦМН } T_2 = 1 / \sqrt{1 + 0,66 \cdot 10^{-11} (10^6)^2 / (66,7 \cdot 10^{-6})} = 0,003 \text{ К}.$$

Применение ЦМН позволяет получить значительно более глубокое охлаждение.

ГЛАВА 13

ТЕРМОДИНАМИКА БЕЗМАШИННОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ЭНЕРГИИ

13.1. Определить объемный состав плазмы в камере плазменного двигателя, если рабочим телом является гелий He, давление в камере $p_k = 0,01 \text{ МПа}$, а температура $T_k = 12 \cdot 10^3 \text{ К}$. Потенциал ионизации гелия $E_i = 24,5 \text{ В}$.

Решение. При решении задачи используем константу равновесия реакции ионизации $K_p = p_{\text{He}^+} p_e / p_{\text{He}}$, уравнение электронейтральности плазмы $p_e = p_{\text{He}^+}$ и закон Дальтона $p_k = p_{\text{He}^+} + p_{\text{He}} + p_e$. Для нахождения константы равновесия воспользуемся уравнением Саха—Эггера

$$\lg K_p = -\frac{5040}{T} E_i + \frac{5}{2} \lg T - 4,62 = -\frac{5040}{12 \cdot 10^3} 24,5 + \frac{5}{2} \lg (12 \cdot 10^3) - 4,62 = -4,72 \text{ и } K_p = 1,91 \cdot 10^{-5}.$$

По уравнению закона Дальтона с использованием условий $p_e = p_{\text{He}^+}$ и $p_{\text{He}} = p_{\text{He}^+} p_e / K_p = p_e^2 / K_p$

$$p_k = p_{\text{He}} + p_{\text{He}^+} + p_e = 2p_e + p_{\text{He}} = 2p_e + p_e^2 / K_p.$$

Решая полученное квадратное уравнение $p_e^2 + 2p_e K_p - K_p p_k = 0$, имеем $p_{e1,2} = -K_p \pm \sqrt{K_p^2 + p_k K_p}$; второй корень уравнения отбрасываем, как не имеющий физического смысла, тогда $p_e = -K_p + \sqrt{K_p^2 + p_k K_p} = -1,91 \cdot 10^{-5} + \sqrt{(1,91 \cdot 10^{-5})^2 + 0,01 \cdot 1,91 \cdot 10^{-5}} = 1,59 \cdot 10^{-5} \text{ МПа}$; $p_{\text{He}^+} = p_e = 1,59 \cdot 10^{-5} \text{ МПа}$.

Используя закон Дальтона, находим

$$p_{\text{He}} = p_k - p_{\text{He}^+} - p_e = 0,01 - 2 \cdot 1,59 \cdot 10^{-5} = 9968,2 \cdot 10^{-6} \text{ МПа}.$$

Зная парциальные давления отдельных компонентов, определяем объемный состав плазмы:

$$r_e = r_{\text{He}^+} = p_e / p_k = 1,59 \cdot 10^{-5} / 0,01 = 1,59 \cdot 10^{-3};$$

$$r_{\text{He}} = p_{\text{He}} / p_k = 9968,2 \cdot 10^{-6} / 0,01 = 0,99682.$$

13.2. Найти температуру, при которой водород превратится в полностью ионизированную водородную плазму, если энергия ионизации водорода $U_i = 13,595 \text{ эВ}$.

13.3. Определить с помощью si -диаграммы (рис. 13.1) скорость истечения аргонной плазмы из сопла Лавала, если давление в камере 1 МПа , температура $90 \cdot 10^3 \text{ К}$, давление на выходе из сопла 10^{-2} МПа .

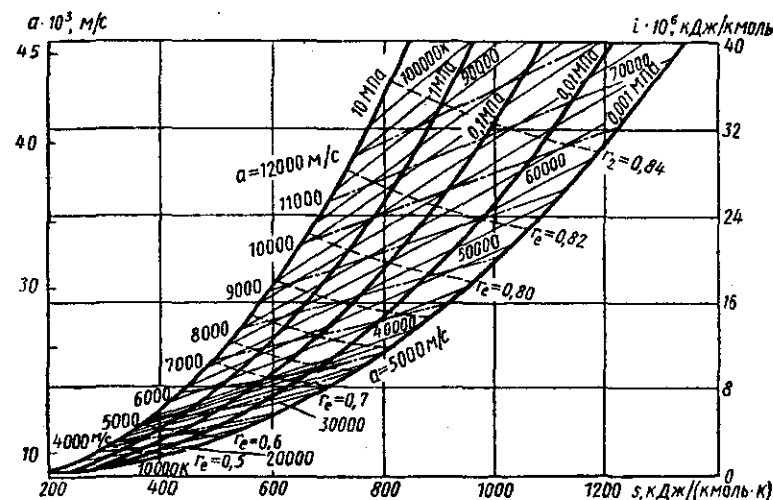


Рис. 13.1

13.4. Определить поправку на радиационное давление толстослойной (т. е. непрозрачной) плазмы при температуре 10^5 К .

13.5. Насколько увеличится энтальпия и энтропия толстослойной плазмы за счет излучения при температуре 10^5 К , если ее объем равен 1 м^3 .

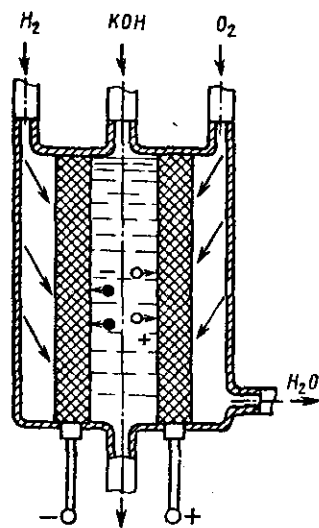


Рис. 13.2

13.6. Определить э. д. с. кислородно-водородного топливного элемента (рис. 13.2) при температуре 298 К и давлении смеси газов 0,1 МПа. При данных условиях работа реакции $A_p = 238 \cdot 10^3$ кДж/кмоль, а тепловой эффект $Q_p = 286 \times 10^3$ кДж/кмоль.

Решение. Для реакции $H_2 + \frac{1}{2} O_2 \rightleftharpoons H_2O$ $A_p = -\Delta G = -238 \cdot 10^3$ кДж/кмоль; $Q_p = -\Delta I = -286 \cdot 10^3$ кДж/кмоль.

Согласно уравнению Гиббса-Гельмгольца $\Delta G = \Delta I + T \times (\partial \Delta G / \partial T)_p$, откуда

$$\begin{aligned} (\partial \Delta G / \partial T)_p &= (\Delta G - \Delta I) / T = \\ &= [-238 \cdot 10^3 - (-286 \cdot 10^3)] / \\ &298 = 161 \text{ кДж} / (\text{кмоль} \cdot \text{К}); \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} (E / \partial T)_p &= -(\partial \Delta G / \partial T)_p / nF = -161 / (2 \cdot 96,5 \cdot 10^3) = \\ &= -834 \cdot 10^{-6} \text{ В/К}; E = -\Delta I / (nF) + T (E / \partial T)_p = \\ &= (286 \cdot 10^3) / (2 \cdot 96,5 \cdot 10^3) - 298 \cdot 834 \cdot 10^{-6} = 1,23 \text{ В}, \end{aligned}$$

где n — число ионов в молекуле; F — постоянная Фарадея.

13.7. Определить коэффициент добротности термоэлектрического генератора из теллурида свинца РвТе, если материал термоэлектрического преобразователя имеет удельное электрическое сопротивление $\rho = 5 \cdot 10^{-5}$ Ом · м, коэффициент термоэлектродвижущей силы (т. э. д. с.) $\alpha = 6 \cdot 10^{-4}$ В/К и теплопроводность $\lambda = 2$ Вт/(м · К).

13.8. Найти предельную плотность тока в межэлектродном зазоре, равном 10 мкм, термоэлектронного генератора при $T = 2500$ К и абсолютном вакууме.

13.9. Для кислородно-водородного топливного элемента определить э. д. с., мощность и коэффициент использования, если известно, что при давлении 0,2 МПа и температуре 600 К он расходует 5 кг H_2 и 5 кг O_2 в сутки. Тепловой эффект реакции $Q_{p298} = 242,17 \cdot 10^3$ кДж/кмоль, молярные теплоемкости компонентов [кДж/(кмоль · К)]: $\mu_{с_{pH_2}} = 27,24 + 3,8 \cdot 10^{-3} T$; $\mu_{с_{pO_2}} = 27,24 + 4,2 \cdot 10^{-3} T$; $\mu_{с_{pH_2O}} = 36,91 - 7,96 \cdot 10^{-3} T + 9,3 \cdot 10^{-6} T^2$, а константа равновесия реакции $K_{p600} = 737,8 \cdot 10^{-22}$.

13.10. Для электротермического движителя (рис. 13.3), работающего на гелии (He) с расходом $0,3 \cdot 10^{-3}$ кг/с при температуре в камере $12 \cdot 10^3$ К, давлении $p_k = 0,01$ МПа и степени расширения 10^3 найти диаметры критического и выходного сечений сопла (потенциал ионизации гелия $E_i = 24,5$ В).

13.11. Определить размеры и массу термоэлектрического генератора из теллурида свинца с электропроводностью $p\text{-} \text{РвТе} + 0,3\% \text{ Na}$; $n\text{-} \text{РвТе} + 0,01\% \text{ РвJ}_2$, мощностью 10 Вт и напряжением $V_{\text{бат}} = 3$ В при $T_1 = 873$ К и $T_2 = 293$ К, если коэффициент теплопередачи

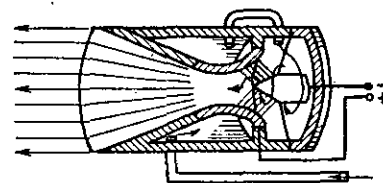


Рис. 13.3

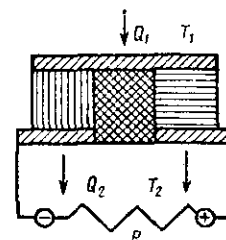


Рис. 13.4

$k = 232,6$ Вт/(м² · К), удельное электрическое сопротивление материала $\rho = 5 \cdot 10^{-5}$ Ом · м, коэффициент т. э. д. с. $\alpha = 6 \cdot 10^{-4}$ В/К, теплопроводность $\lambda = 2$ Вт/(м · К), плотность материала термоэлементов $\rho_m = 8150$ кг/м³ (рис. 13.4).

Решение. Коэффициент добротности термоэлемента, состоящего из двух столбиков,

$$\begin{aligned} a &= \alpha^2 / (2\lambda \cdot 2\rho) = (6 \cdot 10^{-4})^2 / (2 \cdot 2 \cdot 5 \cdot 10^{-5}) = \\ &= 0,9 \cdot 10^{-3} \text{ 1/К}. \end{aligned}$$

Так как оптимальное значение параметра нагрузки $m = R/r = (1,2 \dots 1,4)$, принимаем $m = 1,3$. Термический к. п. д. генератора

$$\begin{aligned} \eta_t &= \eta_{\text{тк}} \frac{m/(m+1)}{1 + (m+1)/(aT_1) - \Delta T/[2T_1(m+1)]} = \frac{580}{873} \times \\ &\times \frac{1,3/(1,3+1)}{1 + (1,3+1)/(0,9 \cdot 10^{-3} \cdot 873) - 580/[2 \cdot 873(1,3+1)]} = 9,91\%. \end{aligned}$$

Теплота, подводимая к горячим спаям, $Q_1 = N/\eta_t = 10/0,0991 = 101$ Вт, а отводимая от холодных — $Q_2 = Q_1 - N = 101 - 10 = 91$ Вт.

Площадь спаев термоэлемента определяется из условий охлаждения

$$f = Q_2 / [k (T_1 - T_2)] = 91 / [232,6 (873 - 293)] = 6,74 \text{ см}^2.$$

Сила тока $j_{\text{бат}} = V_{\text{бат}} / R = E n_{\text{посл}} / (R + r)$, где $n_{\text{посл}}$ — число последовательно включенных элементов, тогда

$$n_{\text{посл}} = V_{\text{бат}} (m + 1) / [\alpha (T_1 - T_2) m] = \\ = 3 (1,3 + 1) / [6 \cdot 10^{-4} (873 - 293) 1,3] \approx 16 \text{ шт.}$$

Внутреннее сопротивление батареи термоэлементов

$$r = R / m = V_{\text{бат}}^2 / (Nm) = 3^2 / (10 \cdot 1,3) = 0,692 \text{ Ом.}$$

Высота термобатареи l определяется из соотношения $r = 2\rho l n_{\text{посл}} / (f_1 n_{\text{пар}})$; с учетом того, что $f = f_1 n_{\text{посл}} n_{\text{пар}}$, получим

$$l = r f / (2\rho n_{\text{посл}}^2) = 0,692 \cdot 6,74 / (2 \cdot 5 \cdot 10^{-3} \cdot 16^2) = \\ = 1,82 \text{ см.}$$

$$\text{Масса батареи } \rho_m f l = 8,15 \cdot 6,74 \cdot 1,82 = 100 \text{ г.}$$

13.12. Определить скорость звука ионизованного воздуха при температуре $T = 10^4 \text{ К}$.

13.13. Сравнить скорость волн Альфвена для ртути и ионизованного воздуха на высоте 100 км.

13.14. Определить дебаевский радиус для плазмы при температуре 10^4 К , если в одном кубическом метре содержится 10^{22} молекул.

13.15. Определить длину свободного пробега молекул воздуха при стандартных условиях и на высоте 100 км ($\mu = 2 \cdot 10^{-5} \text{ Па} \cdot \text{с}$; $\rho = 2 \cdot 10^{-9} \text{ г/см}^3$; $a = 400 \text{ м/с}$).

13.16. Определить напряжение на электродах МГД-генератора, работающего на аргоне А, с присадкой цезия Cs ($r_{\text{Cs}} = 0,002$), в режиме холостого хода, если начальная температура $T_1 = 2500 \text{ К}$, число $M = 0,5$, расстояние между электродами $d = 0,1 \text{ м}$ и магнитная индукция $B = 1 \text{ Тл}$.

13.17. Определить минимально возможную длину МГД-генератора, если начальное давление $p_1 = 0,169 \text{ МПа}$, от-

ношение давлений $p_2/p_1 = 0,6$, скорость течения $w = 465 \text{ м/с}$; магнитная индукция $B = 1 \text{ Тл}$ и электропроводность $\sigma = 190 \text{ 1/(Ом} \cdot \text{м)}$.

13.18. Найти выражение для максимально возможной длины МГД-генератора.

13.19. Как изменится объемная мощность МГД-генератора при увеличении электропроводности рабочего тела в 2 раза? скорости течения плазмы в 2 раза? магнитной индукции в 2 раза?

13.20. Определить расход аргона в МГД-генераторе мощностью 45 кВт, если температура аргона изменяется от $T_1 = 2500 \text{ К}$ до $T_2 = 2000 \text{ К}$.

ГЛАВА 14

ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ

§ 14.1. Теплопроводность при стационарном режиме

14.1. При работе сушильной камеры ее стены толщиной 0,256 м, выполненные из слоя красного кирпича [$\lambda = 0,71 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$] и слоя строительного войлока [$\lambda = 0,047 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$], имели температуру $t_1 = 120^\circ\text{C}$ и $t_2 = 38^\circ\text{C}$ на внутренней и внешней поверхностях соответственно. Увеличение толщины войлока на 0,028 м снизило тепловые потери вдвое и t_2 на 10°C при неизменной t_1 . Определить толщину кирпичного слоя и максимальные температуры войлока в обоих случаях.

14.2. Образец материала для определения λ методом пластины выполнен в форме диска диаметром $d = 0,5 \text{ м}$, толщиной $\delta = 0,03 \text{ м}$ и помещен между холодильником и плоским рабочим электронагревателем (РН) мощностью $Q = 160 \text{ Вт}$. Имеются охранные нагреватели снизу и по кольцу вокруг РН для предотвращения растекания теплоты в нижнем и боковом направлениях. Определить λ с использованием значений температуры поверхностей образца ($^\circ\text{C}$): $t_1 = 10$, $t_2 = 45$ и $t_1' = 25$, $t_2' = 58$, характеризующих два возможных одномерных стационарных поля в образце при отключенном нижнем (охранном) нагревателе, но неизменном значении Q . Температура окружающей среды $t_c = 25^\circ\text{C}$. Термосопротивлением между образцом и РН пренебречь.

Решение. Здесь справедливы соотношения

$$4Q/(\pi d^2) = \lambda(t_2 - t_1)/\delta + (t_2 - t_c)/R = \lambda(t_2' - t_1')/\delta + (t_2' - t_c)/R,$$

где R — термосопротивление между РН и средой. Значит,

$$4 \cdot 160/(\pi 0,5^2) = (45 - 10) \lambda/\delta + (45 - 25)/R = (58 - 25) \times \lambda/\delta + (58 - 25)/R,$$

или

$$814,8 = 35\lambda/\delta + 20/R = 33(\lambda/\delta + 1/R).$$

Это соотношение представляет собой систему из двух уравнений относительно λ/δ и R . Из него следует, что $R = 0,304 \text{ м} \cdot \text{К/Вт}$; $\lambda = 21,33 \cdot 0,03 = 0,64 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$ (асфальт).

14.3. Оценить погрешность расчета λ для асбестового картона [$\lambda_1 = 0,16 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$] и для стали 12Х18Н9Т [$\lambda_2 = 16 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$] по формуле $\lambda \approx \lambda_0 = 4Q\delta/(\pi d^2(t_2 - t_1))$ с использованием значений, характеризующих указанные в задаче 14.2 стационарные поля при отключенном нижнем нагревателе. В обоих случаях минимальную температуру в образце считать равной $t_1 = 25^\circ\text{C}$.

14.4. На внутренней поверхности (площадью 30 м^2) кирпичной стенки толщиной 0,25 м поддерживается температура 18°C ; используется печь, к. п. д. которой 80 %. Установлено, что при одинаковых условиях охлаждения [температура наружного воздуха -25°C , $\alpha = 6,0 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}$] дополнительное применение пробковой изоляции толщиной 0,055 м дает суточную экономию 9,5 кг топлива с низшей теплотворной способностью 20 000 кДж/кг. Определить плотность теплового потока и суточный расход топлива при наличии изоляции, а также значение λ для изоляции; для кирпича $\lambda = 0,71 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$.

14.5. Кипящая вода воспринимает теплоту от дымовых газов через стальную стенку парового котла толщиной 15 мм. Температура газов 900°C , температура воды 200°C , коэффициенты теплоотдачи равны $120 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}$ и $2300 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}$ соответственно; для стали $\lambda = 48 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$. Постепенное отложение сажи [$\lambda_1 = 0,12 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$] и накипи [$\lambda_2 = 1,3 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$] привело к снижению плотности теплового потока q в 2,2 раза и к повышению средней температуры стенки на 58°C по сравнению с первоначальными значениями. Оценить толщины слоев сажи и накипи, вычислить q и коэффициент теплопередачи K .

14.6. При работе судового огнетрубного котла на внутренней поверхности его стального [$\lambda = 48 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$] корпуса толщиной 35 мм поддерживается практически постоянная температура t_b . Коэффициент теплоотдачи к окружающему воздуху пропорционален $(t_n - t_{ж})^{1/3}$, где $t_{ж} = 25^\circ\text{C}$ и t_n — температура воздуха и наружной поверхности теплообмена соответственно. Известно, что после нанесения на корпус слоя совелита [$\lambda = 0,09 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$] толщиной 130 мм t_n понизилась со 195 до 40°C . Определить

t_n и потери теплоты через 1 м^2 площади поверхности корпуса в обоих случаях.

14.7. В пластинчатом воздухоподогревателе через поверхность нагрева площадью 130 м^2 от горячих газов к воздуху передается тепловой поток $3,5 \cdot 10^6 \text{ Вт}$. Толщина стальных $[\lambda = 48 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})]$ листов подогревателя 2 мм, среднее значение их температуры 513 К . Оценить коэффициент теплопередачи, а также средние значения температуры газов и разности между температурами поверхностей листа. Для коэффициентов теплоотдачи использовать формулу $\alpha = 0,96 \omega^{0,8} d^{-0,2} T^{0,274}$, где ω — средняя скорость, м/с; T — температура воздуха (газа), К; d — эквивалентный диаметр канала, м. Принять $\omega^{0,8} d^{-0,2} = 5,0$.

14.8. Змеевики пароперегревателя выполнены из труб диаметром $d_2/d_1 = 40/30 \text{ мм}$; материал труб — сталь $[2X18H9T, \lambda = 22,4 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})]$. Найти максимальную t_m и среднюю \bar{t} (в радиальном сечении) температуры участка трубы, если известно, что температура на расстоянии 2 мм от наружной поверхности составляет $t_0 = 530^\circ \text{C}$, а тепловой поток на единицу длины $q_l = 60 \text{ 100 Вт}/\text{м}$.

Решение. Здесь справедлива формула

$$q_l = 2\pi\lambda (t_m - t_0)/\ln(d_2/d_1).$$

Ее применение дает при $d_0 = 36, t = t_0$:

$$60100 = 2\pi \cdot 22,4 (t_m - 530)/\ln(40/36),$$

откуда $t_m = 575^\circ \text{C}$.

С учетом той же формулы получаем

$$\begin{aligned} \bar{t} &= \frac{\int_{r_1}^{r_2} t r dr}{\int_{r_1}^{r_2} r dr} = t_m + [q_l/(2\pi\lambda)] \left[\int_{r_1}^{r_2} r dr (\ln r - \ln r_2) \right] \times \\ &\times 2/(r_2^2 - r_1^2) = t_m + [q_l/(2\pi\lambda)] \{ [r_2^2 (\ln r_2 - 0,5) - r_1^2 (\ln r_1 - \\ &- 0,5)] / (r_2^2 - r_1^2) - \ln r_2 \} = 575 + [60100/(2\pi \cdot 22,4)] \times \\ &\times \{ [20^2 (\ln 20 - 0,5) - 15^2 (\ln 15 - 0,5)] / (20^2 - 15^2) - \\ &- \ln 20 \} = 519,4^\circ \text{C}. \end{aligned}$$

14.9. В приборе для определения λ жидкостей по методу «нагретой нити» диаметр и длина платиновой нити 0,15 мм и 80 мм соответственно; внутренний и наружный диаметры кварцевой трубки 1 и 3 мм. Вычислить λ и среднюю температуру t масла, заполняющего кольцевой зазор между нитью и трубкой, если при прохождении тока 0,636 А электросопротивление нити равно 6,7 Ом, а температура внешней по-

верхности трубки 35°C . Принять, что для кварца $\lambda_n = 1,63 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$; удельное электросопротивление платины $1,03 \cdot 10^{-7} (1 + 0,0038 t) \text{ Ом} \cdot \text{м}$.

14.10. Определить потери тепловой мощности паропроводом (наружный диаметр 0,1 м, длина 20 м) при движении по нему насыщенного водяного пара давлением 2,8 МПа; температура окружающего воздуха 30°C . Двухслойная изоляция паропровода изготовлена из 79,5 кг ньювеля $[\lambda = 0,082 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К}), \rho = 405 \text{ кг}/\text{м}^3]$ и 605 кг асбозурита $[\lambda = 0,15 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К}), \rho = 700 \text{ кг}/\text{м}^3]$. Установлено, что изменение порядка наложения слоев привело бы к увеличению тепловых потерь на 16%.

14.11. Железобетонная $[\lambda = 1,3 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})]$ дымовая труба диаметром 1,4/0,9 м футерована внутри слоем огнеупора $[\lambda = 0,58 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})]$ толщиной 0,15 м. Замечено, что при постоянстве температуры окружающего воздуха и соответствующего коэффициента теплоотдачи $[\alpha = 14 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})]$ повышение температуры внутри поверхности футеровки ($t_{\text{ф}}$) на 37 К приводит к повышению температуры наружной поверхности трубы (t_r) на 10 К. Определить разность между температурами соприкасающихся поверхностей, обусловленную несовершенством их теплового контакта, когда ($t_{\text{ф}} - t_r$) = 380 К. Оценить относительную погрешность расчета теплового потока через трубу на формуле для плоской стенки с использованием внутреннего диаметра трубы.

14.12. Необходимо уменьшить тепловые потери через стальную $[\lambda_1 = 48 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})]$ трубу диаметром $d_2/d_1 = 29/25 \text{ мм}$, по которой движется насыщенный пар. Целесообразно ли при этом использовать асбозурит $[\lambda_2 = 0,16 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})]$? Установлено, что при увеличении температуры окружающего воздуха на 3 К температура наружной поверхности трубы увеличивается лишь на 0,05 К. Считать, что $\alpha_n \geq 70 \alpha_v$, где α_n и α_v — коэффициенты теплоотдачи от поверхностей трубы к пару и воздуху соответственно.

14.13. Известно, что при работе холодильной установки температура наружной поверхности ее стального $[\lambda = 48 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})]$ трубопровода диаметром 130/115 мм равна 0°C и -3°C при отсутствии и наличии внешней изоляции соответственно. Определить температуру (считая ее неизменной) протекающего по трубе теплоносителя, а также коэффициент теплоотдачи и критический радиус изоляции. Материал изоляции — шерстяной войлок $[\lambda = 0,046 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})]$, ее толщина 5 мм. Температура окру-

жающего воздуха 30 °С, коэффициент его теплоотдачи 12 Вт/(м² · К).

14.14. При работе вращающегося шарообразного варочного котла температура t_2 на внешней поверхности его изоляции составляла 50 °С при первоначальной толщине слоя изоляции $\delta = 0,045$ м, но стала равной 38 °С после удвоения толщины. Определить температуру t_1 на внутренней поверхности (диаметром 1,15 м) изоляции, полагая t_1 неизменной. Определить также λ и критический радиус изоляции. Температуру окружающего воздуха и соответствующий коэффициент теплоотдачи считать равными $t_{ж} = 20$ °С и $\alpha = 1,59 (t_2 - t_{ж})^{1/3}$ Вт/(м² · К).

14.15. При работе печи с обмуровкой, выполненной из шамотного [$\lambda_1 = 0,84 (1 + 0,695 t/1000)$ Вт/(м · К), $\delta_1 = 0,24$ м] и красного [$\lambda_2 = 0,70$ Вт/(м · К)] кирпича, температуры на внутренних поверхностях слоев составляли t_1 и $t_2 = 850$ °С. После замены части слоя красного кирпича (толщиной δ_2) промежуточной засыпкой из диатомовой крошки [$\lambda_2 = 0,113 (1 + 0,002 t)$ Вт/(м · К), $\delta_2 = 0,092$ м] — без изменения t_1 и плотности теплового потока q — получено, что $t_2 = 430$ °С. Определить t_1 , q и уменьшение толщины обмуровки $\Delta\delta$.

Решение. Из условий задачи видно, что по толщине засыпки температура изменяется от $t_2 = 850$ °С до $t_3 = 430$ °С. Поэтому применение формул типа

$$q = \bar{\lambda}_i (t_{i+1} - t_i) / \delta_i; \quad \bar{\lambda}_i = \frac{1}{\delta_i} \int_{t_i}^{t_{i+1}} \lambda_i(t) dt / (t_{i+1} - t_i)$$

справедливо при любом характере зависимости $\lambda(t)$; при $i = 2$, а затем при $i = 1$ получаем значения:

$$\lambda_2 = 0,113 [1 + 0,002 (t_3 + t_2)/2] = 0,113 [1 + 0,002 (430 + 850)/2] = 0,258 \text{ Вт/(м · К)};$$

$$q = \lambda_2 (t_3 - t_2) / \delta_2 = 0,258 (430 - 850) / 0,092 = -1176 \text{ Вт/м}^2;$$

$$\lambda_1 = 0,84 [1 + 0,695 (t_1 + 850) / (2 \cdot 1000)];$$

$$1176 = \lambda_1 (t_1 - 850) / 0,24, \quad t_1 = 1052 \text{ °С};$$

$$\lambda_2 / \delta_2 = \lambda_1 / \delta_1; \quad \delta_2 = 0,092 \cdot 0,70 / 0,258 = 0,25 \text{ м};$$

$$\Delta\delta = \delta_2 - \delta_1 = 0,25 - 0,092 = 0,158 \text{ м}.$$

14.16. Рассчитать минимально возможную толщину стен топочной камеры котла с жидким золоудалением

при использовании огнеупора [$\lambda = 0,279 (1 + 8,33 \cdot 10^{-4} \times t)$ Вт/(м · К)], а также диатомового кирпича [$\lambda = 0,113 (1 + 2,06 \cdot 10^{-4} \times t)$ Вт/(м · К)] с предельной температурой применения 850 °С. Температуру газов, воздуха в котельной и коэффициенты теплоотдачи принять равными 1350 °С, 30 °С, 35 Вт/(м² · К) и 12 Вт/(м² · К) соответственно. Потери в окружающую среду не должны превышать 800 Вт/м².

14.17. Определить значения температуры T_1 и T_2 в среднем сечении статически равновесного слоя воздуха толщиной 0,2 м, используя как зависимость $\lambda_1 = 2,43 \cdot 10^{-4} \times T^{0,82}$ Вт/(м · К), так и приближенную линейную зависимость $\lambda_2(T)$. На границах слоя поддерживаются температуры 300 и 1300 К.

14.18. Для бесконечно длинного кольцевого слоя изоляции диаметром 150/50 мм в стационарном режиме, при плотности теплового потока на наружной поверхности 80 Вт/м² и температуре поверхности 0 или 100 °С, температура другой поверхности оказывается равной 44,7 или 139,4 °С соответственно. Определить λ изоляции, как линейную функцию температуры.

14.19. В производственных условиях тепловые потери трубопроводов определяются с помощью тепломера. Прибор представляет собой резиновую ленту, плотно прижимаемую к наружной поверхности трубопровода; температура наружной и внутренней поверхностей ленты измеряется термометрами. Определить потери теплоты с 1 м длины паропровода диаметром 17/16 см с изоляцией из зонолита [$\lambda = 0,072 (1 + 3,63 \cdot 10^{-3} t)$, Вт/(м · К) толщиной 11 см, если температуры поверхностей резиновой [$\lambda = 0,16$ Вт/(м · К)] ленты толщиной 3 мм равны 55 и 51,5 °С. Определить также температуры на внутренней поверхности изоляции и в ее среднем сечении.

14.20. Электропровод заключен в цементную [$\lambda = 0,159 \ln t$, Вт/(м · К)] трубу. При условии, что на наружной поверхности трубы (диаметром 25 мм) плотность теплового потока $q = 7210$ Вт/м² и температура $t_n = A$, перепад температур по толщине трубы составляет $\Delta t = 90$ °С. При том же значении q , но при $t_n = (-40,5 \text{ °С} + A)$ получено, что $\Delta t = 100,5$ °С. Определить A и толщину трубы.

14.21. Температуры цилиндрического уранового [$\lambda = 33$ Вт/(м · К)] стержня — максимальная и на его поверхности — из прочностных соображений не должны превышать 1100 и 650 °С соответственно. Определить максимально возможный при этом диаметр и соответствующий пе-

репад температур в стержне, полагая, что средняя температура теплоносителя равна 370°C , коэффициент теплоотдачи — $6500 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{K})$ и объемное тепловыделение в стержне — $8 \cdot 10^7 \text{ Вт}/\text{м}^3$.

14.22. Установлено, что тепловой поток, передаваемый от горячих газов с температурой 450°C к внешней поверхности круглой ребристой чугунной [$\lambda = 48 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{K})$] трубы водяного экономайзера, равен $85\,200 \text{ Вт}$; при этом температура у основания ребер $t_0 = 190^\circ\text{C}$. Длина обогреваемой части трубы равна $3,5 \text{ м}$, количество ребер — 180 , их наружный и внутренний диаметры — 80 и 215 мм , толщина — 5 мм . Определить коэффициент эффективности обребрения и максимальную температуру ребер, считая коэффициент теплоотдачи одинаковым для всей поверхности.

14.23. Определить стационарную фоновую температуру в центре и на периферии нагретой зоны микромодульного блока, рассеивающего 16 Вт . Нагретую зону можно рассматривать как шар радиусом 70 мм , отделенный воздушным зазором (толщиной 10 мм) от дюралюминиевого [$\lambda = 170 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{K})$] кожуха толщиной 1 мм . Эффективные теплопроводности воздуха (в зазоре) и материала нагретой зоны равны $0,08$ и $0,16 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{K})$ соответственно; температура окружающего воздуха 20°C , коэффициент теплоотдачи $20 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{K})$. Известно, что фоновая температура характеризует суммарное влияние источников энергии и практически не зависит от их конфигурации и особенностей расположения.

14.24. Блок аппаратуры кольцевым фланцем в своей центральной части крепится к шпангоуту отсека летательного аппарата. В тепловых расчетах блок можно рассматривать как пустотелый цилиндр [из алюминиевого сплава с $\lambda_0 = 84 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{K})$] длиной $2l = 1,5 \text{ м}$ и наружным диаметром $d = 0,5 \text{ м}$ при толщине корпуса $\delta_0 = 0,025 \text{ м}$. При наземной эксплуатации блока его температура должна быть не ниже 10°C , а температурная неравномерность в нем — не более 15°C . Поэтому предусмотрен кольцевой нагреватель (по всей длине блока), отделяемый от обшивки слоем изоляции из стекловаты [$\lambda = 0,05 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{K})$] толщиной 80 мм . Испытания показали, что при температуре обшивки и шпангоута $t_2 = -50^\circ\text{C}$ температура нагревателя $t_1 = 30^\circ\text{C}$, а по длине блока изменяется от $t_0 = -18^\circ\text{C}$ до $t_l = 12^\circ\text{C}$. Оценить термосопротивление R между блоком и шпангоутом, а также коэффициент теплоотдачи α_1 между блоком и нагревателем, пренебрегая теплообменом на торцах блока.

Решение. Используя формулы для прямого стержня (ребра) прямоугольного профиля, имеем:

$$b = (t_1 - t_0)/(t_1 - t_l) = \text{ch}(ml); \quad m = \sqrt{\alpha_1/(\lambda_0 \delta_0)};$$

$$(t_0 - t_2)/R = \alpha_1 \pi d m^{-1} (t_1 - t_0) \text{th}(ml).$$

На основе этих соотношений последовательно получаем:

$$b = (t_1 - t_0)/(t_1 - t_l) = (30 + 18)/(30 - 12) = 2,667;$$

$$\alpha_1 = \lambda_0 \delta_0 t^{-2} \ln^2(b + \sqrt{b^2 - 1}) = 84 \cdot 0,025 \cdot 0,75^{-2} \times \\ \times \ln^2(2,667 + \sqrt{2,667^2 - 1}) = 10,0 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{K});$$

$$m = \sqrt{\alpha_1/(\lambda_0 \delta_0)} = \sqrt{10,0/(84 \cdot 0,025)} = 2,182;$$

$$R = m(t_0 - t_2)/[(t_1 - t_0) \alpha_1 \pi d \text{th}(ml)] = 2,182(-18 + \\ + 50)/[(30 + 18) 10,0 \pi 0,5 \text{th}(2,182 \cdot 0,75)] = 0,10 \text{ К}/\text{Вт}.$$

14.25. Определить толщину кольца из текстолита [$\lambda = 0,26 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{K})$], плотно закрепляемого на фланце по всей поверхности контакта (площадью $0,044 \text{ м}^2$) со шпангоутом, минимально необходимую для удовлетворения указанных в задаче 14.24 требований к блоку при тех же t_1 , t_2 , R , α_1 . Оценить соответствующую мощность нагревателя (общей длиной $1,5 \text{ м}$), пренебрегая его термосопротивлением, а также теплообменом на торцах изоляции и тепловым потоком от изоляции к шпангоуту ($\alpha_2 = 0$).

14.26. Выявить характер изменения плотности q тепловыделения по длине нагревателя ($0 < x < l$), обеспечивающий указанный в задаче 14.25 тепловой режим, при прежних допущениях, но с учетом теплового потока Q_2 от изоляции к шпангоуту [$\alpha_2 = 20 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{K})$]. Определить Q_2 и мощность нагревателя Q .

14.27. Оценить погрешность расчета λ для стали 12Х18Н9Т по формуле $\lambda_s = 4Q\delta/[\pi d^2(t_2 - t_1)]$ с использованием в качестве t_2 значения температуры, полученного в центре нагреваемой поверхности образца с $\delta = d = 128 \text{ мм}$ (на установке описанного в задачах 14.2 и 14.3 типа) при $4Q/(\pi d^2) = 800 \text{ Вт}/\text{м}^2$, $t_c = t_1$ и при функционировании охранных нагревателей. Найти также тепловой поток с боковой поверхности образца, полагая коэффициент теплоотдачи равным $5 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{K})$.

§ 14.2 Теплопроводность при нестационарном режиме

14.28. Стальная плита неограниченной протяженности толщиной 200 мм, равномерно прогретая до температуры $t_0 = 250^\circ\text{C}$, помещена в воздушную среду с температурой $t_{\text{ж}} = 15^\circ\text{C}$; коэффициент теплоотдачи на поверхностях плиты α равен $30 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$, теплопроводность материала плиты $\lambda = 45 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$, коэффициент температуропроводности $a = 1,25 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$.

Определить температуры в середине и на поверхности плиты через 1 ч после начала охлаждения.

Решение. Для заданных условий рассчитываем определяющие критерии:

$$Bi = \alpha \delta / \lambda = 30 \cdot 0,1 / 45 = 0,07;$$

$$Fo = a\tau / \delta^2 = 1,25 \cdot 10^{-5} \cdot 3600 / 0,1^2 = 4,5.$$

С помощью номограмм (рис. 14.1, 14.2) находим значения безразмерных температур в середине плиты и на ее поверхности: $\theta_{x=0} = 0,75$; $\theta_{x=\delta} = 0,71$; после чего определяем температуры

$$t_{x=0} = \theta_{x=0} (t_0 - t_{\text{ж}}) + t_{\text{ж}} = 0,75 (250 - 15) + 15 = 191^\circ\text{C};$$

$$t_{x=\delta} = \theta_{x=\delta} (t_0 - t_{\text{ж}}) + t_{\text{ж}} = 0,71 (250 - 15) + 15 = 182^\circ\text{C}.$$

14.29. Для условий задачи 14.28 определить температуру на расстоянии 50 мм от середины плиты.

Решение. Безразмерная температура в плоской стенке определяется уравнением

$$\theta = \sum_{i=1}^{\infty} \frac{2 \sin n_i}{n_i + \sin n_i \cos n_i} \cos \left(n_i \frac{x}{\delta} \right) \exp(-n_i^2 Fo);$$

так как $Fo = 4,5 \gg 0,3$, то при решении можно ограничиться первым членом ряда:

$$\theta = \frac{2 \sin n_1}{n_1 + \sin n_1 \cos n_1} \cos \left(n_1 \frac{x}{\delta} \right) \exp(-n_1^2 Fo).$$

Значения $N_1 = 2 \sin n_1 / (n_1 + \sin n_1 \cos n_1)$ и n_1 в зависимости от критерия Bi приведены в табл. 14.1

* Теплофизические свойства материалов берутся из таблиц Приложения; см. также [20, 11]

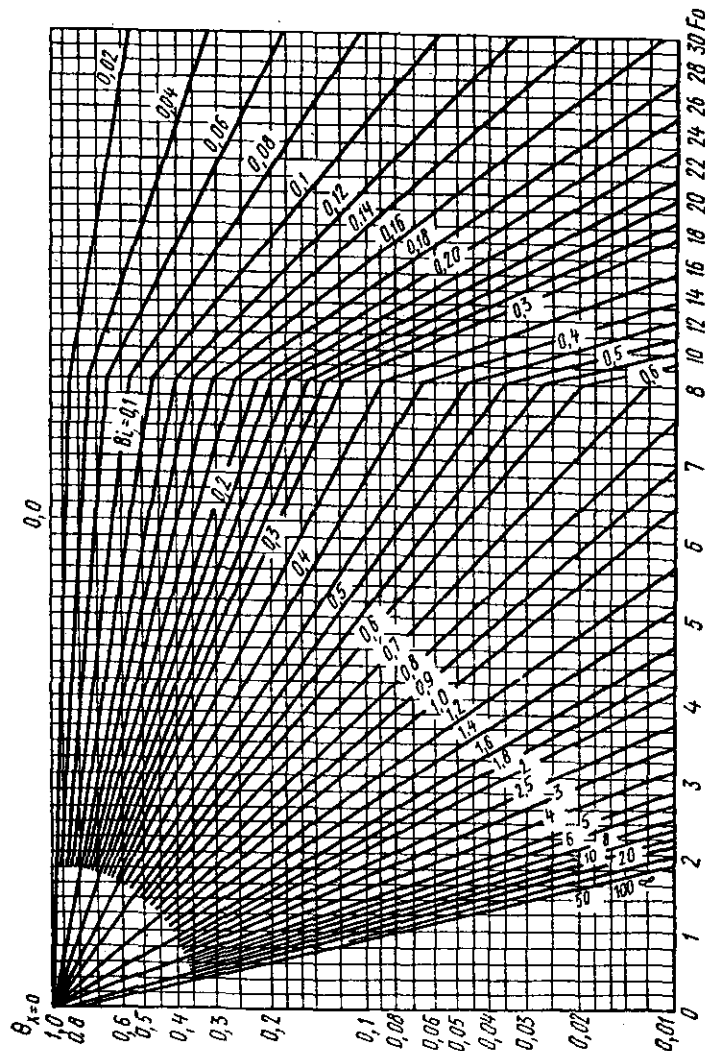


Рис. 14.1

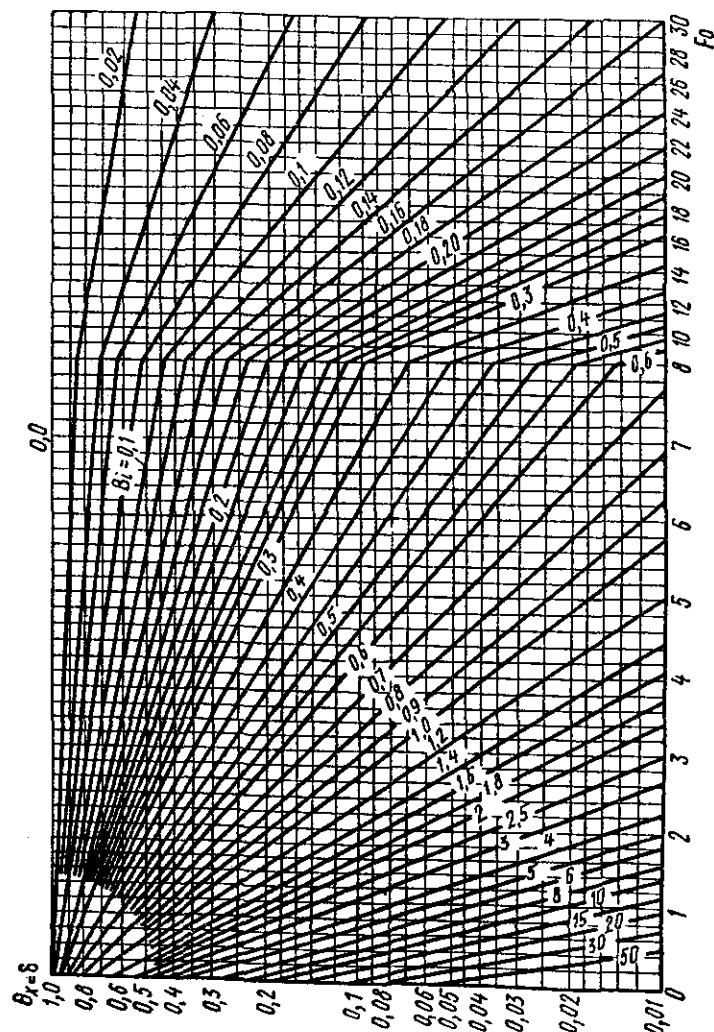


Рис. 14.2

Bi	n_1	N_1	Bi	n_1	N_1	Bi	n_1	N_1
0,00	0,000	1,000	0,55	0,68	1,076	6,0	1,350	1,248
0,01	0,099	1,002	0,60	0,71	1,081	7,0	1,380	1,254
0,02	0,141	1,003	0,70	0,75	1,092	8,0	1,398	1,257
0,04	0,199	1,006	0,80	0,79	1,102	9,0	1,415	1,260
0,06	0,243	0,010	0,90	0,83	1,111	10	1,429	1,262
0,08	0,279	1,013	1,00	0,86	1,119	12	1,442	1,265
0,1	0,31	0,016	1,20	0,92	1,134	14	1,456	1,267
0,12	0,34	0,020	1,40	0,965	1,148	16	1,470	1,268
0,14	0,37	0,023	1,60	1,00	1,159	18	1,483	1,269
0,16	0,39	1,026	1,80	1,044	1,169	20	1,496	1,270
0,18	0,41	1,029	2,00	1,077	1,179	25	1,507	1,271
0,20	0,43	1,031	2,2	1,105	1,186	30	1,520	1,271
0,24	0,47	1,037	2,6	1,154	1,200	40	1,530	1,272
0,28	0,51	1,042	3,0	1,193	1,210	60	1,545	1,273
0,30	0,52	1,045	3,5	1,233	1,221	70	1,549	1,273
0,35	0,56	1,052	4,0	1,265	1,229	80	1,551	1,273
0,40	0,59	1,058	4,5	1,288	1,235	90	1,552	1,273
0,45	0,62	1,064	5,0	1,314	1,240	100	1,556	1,273
0,50	0,65	1,070	5,5	1,334	1,244	∞	1,570	1,273

Из табл. 14.1 находим $n_1 = 0,26$; $N_1 = 1,012$:

$$\theta_{x=0,05} = 1,012 \cos \left(0,26 \frac{0,05}{0,1} \right) \exp(-0,26^2 \cdot 4,5) = 0,74;$$

$$t_{x=0,05} = \theta_{x=0,05} (t_0 - t_{ж}) + t_{ж} = 0,74 (250 - 15) + 15 = 189^\circ \text{C}.$$

14.30. Лист толщиной 20 мм, изготовленный из электроизоляционного материала, помещен в нагревательную печь температура воздуха в которой равна 450°C , коэффициент теплоотдачи к поверхности листа $\alpha = 40 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}$. Определить время прогрева листа до температуры 200°C , если его начальная температура равнялась 20°C . Теплопроводность материала $\lambda = 0,174 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$, коэффициент температуропроводности $a = 5,8 \cdot 10^{-8} \text{ м}^2/\text{с}$. Указание. Считать лист пластиной неограниченной протяженности. Временем прогрева считать момент достижения заданной температуры в середине пластины.

14.31. Для условий задачи 14.30 определить значение коэффициента теплоотдачи на поверхности листа, если температура этой поверхности достигла 250°C через 0,5 ч

14.32. Резиновый лист толщиной 40 мм, нагретый до температуры 150°C , помещен в воздушную среду с темпе-

ратурой 15 °С. Определить температуры на поверхности и в середине листа через 30 мин после начала охлаждения. Теплопроводность резины $\lambda = 0,17 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$, коэффициент температуропроводности $a = 8,3 \cdot 10^{-8} \text{ м}^2/\text{с}$, коэффициент теплоотдачи от поверхности пластины к окружающему воздуху $\alpha = 27 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}$.

14.33. Для условий задачи 14.32 определить время, необходимое для того, чтобы температура в середине пластины достигла 25 °С.

14.34. Для условий задачи 14.32 определить температуру на расстоянии 5 мм от середины пластины.

14.35. Определить время охлаждения листа стали толщиной 10 мм от начальной температуры 600 °С до температуры, отличающейся от температуры окружающей среды на один градус (температура среды $t_{\text{ж}} = 20 \text{ °С}$). Теплофизические характеристики стали: $\lambda = 45 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$; $c = 0,46 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{К)}$; $\rho = 7900 \text{ кг/м}^3$. Коэффициент теплоотдачи от поверхности листа к окружающему воздуху $\alpha = 35 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}$.

Указание. Значение критерия Био для рассматриваемых условий: $Bi = \alpha \delta / \lambda = 35 \cdot 0,005 / 45 = 0,0039$. Так как $Bi < 0,01$, то температуру по сечению пластины можно считать постоянной и учитывать ее зависимость только от времени. Для $Bi < 0,01$ справедлива формула: $\theta = \exp(-Bi Fo)$.

14.36. Плита толщиной 300 мм имеет температуру 150 °С. С момента начала охлаждения плита с одной из сторон омывается воздухом с температурой $t_{\text{ж}} = 20 \text{ °С}$. Коэффициент теплоотдачи $\alpha = 30 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}$. Определить количество теплоты, теряемое площадью 1 м² поверхности плиты за первый час охлаждения, а также температуру поверхности плиты к этому моменту времени. Теплопроводность материала плиты $\lambda = 0,4 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$; коэффициент температуропроводности $a = 3 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$.

Указание. Теплообменом с другой стороны плиты пренебречь.

14.37. Неохлаждаемая часть сопла ракетного двигателя изготовлена из легированной стали толщиной 2 мм. Физические характеристики материала: $\lambda = 17 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$; $c = 0,5 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{К)}$; $\rho = 7900 \text{ кг/м}^3$. Найти закон изменения температуры стенки сопла во времени и определить температуры на внешней и внутренней поверхностях стенки через 5,5 с после начала работы двигателя. Адиабатная температура стенки со стороны газов 2800 К. Начальная

температура стенки сопла 0 °С, коэффициент теплоотдачи от газов к стенке 500 Вт/(м² · К). Лучистым теплообменом между газом и стенкой пренебречь. Диаметр сопла $d \gg \delta$.

14.38. До какой температуры нагреется внутренняя поверхность графитового вкладыша сопла двигателя за 7 с, если считать стенку вкладыша плоской стенкой неограниченной протяженности толщиной 20 мм, а температурное поле — одномерным? Адиабатная температура стенки сопла 2500 °С, коэффициент теплоотдачи от газов к стенке $\alpha = 3500 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}$, начальная температура вкладыша 20 °С. Теплоотдачей с внешней стороны вкладыша и лучистым теплообменом пренебречь. Теплофизические характеристики графита: $\lambda = 147 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$; $a = 110 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$.

14.39. Определить, какую минимальную толщину должна иметь стенка дозвукового сопла, для того чтобы за 6 с работы двигателя температура поверхности, омываемой газами с температурой 2250 °С, не превысила допустимого значения 1250 К. Коэффициент теплоотдачи от газов к стенке $\alpha = 870 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}$; теплофизические характеристики материала: $\lambda = 35 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$; $a = 1,4 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$; начальная температура сопла 300 К.

Указание. Стенку рассматривать как плоскую неограниченную пластину, отводом теплоты с наружной поверхности сопла пренебречь.

14.40. Длинный стальной вал диаметром 200 мм, имевший начальную температуру 15 °С, помещен в печь с температурой 1100 °С. Определить время нагрева вала, считая процесс законченным при температуре оси вала 850 °С. Определить также температуру на поверхности вала в конце нагрева. Коэффициент теплоотдачи на поверхности вала $\alpha = 120 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}$; теплопроводность $\lambda = 18 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$; коэффициент температуропроводности $a = 6,12 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$.

Указание. Для решения задачи воспользоваться номограммами, приведенными на рис 14.3, 14.4.

14.41. По условиям предыдущей задачи определить коэффициент теплоотдачи, если после 1 ч нагрева температура на оси вала достигла 850 °С. Определить также температуру на поверхности цилиндра в этот момент времени.

14.42. Для условий задачи 14.40 определить температуру на расстоянии $r = 0,5r_0$ от оси вала через 30 мин после начала нагрева.

Р е ш е н и е. Безразмерная температура длинного цилиндра при нагреве (охлаждении) в среде с постоянной тем-

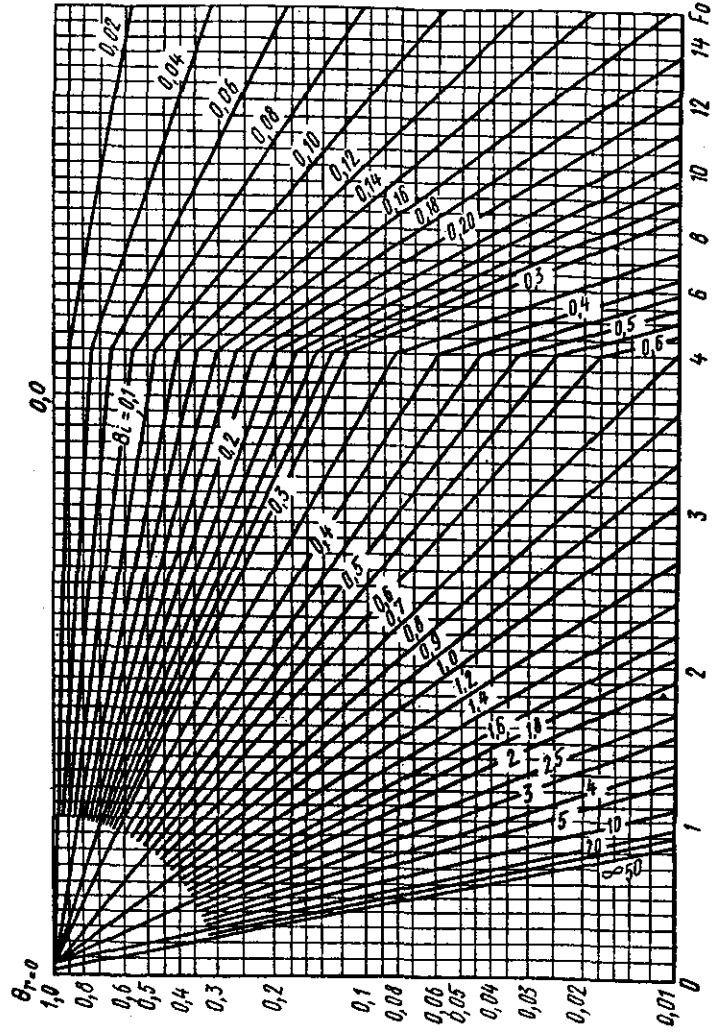


Рис. 14.3

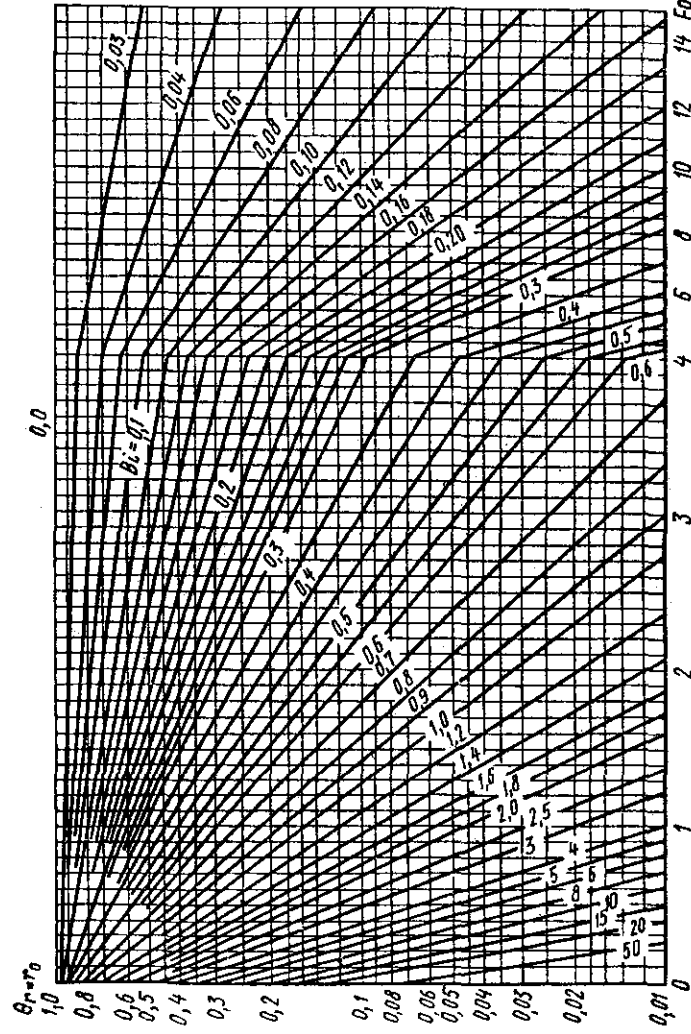


Рис. 14.4

Таблица 14.2

Bi	n_1	Bi	n_1	Bi	n_1	Bi	n_1	Bi	n_1	Bi	n_1
0,00	0,00	0,20	0,62	0,6	1,02	2,4	1,69	8,0	2,13	40	2,35
0,01	0,14	0,22	0,65	0,7	1,09	2,6	1,72	9,0	2,16	50	2,36
0,02	0,20	0,24	0,67	0,8	1,15	2,8	1,76	10	2,18	60	2,37
0,04	0,28	0,26	0,70	0,9	1,2	3,0	1,79	12	2,22	70	2,37
0,06	0,34	0,28	0,73	1,0	1,26	3,5	1,85	14	2,24	80	2,38
0,08	0,40	0,30	0,75	1,2	1,35	4,0	1,91	16	2,26	90	2,38
0,10	0,44	0,35	0,80	1,4	1,43	4,5	1,95	18	2,28	100	2,38
0,12	0,47	0,40	0,85	1,6	1,49	5,0	2,00	20	2,29	∞	2,4
0,14	0,52	0,45	0,90	1,8	1,55	5,5	2,02	25	2,31		
1,16	0,55	0,50	0,94	2,0	1,60	6,0	2,05	30	2,33		
0,18	0,59	0,55	0,98	2,2	1,64	7,0	2,09	35	2,34		

пературой выражается уравнением:

$$\theta = \sum_{i=1}^{\infty} \frac{2J_1(n_i)}{n_i [J_0^2(n_i) + J_1^2(n_i)]} J_0\left(n_i \frac{r}{r_0}\right) \exp(-n_i^2 Fo),$$

где $J_0(n_i)$ и $J_1(n_i)$ — функции Бесселя первого рода нулевого и первого порядка.

Так как в рассматриваемой задаче

$$Fo = \alpha t / r_0^2 = 6,12 \cdot 10^{-6} \cdot 1800 / 0,1^2 = 1,1 > 0,25,$$

то можно ограничиться первым членом ряда, тогда

$$\theta = \frac{2J_1(n_1)}{n_1 [J_0^2(n_1) + J_1^2(n_1)]} J_0\left(n_1 \frac{r}{r_0}\right) \exp(-n_1^2 Fo).$$

Зависимость собственных чисел n_1 от критерия Био приводится в табл. 14.2.

Для заданных условий $Bi = 0,67$, из табл. 14.2 находим $n_1 = 1,06$. Определяем безразмерный перепад температур

$$\begin{aligned} \theta_{r=0,5r_0} &= \frac{2J_1(1,06)}{1,06 [J_0^2(1,06) + J_1^2(1,06)]} J_0(1,06 \cdot 0,5) \times \\ &\times \exp(-1,06^2 \cdot 1,1) = 0,36; \\ t_{r=0,5r_0} &= t_{ж} - \theta_{r=0,5r_0} (t_{ж} - t_0) = 1100 - 0,36 (1100 - \\ &- 15) = 709,4^\circ \text{C}. \end{aligned}$$

14.43. Заготовка, имеющая форму параллелепипеда с размерами $600 \times 400 \times 250$ мм, имела начальную температуру $t_0 = 15^\circ \text{C}$. Заготовка помещена в нагревательную

печь с температурой среды $t_{ж} = 1500^\circ \text{C}$, коэффициент теплоотдачи к поверхности заготовки $\alpha = 120 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{K})$, теплофизические характеристики материала заготовки: $\lambda = 37 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{K})$; $a = 7 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$. Определить температуру в центре заготовки через 1,2 ч после начала нагревания.

14.44. Для условий предыдущей задачи определить температуру в центрах граней заготовки.

14.45. Стальная болванка цилиндрической формы диаметром 100 мм и длиной 150 мм равномерно нагрета до температуры $t_0 = 800^\circ \text{C}$. Болванка охлаждается в воздухе, температура которого $t_{ж} = 20^\circ \text{C}$. Определить температуру в центре болванки и в середине торцевой поверхности через 20 мин после начала охлаждения. Коэффициент теплоотдачи на поверхности болванки $\alpha = 120 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{K})$, теплопроводность материала $\lambda = 25 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{K})$, коэффициент температуропроводности $a = 6 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$.

14.46. Для условий охлаждения, рассмотренных в задаче 14.45, определить температуру в центре болванки и в середине торцевой поверхности, если линейные размеры болванки увеличены в два раза, т. е. $d = 200$ мм и $l = 300$ мм.

14.47. Кусок угля сферической формы ($d = 50$ мм) поступает в топку, температура в которой равна 1000°C . Начальная температура угля 15°C . Определить время нагревания угля до температуры воспламенения $t_{ст} = 700^\circ \text{C}$, если коэффициент теплоотдачи $\alpha = 100 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{K})$. Теплофизические характеристики угля: теплопроводность $\lambda = 0,26 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{K})$, коэффициент температуропроводности $a = 1,4 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$. Определить температуру в центре куска угля к этому времени.

14.48. Шарик льда диаметром 50 мм, имеющий температуру -10°C , помещен в камеру с температурой $t_{ж} = 5^\circ \text{C}$. Теплофизические характеристики льда: $\lambda = 2,25 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{K})$; $a = 1,08 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$. Через какое время шарик начнет таять, если коэффициент теплоотдачи к поверхности шарика $\alpha = 9,2 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{K})$?

14.49. Какое количество теплоты потеряет шар диаметром 0,1 м за 6 мин при обдуве его воздухом, температура которого $t_{ж} = -23^\circ \text{C}$? Начальная температура шара $t_0 = 330^\circ \text{C}$, коэффициент теплоотдачи принят одинаковым по всей поверхности шара $\alpha = 100 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{K})$. Теплофизические характеристики материала: $\lambda = 0,5 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{K})$; $a = 0,35 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$.

14.50. Стальной брусок сечением 40×80 мм, имеющий начальную температуру 400°C , погружается в жидкий воз-

дух ($t_{ж} = -183^\circ\text{C}$). Для стали $\lambda = 35 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$; $\alpha = 1,11 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$. Какова будет температура на поверхности бруска через 5 мин после погружения, если коэффициент теплоотдачи $\alpha = 580 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}$?

Таблица 14.3

§ 14.3. Численные методы решения задач нестационарной теплопроводности

14.51. Одна из поверхностей плоской стальной пластины неограниченной протяженности находится в потоке нагретого газа, другая поверхность теплоизолирована. Выполнить приближенный расчет изменения температуры пластины в зависимости от времени в течение первых 10 с. Толщина пластины $\delta = 2 \text{ мм}$. Влиянием лучистого теплообмена и изменением температуры поперек стенки пренебречь. Физические свойства материала пластины: $c = 602 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К)}$, $\rho = 7900 \text{ кг/м}^3$. Температура окружающей среды $T_{ж} \text{ (К)}$ и коэффициент теплоотдачи $\alpha \text{ [Вт/(м}^2 \cdot \text{К)]}$ линейно изменяются со временем: $T_{ж} = -50\tau + 900$; $\alpha = -30\tau + 600$. Вначале пластина имела температуру 293 К .

Решение. Составим уравнение теплового баланса для пластины

$$\alpha_1 (T_{ж1} - T) - \alpha_2 (T - T_{ж2}) = c\rho\delta \frac{dT}{d\tau},$$

где α_1 и α_2 — коэффициенты теплоотдачи от среды к поверхностям пластины, $\text{Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}$; T — температура пластины, К ; τ — время, с .

Решая это линейное дифференциальное уравнение при постоянных α и $T_{ж}$, получим

$$T^{k+1} = \frac{Q}{P} - \frac{(Q(P) - T^k)}{\exp(P\Delta\tau)},$$

где $Q = (\alpha_1 T_{ж1} + \alpha_2 T_{ж2})/(c\rho\delta)$; $P = (\alpha_1 + \alpha_2)/(c\rho\delta)$; T^k — температура пластины в момент времени τ ; T^{k+1} — температура пластины в момент времени $\tau + \Delta\tau$.

По условию задачи, одна из сторон пластины теплоизолирована. Положив $\alpha_2 = 0$, найдем, что

$$Q/P = T_{ж1} = T_{ж}; \quad P = \alpha_1/(c\rho\delta) = \alpha/(c\rho\delta);$$

$$T^{k+1} = T_{ж} - \frac{T_{ж} - T^k}{\exp(P\Delta\tau)} = T_{ж} - \frac{T_{ж} - T^k}{10^{0.4343P\Delta\tau}};$$

$$c\rho\delta = 602 \cdot 7900 \cdot 2 \cdot 10^{-3} = 9512 \text{ Дж/(м}^2 \cdot \text{К)}.$$

$\tau, \text{ с}$	$\alpha, \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}$	$P, 1/\text{с}$	$0.4343P\Delta\tau$	$10^{0.4343P\Delta\tau}$	$T_{ж}, \text{ К}$	$T^k, \text{ К}$	$T_{ж} - T^k$	$\frac{T_{ж} - T^k}{10^{0.4343P\Delta\tau}}$	$T^{k+1}, \text{ К}$
1	585	0,0615	0,0267	1,064	875	293	582	548	327
2	555	0,0583	0,0253	1,060	825	327	498	470	355
3	525	0,0552	0,0240	1,057	755	355	420	397	378
4	495	0,0521	0,0226	1,053	725	378	347	330	395
5	465	0,0489	0,0212	1,050	675	395	280	267	408
6	435	0,0457	0,0199	1,047	625	408	217	207	418
7	405	0,0426	0,0185	1,043	575	418	157	151	424
8	375	0,0394	0,0171	1,040	525	424	101	97,1	428
9	345	0,0363	0,0158	1,037	475	428	47	45,3	430
10	315	0,0331	0,0144	1,034	425	430	—5	4,8	420

Разбивая общее время нагревания пластины на десять интервалов, получим $\Delta\tau = 1 \text{ с}$. Считая в пределах каждого промежутка времени α и $T_{ж}$ постоянными (средними), вычислим температуру в конце каждого интервала времени. Результаты расчета приведены в табл. 14.3.

14.52. Воспользовавшись формулой, приведенной в предыдущей задаче, вычислить приближенное значение температуры стенки камеры сгорания двигателя на 6-й секунде после запуска. Температуры газов в камере и коэффициенты теплоотдачи в различные моменты времени:

$\tau, \text{ с}$	1	2	3	4	5	6
$T_{ж}, \text{ К}$	473	673	823	873	1023	1103
$\alpha, \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}$	350	430	500	550	600	630

Стенка стальная толщиной $\delta = 1 \text{ мм}$. Диаметр камеры $d \gg \delta$. Физические свойства материала стенки: $c = 500 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К)}$; $\rho = 7850 \text{ кг/м}^3$. Температура стенки камеры перед запуском двигателя составляла 288 К . Теплоотдачей с внешней стороны стенки и изменением температуры поперек стенки пренебречь. Влияние лучистого теплообмена не учитывать.

14.53. Стальная обшивка сверхзвукового летательного аппарата толщиной $\delta_{м} = 1 \text{ мм}$ защищена от аэродинамического нагрева слоем теплозащитного покрытия толщиной $\delta = 2 \text{ мм}$ (рис. 14.5). Считая обшивку плоской, определить распределение температур в слое покрытия и температуру обшивки на 2, 4, 6, 8 и 10-й секундах полета. Коэффициент теплоотдачи $\alpha_1 \text{ [Вт/(м}^2 \cdot \text{К)]}$ и адиабатная температура стен-

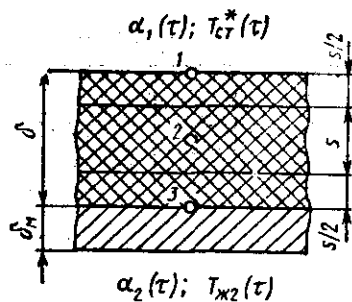


Рис. 14.5

слоя: $c_m = 460,6 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К)}$; $\rho_m = 7900 \text{ кг/м}^3$. Степень черноты поверхности покрытия $\epsilon_{ст} = 0,94$. Начальная температура обшивки и покрытия $T_{нач} = 293 \text{ К}$.

Решение. 1. Математическая формулировка задачи. Распределение температур в пластине может быть найдено путем решения одномерного уравнения теплопроводности $\partial T / \partial \tau = a (\partial^2 T / \partial x^2)$ при следующих граничных условиях (см. рис. 14.5):

$$\alpha_1(\tau) [T_{ст}^*(\tau) - T_1] - \lambda \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)_{ст} - \psi T_1^* = 0;$$

$$\lambda \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)_{ст} - \alpha_2(\tau) [T_n - T_{ж2}(\tau)] = c_m \rho_m \delta_m \frac{\partial T}{\partial \tau}.$$

Согласно начальным условиям при $\tau = 0$ $T = T_{нач}$.

2. Выбор конечно-разностной схемы для численного решения уравнения теплопроводности. Уравнение теплопроводности при переменных граничных условиях и наличии лучистого теплообмена на границе тела может быть решено методом сеток*. При решении задачи по явной разностной схеме допустимый шаг по времени

$$\Delta \tau_{max} = \frac{0,5}{(a/s^2) + \alpha_1/(cps)} =$$

$$= \frac{0,5}{0,185 \cdot 10^{-6} / (10^{-2})^2 + 930 \cdot 770 \cdot 10^{-3}} = 0,3 \text{ с}.$$

* Петражицкий Г. Б., Полежаев В. И. Инженерный метод расчета нестационарных процессов теплопроводности. Теплоэнергетика, 1962, № 2.

ки $T_{ст}^*(K)$ со стороны покрытия изменяются со временем по законам

$$\alpha_1(\tau) = -23,3\tau + 930;$$

$$T_{ст}^*(\tau) = 60\tau + 293.$$

Теплоотдачей с внутренней стороны обшивки и продольными перетоками теплоты пренебречь. Физические свойства покрытия: $c = 815 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К)}$; $\rho = 770 \text{ кг/м}^3$; $\lambda = 0,1163 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$. Физические свойства металлического

При $\Delta \tau > 0,3$ с явная схема неустойчива [19] и, следовательно, для решения уравнений с большим шагом по времени необходимо использовать неявную схему.

3. Составление системы конечно-разностных уравнений. Используя неявную конечно-разностную схему для уравнения теплопроводности

$$\frac{T'_2 - T_i}{\Delta \tau} = a \frac{T'_{i+1} - 2T'_i + T'_{i-1}}{s^2} \quad (14.1)$$

и условия теплового баланса на границах обшивки, запишем систему конечно-разностных уравнений в следующем виде:

$$\left. \begin{aligned} \frac{T'_1 - T_1}{\Delta \tau} &= \frac{2}{cps} \left[\alpha'_1 (T_{ст}^* - T'_1) + \frac{\lambda}{s} (T'_2 - T'_1) - \right. \\ &\quad \left. - \psi T_1^* \right]; \\ \frac{T'_2 - T_2}{\Delta \tau} &= a \frac{T'_3 - 2T'_2 + T'_1}{s^2}; \\ \frac{T'_3 - T_3}{\Delta \tau} &= a \frac{T'_4 - 2T'_3 + T'_2}{s^2}; \\ &\dots \dots \dots \\ \frac{T'_n - T_n}{\Delta \tau} &= \frac{2}{cps\sigma} \left[\frac{\lambda}{s} (T'_{n-1} - T'_n) + \right. \\ &\quad \left. + \alpha'_2 (T'_{ж2} - T'_n) \right]. \end{aligned} \right\} \quad (14.2)$$

В этих уравнениях T_i — температура в i -м узле пространственной сетки; $i = 1, 2, 3, \dots, n$; s и $\Delta \tau$ — шаг по координате и шаг по времени; температуры и коэффициенты теплоотдачи, отмеченные штрихом (T'_i ; $T_{ст}^*$; $T_{ж2}$; α'_1 ; α'_2), относятся к моменту времени $\tau + \Delta \tau$; температуры, не отмеченные штрихом, соответствуют моменту времени τ ; α_2 и $T_{ж2}$ — коэффициент теплоотдачи и температура среды с внутренней стороны обшивки (в рассматриваемой задаче $\alpha_2 = 0$); $a = \lambda/(cp)$; C_0 — коэффициент излучения абсолютно черного тела, равный $5,7 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К}^4)$; $\psi = \epsilon_{ст} C_0 \times 10^{-8}$; $\sigma = 1 + \frac{2c_m \rho_m \delta_m}{cps}$; n — число узлов пространственной сетки.

При составлении балансовых конечно-разностных уравнений для границ стенки к узлу 1 относилась масса слоя покрытия толщиной $s/2$, а к узлу n — масса слоя покрытия толщиной $s/2$ и масса металлического слоя толщиной δ_m .

При этом предполагалось, что для металлического слоя выполняется условие $Bi_2 = \alpha_2 \delta_M / \lambda_M < 0,1$ и поэтому $T_3 \approx T_4$.

Лучистый поток из окружающей среды к обшивке считаем равным нулю. Для решения задачи принимаем $n = 3$, $s = \delta/2 = 2 \cdot 10^{-3}/2 = 10^{-3}$ м. Выбираем $\Delta t = 1$ с.

Приводим систему уравнений (14.2) к виду:

$$-A_i T'_{i+1} + B_i T'_i - C_i T'_{i-1} = D_i; \quad (14.3)$$

$$-2kh T'_2 + (1 + 2hP_1) T'_1 = T_1 + 2hQ_1; \quad (14.4)$$

$$-kh T'_3 + (1 + 2kh) T'_2 - kh T'_1 = T_2; \quad (14.5)$$

$$\left(1 + \frac{2h}{\sigma} P_2\right) T'_3 - \frac{2kh}{\sigma} T'_2 = T_3 + \frac{2h}{\sigma} Q_2, \quad (14.6)$$

где

$$k = \lambda/s = 0,1163/10^{-3} = 116,3 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)};$$

$$h = \Delta t / (cps) = 1 / (815 \cdot 770 \cdot 10^{-3}) = 1,593 \cdot 10^{-3} \text{ с}^3 \cdot \text{К/кг};$$

$$\sigma = 1 + \frac{2c_M \rho_M \delta_M}{cps} = 1 + \frac{2 \cdot 460 \cdot 6 \cdot 7900 \cdot 10^{-3}}{815 \cdot 770 \cdot 10^{-3}} = 12,6;$$

$$\psi = \frac{C_0 \epsilon_{ст}}{10^8} = \frac{5,7 \cdot 0,94}{10^8} = 5,35 \cdot 10^{-8} \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К}^4);$$

$$P_1 = \alpha'_1 + k; P_2 = \alpha'_2 + k; Q_1 = \alpha'_1 T_{ст}^* - \psi T_1^4; Q_2 = \alpha'_2 T_{ж2}^4.$$

Значения коэффициентов уравнения (14.3) сведены в табл. 14.4.

Решаем систему уравнений (14.4)–(14.6) наименее трудоемким методом прогонки. Коэффициенты прогонки определяем по формулам:

$$E_i = \frac{A_i}{B_i - C_i E_{i-1}}; F_i = \frac{D_i + C_i E_{i-1}}{B_i - C_i E_{i-1}};$$

$$E_1 = \frac{2kh}{1 + 2hP_1}; F_1 = \frac{T_1 + 2hQ_1}{1 + 2hP_1}; E_2 = \frac{kh}{1 + kh(2 - E_1)};$$

$$F_2 = \frac{T_2 + khF_1}{1 + kh(2 - E_1)}; E_3 = 0; F_3 = \frac{T_3 + \frac{2h}{\sigma}(Q_2 + kF_2)}{1 + \frac{2h}{\sigma}(P_2 - kE_3)}.$$

Таблица 14.4

i	A_i	B_i	C_i	D_i
1	$2kh$	$1 + 2hP_1$	0	$T_1 + 2hQ_1$
2	kh	$1 + 2kh$	kh	T_2
3	0	$1 + \frac{2h}{\sigma} P_2$	$\frac{2kh}{\sigma}$	$T_3 + \frac{2h}{\sigma} Q_2$

Неизвестные температуры вычисляем, начиная с последней $T_n = T_3$; $T_3 = F_3$; $T_2 = E_2 T_3 + F_2$; $T_1 = E_1 T_2 + F_1$.

Результаты вычислений приведены в табл. 14.5 и 14.6.

Таблица 14.5

$\tau, \text{с}$	23,3τ	α'_1	$P_1 + \frac{1}{2h}$	$\frac{2kh}{1 + 2hP_1}$	60τ	$T_{ст}^*$
1	23,3	906,7	1337	0,0870	60	353
2	46,6	883,4	1314	0,0885	120	413
3	69,9	860,1	1290	0,0902	180	473
4	93,2	836,8	1267	0,0918	240	533
5	116,5	813,5	1244	0,0935	300	593
6	139,8	790,2	1220	0,0953	360	653
7	163,1	766,9	1197	0,0972	420	713
8	186,4	743,6	1174	0,0991	480	773
9	209,7	720,3	1151	0,1011	540	833
10	233,0	697,0	1127	0,1032	600	893

14.54. На 10-й секунде полета температура в точках 1, 2, 3 (см. рис. 14.5) двухслойной стенки крыла управляемой ракеты достигла значений $T_1 = 315$ К, $T_2 = 486$ К и $T_3 = 795$ К. Стенка плоская и состоит из слоя стали толщиной 1 мм и слоя теплозащитного покрытия толщиной 2 мм. Степень черноты поверхности стенки со стороны набегающего потока $\epsilon_{ст} = 0,94$.

Взяв физические свойства стали и покрытия из предыдущей задачи, вычислить температуры в точках 1, 2 и 3 через последующие десять секунд полета, считая, что тепловой поток от аэродинамического нагрева распространяется только в направлении нормали к стенке.

Таблица 14.6

τ, c	T_1	T_2	T_3	E_1	$\tau f \cdot 10^{-9}$	φf	$\alpha_1 \tau c \cdot 10^{-3}$	$Q_1 \cdot 10^{-4}$	$2hQ_1$
1	1	2	3	4	5	6	7	8	9
				См. табл. 14.5	[11] [*]	$\Phi [s]$		[7]—[8]	$2h \cdot [8]$
1	293,0	293,0	293,0	0,0870	73,70	395	320	319,6	1018
2	334,5	298,5	293,3	0,0885	125,2	670	365	364,3	1161
3	385,3	309,7	294,0	0,0902	220,4	1179	407	405,8	1293
4	438,7	325,1	295,0	0,0918	370,4	1982	446	444,0	1415
5	492,0	343,7	296,5	0,0935	585,9	3135	482	479,0	1526
6	544,5	364,8	298,5	0,0953	879,0	4703	516	511,3	1629
7	597,4	387,6	301,2	0,0972	1274	6816	547	540,2	1721
8	649,4	411,6	304,5	0,0991	1778	9512	575	565,5	1802
9	700,3	436,7	308,4	0,1011	2405	12870	600	587,1	1871
10	749,9	462,3	312,9	0,1032	3162	16920	622	605,1	1928

Продолжение табл. 14.6

$2hQ_1 + T_1$	$\frac{1}{2h} \times (2hQ_1 + T_1)$	F_1	khE_1	$(1+2kh) - khE_1$	E_1	khF_1	$khF_1 + T_1$	F_2
10	11	12	13	14	15	16	17	18
[9]+[1]	$\frac{1}{2h} [10]$	[11]·[4]	$kh \cdot [4]$	$(1+2kh) - [13]$	$\frac{kh}{[14]}$	$kh \cdot [12]$	[16]+[2]	$\frac{[17]}{[14]}$
1311	3546	308,5	0,0161	1,354	0,1365	57,0	350,0	258,5
1495	4044	375,9	0,0164	1,353	0,1366	66,1	364,6	269,5
1678	4539	409,4	0,0167	1,353	0,1366	75,7	385,4	284,8
1854	5015	460,4	0,0170	1,353	0,1366	85,1	410,2	303,2
2018	5459	510,4	0,0173	1,352	0,1367	94,3	438,0	324,0
2174	5881	560,5	0,0176	1,352	0,1367	103,6	468,4	346,4
2318	6270	609,4	0,0180	1,352	0,1367	112,6	500,2	370,0
2451	6630	657,0	0,0183	1,351	0,1368	121,4	533,0	394,5
2571	6955	703,2	0,0187	1,351	0,1368	130,0	566,7	419,5
2678	7244	747,6	0,0191	1,351	0,1368	138,2	600,5	444,5

$\frac{2kh}{\sigma} F_2$	$\frac{2kh}{\sigma} F_2 + T_2$	$1 - E_2$	$\frac{2kh}{\sigma} (1 - E_2)$	$1 + \frac{2kh}{\sigma} \times \frac{1}{1 - E_2}$	T_2'	$E_2 T_2'$	T_2'	$E_2 T_2'$	T_1
19	20	21	22	23	24	25	26	27	28
$\frac{2kh}{\sigma}$	[19] + [3]	1 - [15]	$\frac{2kh}{\sigma}$ [21]	1 + [22]	$\frac{[20]}{[23]}$	[15] · [24]	[25] + [18]	[1] · [26]	[27] + [12]
7,6	300,6	0,8634	0,0253	1,025	293,3	40,0	298,5	26,0	344,5
7,9	301,3	0,8634	0,0253	1,025	294,0	40,2	309,7	27,4	385,3
8,4	302,4	0,8634	0,0253	1,025	295,0	40,3	325,1	29,3	438,7
8,9	303,9	0,8634	0,0253	1,025	296,5	40,5	343,7	31,6	492,0
9,5	306,0	0,8633	0,0253	1,025	298,5	40,8	364,8	34,1	544,5
10,2	308,7	0,8633	0,0253	1,025	301,2	41,2	387,6	36,9	597,4
10,9	312,1	0,8633	0,0253	1,025	304,5	41,6	411,6	40,0	649,4
11,6	316,1	0,8632	0,0253	1,025	308,4	42,2	436,7	43,3	700,3
12,3	320,7	0,8632	0,0253	1,025	312,9	42,8	462,3	46,7	749,9
13,0	325,9	0,8632	0,0253	1,025	318,0	43,5	488,0	50,4	798,0

Адиабатная температура стенки $T_{ст}^*$ (К) и коэффициент теплоотдачи α_1 (Вт/(м² · К)) со стороны потока изменяются со временем по следующим законам:

$$\alpha_1(\tau) = (-23,26\tau + 697,4);$$

$$T_{ст}^*(\tau) = (60\tau + 893).$$

Поверхность стенки, обращенную внутрь крыла, считать теплоизолированной.

14.55. * До какой температуры нагреваются поверхности неограниченной плоской стенки (пластины) толщиной 2 мм в течение первых трех секунд, если с одной из сторон стенка омывается потоком нагретого газа, имеющего температуру 1000 К? Коэффициент теплоотдачи от газа к стенке равен 2900 Вт/(м² · К). Теплоотдачей с другой стороны стенки пренебречь. Материал, из которого изготовлена пластина, имеет следующие физические свойства: $\alpha = \lambda/(c\rho) = 185 \times 10^{-3}$ м²/с; $\lambda = 0,116$ Вт/(м · К). Температура пластины в начальный момент времени 290 К. Теплообмен излучением не учитывать.

Решение получить с помощью ЭВМ методом сеток, применяя ~~используя~~ конечно-разностную схему. Для того чтобы ~~показать, как влияют~~ параметры разностной сетки на точность численного решения, выполнить расчеты на сетках с числом узлов, равным 3, 7, 13 и 29. Шаг по времени принять равным 0,01 с. Сравнить полученные результаты с точным аналитическим решением.

14.56. Для исследования влияния шага по времени на точность численного решения решить предыдущую задачу методом сеток при значениях временного шага 1; 0,1 и 0,01 с, приняв число узлов равным 29. Используя существующее точное аналитическое решение, сравнить с ним полученные результаты.

14.57. Вычислить температуры на внутренней и внешней сторонах однослойной стенки сопла ракетного двигателя в моменты времени 0,3; 1,2; 3 и 6,6 с, отсчитываемые от начала запуска двигателя. Температура газообразных продуктов сгорания, омывающих стенку дозвуковой части сопла, равна 727 °С. Условия теплоотдачи на границах стенки заданы критериями Бю: $Bi_1 = \alpha_1 \delta / \lambda = 50$; $Bi_2 = \alpha_2 \delta / \lambda = 0$. Приближенно считать, что стенка является плоской и неограниченной. Толщина стенки $\delta = 2 \cdot 10^{-3}$ м. Теплопровод-

* Для решения задач 14.55...14.61 можно использовать алгоритм и программу на языке ФОРТРАН, подробно описанные в учебнике [19] (см. также задачу 14.64).

ность материала, из которого изготовлено сопло, 0,12 Вт/(м · К). Начальная температура сопла 290 К. Лучистым теплообменом пренебречь.

Решение получить численным методом с помощью ЭВМ на разностной сетке с числом узлов, равным 7, используя явную или неявную конечно-разностную схему для уравнения теплопроводности. Шаг по времени принять равным 0,15 с. Для того чтобы при указанных условиях получить наименьшую погрешность аппроксимации, положить комплекс $a\Delta t/(\Delta x)^2$ равным 1/6. Результаты расчета сравнить с точным решением.

14.58. Исследовать влияние толщины слоя теплозащитного покрытия на температуру стенки корпуса сверхзвукового летательного аппарата кратковременного действия в условиях аэродинамического нагрева. Считать, что тепловой поток направлен по нормали к стенке. Толщина стенки 1,5 мм. Рассмотреть варианты с толщиной теплозащитного покрытия 1, 2 и 3 мм.

Из условий полета известно, что температура адиабатной поверхности $T_{ст}^*$ (К) (температура восстановления) и коэффициент теплоотдачи α_1 [Вт/(м² · К)] со стороны покрытия изменяются со временем по законам:

$$T_{ст}^* = 293 + 75\tau^{1,2}; \alpha_1 = 10 + 15\tau.$$

Температура окружающей среды $T_{ж2} = 300$ К; коэффициент теплоотдачи со стороны стенки $\alpha_2 = 20$ Вт/(м² · К).

Физические свойства стенки корпуса: $\lambda_m = 12$ Вт/(м · К); $c_m = 560$ Дж/(кг · К); $\rho_m = 4500$ кг/м³; теплозащитного покрытия: $\lambda = 0,15$ Вт/(м · К); $c = 1200$ Дж/(кг · К); $\rho = 800$ кг/м³.

Начальная температура конструкции 293 К. Лучистым теплообменом пренебречь. Вычислить температуры стенки и поверхности покрытия в моменты времени 5, 15, 25 с после начала полета. Расчет выполнить на сетке с числом узлов в слое покрытия, равным 9, при шаге по времени 0,5 с. Считать что распределение температуры поперек металлической стенки корпуса является однородным ($Bi_2 = \alpha_2 \delta_m / \lambda < 0,1$).

14.59. Исследовать влияние теплопроводности теплозащитного покрытия на температуру стенки корпуса высокоскоростного летательного аппарата кратковременного действия. Принимая толщину теплозащитного покрытия равной 2,5 мм и используя условия предыдущей задачи, вычислить температуры стенки и поверхности покрытия на

5, 15 и 25-й секундах полета при значениях теплопроводности покрытия: 0,02; 0,2 и 2 Вт/(м · К).

14.60. Исследовать влияние аккумулирующей способности теплозащитного покрытия на температуру стенки корпуса летательного аппарата. Используя условия задачи 14.58 и принимая толщину покрытия равной 2,5 мм, выполнить расчеты для следующих вариантов физических свойств теплозащитного покрытия: а) $c = 750$ Дж/(кг · К); $\rho = 380$ кг/м³; б) $c = 1000$ Дж/(кг · К); $\rho = 800$ кг/м³; в) $c = 1700$ Дж/(кг · К); $\rho = 1800$ кг/м³.

Теплопроводность покрытия принять равной 0,15 Вт/(м · К). Вычислить температуры стенки и покрытия на 5, 15 и 25-й с полета.

14.61. Исследовать влияние аккумулирующей способности материала стенки отсека летательного аппарата на температуру стенки с нанесенным на нее слоем теплозащитного покрытия. Стенка со стороны покрытия обтекается потоком нагретого газа от струи ракетного двигателя. Температура адиабатной поверхности $T_{ст}^*$ (К) и коэффициент теплоотдачи α_1 [Вт/(м² · К)] со стороны потока изменяются со временем по законам:

$$T_{ст}^* = 70\tau^{1,5} + 500; \alpha_1 = 18\tau + 20.$$

Температура среды $T_{ж}$ и коэффициент теплоотдачи α_2 со стороны стенки также изменяются со временем:

$$T_{ж} = 0,1\tau^{1,1} + 293; \alpha_2 = 0,2\tau + 6.$$

Толщина стенки и покрытия 2 и 1,5 мм соответственно. Считать, что размеры стенки велики по сравнению с ее толщиной. Лучистым теплообменом на границах пренебречь. Теплозащитное покрытие имеет следующие физические свойства: $\lambda = 0,1$ Вт/(м · К); $c = 1400$ Дж/(кг · К); $\rho = 1000$ кг/м³.

Вычислить температуры стенки и поверхности покрытия на 10-й и 20-й с полета для следующих материалов стенки: а) алюминиевый сплав [$c = 1130$ Дж/(кг · К); $\rho = 2640$ кг/м³]; б) сталь [$c = 523$ Дж/(кг · К); $\rho = 7850$ кг/м³]; в) титановый сплав [$c = 565$ Дж/(кг · К); $\rho = 4460$ кг/м³].

Начальную температуру принять равной 293 К. Численное решение получить на сетке с числом узлов, равным 11, при шаге по времени 0,5 с.

14.62. Сплошная стальная заготовка, имеющая форму цилиндра 160 мм и длиной 320 мм, охлаждается в течение 30 мин в воздушной среде при температуре $T_{ж} = 303$ К.

Начальная температура заготовки $T_1 = 1073$ К. Коэффициент теплоотдачи к воздушной среде $118 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}$. Физические свойства стали: $\rho = 7830 \text{ кг/м}^3$; $\lambda = 23,3 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$; $c = 487 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К)}$.

Используя численные методы решения одномерных задач теплопроводности для неограниченной пластины и бесконечно длинного цилиндра и применяя принцип наложения решений, вычислить безразмерные температуры $\theta = (T - T_{ж})/(T_1 - T_{ж})$ в центральной точке заготовки и в середине торцевой поверхности.

14.63. Стальной слиток, имеющий форму куба с размером ребра 2δ , нагревается в газовой среде с температурой $T_{ж} = 1000$ К. Начальная температура слитка $T_1 = 290$ К. Вычислить безразмерные температуры $\theta = (T - T_{ж})/(T_1 - T_{ж})$ в центральной точке слитка, в центральных точках граней, в середине ребер, в угловых точках и на расстоянии $0,5\delta$ от центра слитка по направлению к грани (рис. 14.6) при условии, что $Bi = \alpha\delta/\lambda = 50$, а $Fo = \alpha t/\delta^2 = 0,0462$.

Указание. Для решения задачи использовать принцип наложения решений. Распределение температуры в неограниченной пластине вычислить, используя программу (рис. 14.7). Идентификаторы к программе приведены в табл. 14.7.

Таблица 14.7

Наименование	Обозначение	Идентификатор
Температура среды	$T_{ж}$	TF
Начальная температура	T_1	TN
Время начала печати	—	T
Шаг печати	—	DT
Полутолщина неограниченной пластины	δ	BT
Температуропроводность	$a = \lambda/(c\rho)$	AK
Критерий Фурье	$ Fo $	F
Температура пластины	$T(x, \tau)$	TX(L)
Номер узла (рис. 14.6)	—	L ($1 \leq L \leq 11$)
Параметр временного цикла	—	I ($1 \leq I \leq K$)
Номер члена ряда	i	J ($1 \leq J \leq 6$)
Коэффициенты	C_i, β_i	A(J), B(J)

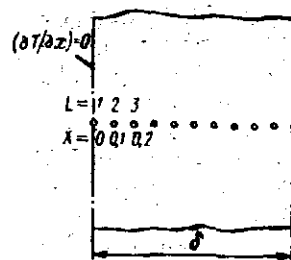


Рис. 14.6

```

DIMENSION A(6), B(6), TX(12)
DATA TF, TN, T, DT, AK, K, A, B, F,
FORMAT(1X, 'T=', FS, 1, SG, 11 (F8, 4, 1X))
DO 3 I=1,K
  F=(AK/(BT**2))*T
  X=B,
  DO 6 L=1,11
    C=B,
    DO 4 J=1,6
      C=C+AK(J)*COS(B(J)*X)*EXP(-(B(J)**2)*F)
    TX(L)=TF-(TF-TN)*C
  X=X+B, 1
  PRINT 2, T, (TX(L), L=1, 11)
  T=T+DT
STOP
END

```

Рис. 14.7

При $I = 1$ время равно T ; при $I = 2$ время равно $T + DT$ и т. д.; при $I = K$ время равно $T + (K - 1) DT$. Программа соответствует формуле [см. 119], § III.2—III.5]

$$\theta = \left(\frac{T(x, \tau) - T_{ж}}{T_1 - T_{ж}} \right) = \sum_{i=1}^6 C_i \left[\cos \left(\beta_i \frac{x}{\delta} \right) \right] e^{-\beta_i^2 Fo} = f(Bi, Fo, \frac{x}{\delta}).$$

Значения коэффициентов C_i и β_i (для шести членов ряда) взять из справочника*.

14.64. Трехслойная неограниченная пластина (рис. 14.8) состоит из верхнего нагреваемого слоя, изготовленного из титанового сплава толщиной $\delta_1 = 1$ мм, среднего плавящегося слоя из гидрида лития толщиной $\delta = 10$ мм и нижнего стального слоя толщиной $\delta_2 = 1$ мм. Верхний слой нагревается газовым потоком с температурой $T_{ж1} = 1800$ К. Коэффициент теплоотдачи от газового потока к верхнему слою $\alpha_1 = 100 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}$. Время нагревания 7,5 мин. Физические свойства материалов приведены в табл. 14.8.

Теплоотдачей со стороны нижнего стального слоя пренебречь. Начальная температура пластины 290 К. Как будет изменяться температура внешней поверхности титанового слоя по времени в про-

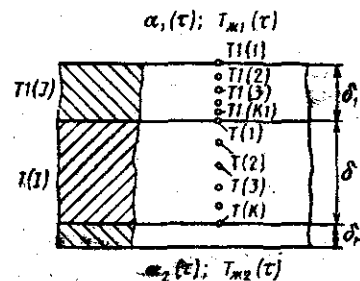


Рис. 14.8

* Кутателадзе С. С., Боришанский В. М. Справочник по теплопередаче. М.—Л., 1959. с. 414.

Таблица 14.8

Слой	λ , Вт/(м·К)	c , Дж/(кг·К)	ρ , кг/м ³	$\gamma_{пл}$, Дж/кг	$T_{пл}$, К
Верхний слой	11.63	565	4460	—	—
Средний слой: в твердом состоя- нии	5.50	5680	702	$2254 \cdot 10^3$	965
в жидком состоя- нии	1.35	7620	500	—	—
Нижний слой	—	502	7900	—	—

цессе нагревания? Сравнить полученные результаты со случаем, когда свойства внутреннего (среднего) слоя одинаковы со свойствами верхнего слоя и плавления не происходит. Для решения задачи воспользоваться программой (рис. 14.9) Идентификаторы к программе приведены в табл. 14.9.

В программе: $TN = 290$ К — начальная температура в пластине ($T_{нач}$); X — время, с; $DX = 0,5$ с — шаг по времени; $XK = 460$ с — время окончания процесса нагревания; $XP = 5$ с — время начала печати; $DXP = 10$ с — шаг печати.

При выборе T_{min} и T_{max} следует иметь в виду, что T_{min} и T_{max} должны отличаться от $T_{пл}$ на несколько процентов ($T_{min} < T_{пл} < T_{max}$). При решении задач без плавления T_{min} должно быть выбрано заведомо большим, чем ожидаемая наибольшая температура в пластине; α_1 , $T_{ж1}$, α_2 и $T_{ж2}$ — могут быть заданы в виде функций, зависящих от времени.

Программа составлена для условий $T_{нач} \leq T_{ж2} < T_{ж1}$, $\alpha_1 \geq \alpha_2$; $(\alpha_2 \delta_m / \lambda_m) < 0,1$. При решении задач теплопроводности без фазового перехода первые два ограничения снимаются.

14.65. Используя метод конечных разностей, решить обратную задачу теплопроводности с целью определения локальных коэффициентов теплоотдачи на начальном участке трубы, нагреваемой электрическим током. По данным экспериментального исследования теплоотдачи при вынужденном движении воздуха в трубе температура внутренней

Таблица 14.9

Верхний слой	Средний (плавящийся) слой	Нижний слой $B1_2 = (\alpha_2 \delta_m / \lambda_m) < 0,1$
Число узлов δ_1 , м λ_1 , Вт/(м·К) c_1 , Дж/(кг·К) ρ_1 , кг/м ³ α_1 , Вт/(м ² ·К) $T_{ж1}$, К (см. рис. 14.8)	Число узлов δ , м λ_T , Вт/(м·К) $\lambda_{ж}$, Вт/(м·К) c_T , Дж/(кг·К) $c_{ж}$, Дж/(кг·К) ρ_T , кг/м ³ $\rho_{ж}$, кг/м ³ $\gamma_{пл}$, Дж/кг $T_{пл}$, К T_{min} , К T_{max} , К	δ_m , м c_m , Дж/(кг·К) ρ_m , кг/м ³ α_2 , Вт/(м ² ·К) $T_{ж2}$, К (см. рис. 14.8)
$K1 = 8$ $BB = 10^{-3}$ $VV = 11,63$ $CC = 565$ $PP = 4460$ $AL1 = 100$ $TG1 = 1800$	$K = 20$ $B = 10^{-2}$ $VT = 5,50$ $VG = 1,35$ $CT = 5680$ $CG = 7620$ $PT = 702$ $PG = 500$ $W = 2254 \cdot 10^3$ $TPL = 965$ $TMI = 930$ $TMA = 1000$	$BM = 10^{-2}$ $CM = 502$ $PM = 7900$ $AL2 = 0$ $TG2 = 0$


```

1  DIMENSION E1(20), F1(20), T1(20), U(100), Q(100), E(100)
2  DATA K1, K, BB, B, BM, UU, UT, UG, CC, CT, CG, CM, PP, PT, P6, PM, TPL
3  TMI, TMA, W, DX, XK, XP, DMP, TN
4  FORMAT(F12.2)
5  DO 14 J=1, K1
6  T1(J)=TN
7  DO 13 I=1, K
8  T(I)=TN
9  X=0.
10 PRINT 1, X
11 PRINT 1, (T1(J), J=1, K1)
12 PRINT 1, (T(I), I=1, K)
13 S1=BB/K1
14 S=B/(K-1)
15 M1=BM/(CC+PP+S1)
16 U=UU/S1
17 H2=2. MM1
18 AT=UMH2
19 AS=UMH1
20 BS=1. +UMH2
21 CS=AS
22 QT=CT+PT
23 QG=CG+P6
24 QF=(QT*(TPL-TMI)+QG*(TMA-TPL)+UG*5*(PT+P6))/(TMA-TMI)
25 US=UT+UG
26 IF(X-XK+DX-1.E-6) 2, 2, 3
27 X=X+DX
28 AL1=100.
29 T61=1000.
30 ***** AL1, T61 МОЖНО ЗАДАТЬ В ВНЕШНЮЮ ФУНКЦИЮ ОТ X *****
31 B1=1. +H2*(AL1+U)
32 D1=T1(1)+H2*AL1*T61
33 E1(1)=A1/B1
34 F1(1)=D1/B1
35 DO 18 J=2, K1
36 E1(J)=AS/(BS-CS+E1(J-1))
37 F1(J)=(T1(J)+CS*F1(J-1))/(BS-CS+E1(J-1))
38 IF(T(1)-TPL-0.1E-2) 16, 16, 17
39 U(1)=UT
40 GO TO 20
41 IF(T(2)-TPL) 18, 19, 19
42 V=(TPL-T(2))/(T(1)-TPL)
43 U(1)=US*(1.+V)/(UT+V*UG)
44 GO TO 20
45 U(1)=UG
46 IF(T(1)-TMI) 22, 22, 23
47 Q(1)=QT
48 GO TO 26
49 IF(T(1)-TMA) 24, 25, 25
50 Q(1)=QF
51 GO TO 26
52 Q(1)=QG
53 S=1.+(CC+PP+S1)/(Q(1)*S)
54 M=2. BM/(Q(1)*S)
55 A1=HMU(1)/S
56 B1=1. +H2*(U(1)+S*UU/S1)
57 C1=HMU/S1
58 E1(1)=A1/(B1-C1+E1(K1))
59 F1(1)=(T(1)+C1*F1(K1))/(B1-C1+E1(K1))
60 N=K-1
61 DO 27 I=2, N
62 IF(T(I)-TPL-0.1E-2) 20, 20, 29
63 U(I)=UT
64 GO TO 32
65 IF(T(I+1)-TPL) 30, 31, 31
66 V=(TPL-T(I+1))/(T(I)-TPL)
67 U(I)=US*(1.+V)/(UT+V*UG)
68 GO TO 32
69 U(I)=UG
70 IF(T(I)-TMI) 33, 33, 34
71 Q(I)=QT
72 GO TO 37
73 IF(T(I)-TMA) 35, 36, 36
74 Q(I)=QF
75 GO TO 37

```

Рис 14.9

```

35 Q(1)=QG
36 M=BM/(Q(1)*S)
37 A1=HMU(1)/S
38 B1=1. +H2*(U(1)+U(1))
39 C1=HMU(1-1)
40 E1(1)=A2/(B2-C2+E1(1-1))
41 F1(1)=(T(1)+C2*F1(1-1))/(B2-C2+E1(1-1))
42 IF(T(K)-TMI) 38, 38, 39
43 Q(K)=QT
44 GO TO 42
45 IF(T(K)-TMA) 40, 41, 41
46 Q(K)=QF
47 GO TO 42
48 Q(K)=QG
49 S=1.+(2. MCMPTMBM)/(Q(K)*S)
50 M=2. BM/(Q(K)*S)
51 A1=0.
52 T62=0.
53 ***** AL2, T62 МОЖНО ЗАДАТЬ В ВНЕШНЮЮ ФУНКЦИЮ ОТ X *****
54 B1=1. +H2*(AL2+U(K-1)/S)
55 C1=HMU(K-1)/S
56 D1=T(K)+H2*AL2*T62
57 T(K)=(D1+C1*F(K-1))/(B1-C1+E(K-1))
58 L=K-1
59 IF(L-1) 15, 8, 8
60 T(L)=E(L)*T(L+1)+F(L)
61 L=L-1
62 GO TO 11
63 T1(K1)=E1(K1)*T(1)+F1(K1)
64 L=K1-1
65 IF(L-1) 9, 45, 45
66 T1(L)=E1(L)*T1(L+1)+F1(L)
67 L=L-1
68 GO TO 43
69 IF(X-XP+1.E-6) 5, 7, 7
70 PRINT 1, X
71 PRINT 1, (T1(J), J=1, K1)
72 PRINT 1, (T(I), I=1, K)
73 PRINT 1, AL1, T61, AL2, T62
74 XP=XP+DMP
75 GO TO 9
76 STOP
77 END

```

Рис. 14.9. Продолжение

поверхности трубы Т в каждом из десяти сечений Х, отсчитываемых от входа в трубу, равна:

Х, мм	25	45	85	155	250	370	490	610	695	715
Номер термопары	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Т, °С	27	30	32,5	35	38,5	40	41,5	44,5	46,5	42

Температуры воздуха в конечном и начальном сечениях рабочего участка трубы, измеренные термопарами № 11 и 12, составляют 31,5 и 19 °С соответственно. Падение напряжения в цепи нагревания трубы 1,36 В, разность полного и статического давлений, измеренная трубкой Пито, 163 мм вод. ст. = 1598 Па, падение давления на рабочем участке трубы 223 мм вод. ст. = 2187 Па.

При обработке результатов эксперимента распределение температур по длине трубы аппроксимировать приближенной зависимостью, подобрав соответствующие неизвестные коэффициенты методом наименьших квадратов. Вычислить

экспериментальные значения локальных коэффициентов теплоотдачи в десяти указанных выше сечениях трубы. Используя критериальную формулу $Nu_{ж} = 0,021 Re_{ж}^{0,8} Pr_{ж}^{0,43}$, определить расчетное значение коэффициента теплоотдачи на основном участке трубы. Вывести на терминал значения всех других неизвестных величин, определение которых предусмотрено в программе.

Для решения задачи на ЭВМ воспользоваться программой, приведенной на рис. 14.10.

В программе, предназначенной для обработки результатов экспериментального исследования теплоотдачи на начальном участке трубы, распределение температур в стенке трубопровода по длине аппроксимируется зависимостью

$$T = A_1 X^B e^{C (\ln X)^2},$$

где X — продольная координата, отсчитываемая от входа в трубу; T — температура стенки трубы; A_1 , B и C — постоянные, определяемые методом наименьших квадратов:

$$\ln T = A + B \ln X + C (\ln X)^2, \quad (A = \ln A_1).$$

Для определения A , B и C решается система линейных нормальных уравнений, имеющая следующий вид:

$$NA + SB + HC = V;$$

$$SA + HB + OC = F;$$

$$HA + OB + EC = FI.$$

$$\begin{aligned} \text{В этой системе } S &= \sum_{i=1}^N \ln X_i; \quad H = \sum_{i=1}^N (\ln X_i)^2; \quad O = \\ &= \sum_{i=1}^N (\ln X_i)^3; \quad E = \sum_{i=1}^N (\ln X_i)^4; \quad V = \sum_{i=1}^N \ln T_i; \quad F = \sum_{i=1}^N \ln X_i \times \\ &\times \ln T_i; \quad FI = \sum_{i=1}^N (\ln X_i)^2 \ln T_i, \text{ где } N \text{ — число соответствующих} \end{aligned}$$

условных уравнений, равное числу сечений трубы, в которых с помощью термопар измеряется температура стенки (в опытах $N = 10$).

О величине отклонения температур $T(i)$, полученных методом наименьших квадратов, от исходных значений $T2(i)$ можно судить по данным, полученным при обработке результатов эксперимента.

Для вычисления опытных значений коэффициентов теплоотдачи на начальном участке трубы решается двухмер-

```

C
  DIMENSION T(12),X(10),ALE(10),BAX(10),K1(72),T1(72),T2(12),
  ABETA(72),BK(72),BLK(72),BT1(72),ALE1(72)
  REAL KS1,K,L,T,HTU,HTU,LAMBDA,LSRE,NU,LSMU,L(10),LX(10),
  ALST(10),HUE(10),LGAE(10),LSK1(72),LST1(72)
C
4  FORMAT(A4)
5  FORMAT(F6.0)
6  FORMAT(F6.4)
7  FORMAT(I)
C
  DATA P1,R,D,LT/3.141593,3.44E-2,0.3E-3,0.72/
  DATA X/25.,43.,65.,135.,250.,370.,490.,610.,695.,715./
  DATA L/25.,30.,35.,82.5,107.5,2*120.,102.5,92.5,25./
  DATA PS1,KS1,K,PHG,TAT/1.0,0.8,0.25,700.,20./
  DATA GE/D2,DKE,EPS,TPR/9.00665,9.3E-3,1.E-2,0.7,16./
C
8  TYPE 9
9  FORMAT(
  &' ВСЕ ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ.'/)
10 TYPE 10
11 FORMAT('X' F10.0)
12 ACCEPT 7, J1
13 TYPE 14
14 FORMAT('X1.ПАДЕНИЕ НАПРЯЖЕНИЯ В ЦЕНТРЕ НАГРЕВАННОЙ ТРУБЫ',
  &' (C) = ')
15 TYPE 16
16 FORMAT('X3.РАЗНОСТЬ ПОЛНОГО И СТАТИЧЕСКОГО ДАВЛЕНИЯ',
  &' (MM Hg, CT. 3) = ')
17 ACCEPT 5, IP1U
18 TYPE 17
19 FORMAT('X4.ПАДЕНИЕ ДАВЛЕНИЯ ПО ДЛИНЕ ТРУБЫ (MM Hg, CT. 3)',
  &' = ')
20 ACCEPT 5, IP2U
21 TYPE 19
22 FORMAT(
  &' 10.ПОКАЗАНИЯ ТЕРМОПАР',
  &' (ПОКАЗАНИЯ НЕИСТРАВНЫХ ТЕРМОПАР СЧИТАТЬ РАВНЫМИ 0/100)')
23 DO 22 I=1,12
24 TYPE 20, I
25 FORMAT(
  &' X' ТЕМПЕРАТУРА ИЗМЕРЯЕМАЯ '12'-А ТЕРМОПАРОЙ (C) = ')
26 ACCEPT 5, T(I)
27 CONTINUE
C
28 DO 23 I=1,12
29 T2(I)=T(I)
30 Z=0.
31 DO 24 I=1,10
32 Z=Z+T2(I)*L(I)
33 T2U=Z/720.
34 I=0
35 N=0
36 M=0
37 IF(I=10) 26,26,34
38 IF(I2.-T(I)) 27,27,28
39 LSK(I)=ALOG(X(I))
40 LST(I)=ALOG(T(I))
41 N=N+1
42 GO TO 25
43 LSK(I)=0.
44 LST(I)=0.
45 M=M+1
46 IF(M=3) 25,25,30
47 TYPE 32
48 FORMAT(
  &' ИЗ ТЕРМОПАР N 1-10 НЕ РАБОТАЮТ БОЛЕЕ ТРЕХ.',
  &' ДЛЯ ОБРАБОТКИ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТА НЕДОСТАТОЧНО.',
  &' ДАННЫХ.'/)
49 GO TO 10
50 GO TO 10
51 GO TO 10
52 GO TO 10
53 GO TO 10
54 GO TO 10
55 GO TO 10
56 GO TO 10
57 GO TO 10
58 GO TO 10
59 GO TO 10
60 GO TO 10
61 GO TO 10
62 GO TO 10
63 GO TO 10
64 GO TO 10
65 GO TO 10
66 GO TO 10
67 GO TO 10
68 GO TO 10
69 GO TO 10
70 GO TO 10
71 GO TO 10
72 GO TO 10
73 GO TO 10
74 GO TO 10
75 GO TO 10
76 GO TO 10
77 GO TO 10
78 GO TO 10
79 GO TO 10
80 GO TO 10
81 GO TO 10
82 GO TO 10
83 GO TO 10
84 GO TO 10
85 GO TO 10
86 GO TO 10
87 GO TO 10
88 GO TO 10
89 GO TO 10
90 GO TO 10
91 GO TO 10
92 GO TO 10
93 GO TO 10
94 GO TO 10
95 GO TO 10
96 GO TO 10
97 GO TO 10
98 GO TO 10
99 GO TO 10
100 GO TO 10

```

Рис 14.10

```

E=0.
BT=0.
DO 35 I=1,10
S=S+LGN(I)
U=U+LGT(I)
M=M+LGN(I)*M2
O=O+LGN(I)*M3
E=E+LGN(I)*M4
F=F+LGT(I)*LGN(I)
FI=FI+LGT(I)*LGN(I)*M2
35 CONTINUE
AN=FLOAT(N)
SI=S/M2-AN*M1
HI=HI+AN*M2
EI=E/S-F*AN
SJ=S/M2-S*O
HJ=H/M2-S*E
EJ=H/F-S*F1
C=(S-ME1-SI*EJ)/(S-MHI-SI*HJ)
B=(EI-HI*AC)/SI
A=(F-HB-ONC)/S
SU=S.
DO 36 I=1,10
LGN(I)=ALOG(X(I))
T(I)=EXP(A+B*LGN(I)+C*LGN(I)*M2)
SU=SU+((T2(I)-T(I))*M2)*L(I)
SOP=SQRT(SU/728.)
AJ=0.
Z3=0.
DO 37 J=1,72
AJ=FLOAT(J)
X1(J)=10.+(AJ-0.5)*M2*M1.E+3
LGN1(J)=ALOG(X1(J))
T1(J)=EXP(A+B*LGN1(J)+C*LGN1(J)*M2)
Z3=Z3+T1(J)
37 CONTINUE
TU=Z3/72.
IF(2.-T(12)) 39,39,38
T(12)=TAT
39 IF(2.-T(11)) 42,42,40
40 W1=KSI*SQRT(2.*GEN*PI*U/1.17)
Q1=U*M2/R-KH*(TU-T(12))
T(11)=T(12)+4.*Q1/(1.17*PI*1005.*M1*M2)
F61=1.
Q=(U*M2)/4
DP1=GEN*PI*U
DP2=GEN*PI*U
T11=PSI*T(11)
TF=0.5*(T11+T(12))
P=133.322*PHG
RO=P/((273.15+TF)*287.)
U=M51*SQRT(2.*DP1/RO)
G=U*RO*PI*(DM2)/4.
F1=PI*DM2*H
F2=PI*DM2*H
FT=PI*(DM2-DM2)/4.
DO 40 J=2,71
BETA(J)=1./((0.5*(T1(J)+TAT)+273.15)
OK(J)=5.636523*(T1(J)-TAT)*(BETA(J)*(T1(J)-TAT)/
402)+0.25
QLUX(J)=5.699*EPSN*((T1(J)+273.15)/100.)*M4-((TAT+273.15)
8-100.)*M4)
BT1(J)=T1(J)-T(12)-(T11-T(12))*M1(J)/730.
ALE1(J)=(TPR*(T1(J)-2.*T1(J)+T1(J-1))+FT/DX-(OK(J)+
8QLUX(J)*M2+ONK/LT)/(BT1(J)*F1)
40 CONTINUE
ALE(1)=ALE1(2)
ALE(2)=ALE1(4)
ALE(3)=ALE1(8)
ALE(4)=ALE1(16)
ALE(5)=0.5*(ALE1(32)+ALE1(25))
ALE(6)=0.5*(ALE1(64)+ALE1(37))
ALE(7)=0.5*(ALE1(128)+ALE1(49))
ALE(8)=0.5*(ALE1(256)+ALE1(61))
ALE(9)=ALE1(68)
ALE(10)=ALE1(71)
V1=0.

```

Рис. 14.10. Продолжение

```

V2=0.
V3=0.
Z1=0.
Z2=0.
Q2=Q*(LT-2.*ONK)/LT
DO 50 J=2,71
V1=V1+BT1(J)
V2=V2+ALE1(J)
V3=V3+ALE1(J)*BT1(J)*F1
Z1=Z1+OK(J)*F2
Z2=Z2+QLUX(J)*F2
50 CONTINUE
DTSR=V1/70.
ALSRE=V2/70.
QTR=V3/100./Q2
QKSR=Z1/100./Q2
QLUSR=Z2/100./Q2
MIU=(1.497E-6)*((273.15+TF)*M1.5/(395.15+TF)
MIU=MIU/RO
LAMEDA=(2.539E-3)*((273.15+TF)*M1.5/(471.79+TF)
PR=1005.*MIU/LAMEDA
RE=U*RO/D*MIU
LGRE=ALOG10(RE)
NU=0.021*RE*M2.8*PR*M2.43
LGNU=ALOG10(NU)
AL=NU*LAMEDA/D
DO 52 I=7,9
NUE(I)=ALE(I)/D/LAMEDA
LGNU(I)=ALOG10(NUE(I))
DMU(I)=100.*(NUE(I)-NU)/NU
52 CONTINUE
DZETA=2.*DP2/D/(LT*RO*M2)
ALTRE=LAMEDA*DZETA*RE*PR/((8.56+101.6*
ASORT(DZETA*8.)*(PR*M2/(2./3.))-1.))M2)
DZETAT=1./((1.82*LGRE-1.64)*M2)
DP21=DZETAT*RO*LT*M2/(2.*D)
C-----
56 TYPE 56
FORMAT(
  1/' РЕЗУЛЬТАТЫ ОБРАБОТКИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ'/)
TYPE 58, J1,Q,DP1,DP2,T11,TF,TU,RO,M,DTSR
58 REFIN N '12'
  1/' 2.КОМПОЗИЦИЯ ПОТРЕБЛЯЕМОГО ТЕПЛОСЕНСОРНОГО ТРУБКОМ = 'F7.3' BT '
  1/' 3.РАЗНОСТЬ ПОЛНОГО И СТАТИСТИЧЕСКОГО ДАВЛЕНИЯ = 'F7.1' PA '
  1/' 4.ДАВЛЕНИЕ ДАВЛЕНИЯ ПО ДЛИНЕ ТРУБЫ = 'F7.1' PA '
  1/' 5.ТЕМПЕРАТУРА ВОЗДУХА НА ВЫХОДЕ ИЗ ТРУБЫ (T11) = 'F7.1' C '
  1/' 6.ТЕМПЕРАТУРА ВОЗДУХА = 'F7.1' C '
  1/' 7.СРЕДНЯЯ ТЕМПЕРАТУРА ВОЗДУХА = 'F7.1' C '
  1/' 8.ПЛОТНОСТЬ ВОЗДУХА = 'F7.1' C '
  1/' 9.СРЕДНЯЯ СКОРОСТЬ ВОЗДУХА В ТРУБЕ = 'F7.3' M/S '
  1/' 11.СРЕДНЯЯ ТЕМПЕРАТУРА НАЛОП = 'F7.1' K '
C-----
60 TYPE 60
FORMAT(
  1/' 12.ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ЗНАЧЕНИЯ ЛОКАЛЬНЫХ КОЭФФИЦИЕНТОВ',
  1/' ТЕПЛОТОТАЛАН В СЕЧЕНИЯХ N 1-10. BT/(M2.K)'/)
62 TYPE 62,(ALE(I),I=1,10)
FORMAT(1X,10F10.1)
64 TYPE 64
FORMAT(//X) ДЛЯ ПРОДОЛЖЕНИЯ ВЫВОДА ДАННЫХ НАЧАТЬ (BK) '
ACCEPT 7, II
C-----
68 TYPE 68, ALSRE,MIU,LAMEDA,PR,RE
FORMAT(
  1/' 13.ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ЗНАЧЕНИЕ СРЕДНЕГО КОЭФФИЦИЕНТА',
  1/' ТЕПЛОТОТАЛАН = 'F7.1' BT/(M2.K) '
  1/' 14.КИНЕМАТИЧЕСКАЯ ВЯЗКОСТЬ = 'E11.4' M2/C '
  1/' 15.ТЕПЛОПРОВОДИМОСТЬ = 'F7.4' BT/(M.K) '
  1/' 16.КРИТЕРИЙ ПРАУДЛА = 'F7.3' '
  1/' 17.КРИТЕРИЙ РЕНОЛЬДСА = 'F7.8' '
C-----
70 IF(1.E+4-RE)70,70,74
70 TYPE 72
72 FORMAT(//X) 18.РЕЖИМ ТЕЧЕНИЯ ВОЗДУХА В ТРУБЕ ТУРБУЛЕНТНЫЙ//
60 TO 76
74 TYPE 75
75 FORMAT(//X) 18.РЕЖИМ ТЕЧЕНИЯ ВОЗДУХА В ТРУБЕ ПЕРЕХОДНЫЙ//

```

Рис. 14.10. Продолжение

```

C-----
76 TYPE 78, NU, AL
78 FORMAT(
8, ' 20. РАСЧЕТНОЕ ЗНАЧЕНИЕ ЧИСЛА НУССЕЛЬТА = 'F6.2,
8, ' 21. РАСЧЕТНОЕ ЗНАЧЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛОТАЧЕИ = 'F6.1,
8, ' BT/(K2.K)')
C-----
80 TYPE 80
80 FORMAT(
8, ' 22. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ЗНАЧЕНИЯ ЧИСЕЛ НУССЕЛЬТА В СЕЧЕНИЯХ',
8, ' N 7-9')
82 TYPE 82, (NU(I), I=7, 9)
82 FORMAT(1X, 3F10.2)
84 TYPE 84
84 FORMAT('X' /A) /A) ДЛЯ ПРОДОЛЖЕНИЯ ВВОДА ДАННЫХ НАЧАТЬ (BK) '
ACCEPT 7, JJ
86 TYPE 86
86 FORMAT('X' /A) /A) ОТКЛОНЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ЗНАЧЕНИЙ ЧИСЕЛ',
8, ' НУССЕЛЬТА ОТ РАСЧЕТНЫХ В СЕЧЕНИЯХ N 7-9 X')
88 TYPE 88, (DN(I), I=7, 9)
88 FORMAT(1X, 3F9.2)
90 TYPE 90, LGRE, LGNU, LGNU(I), LGNU(8), LGNU(9)
90 FORMAT(
91, ' ПОЛЮГРИМ КРИТЕРИЯ РЕЙНОЛЬДСА = 'F6.3,
91, ' ПОЛЮГРИМ РАСЧЕТНОГО ЗНАЧЕНИЯ ЧИСЛА НУССЕЛЬТА = 'F6.3,
91, ' ПОЛЮГРИМ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ЗНАЧЕНИЙ ЧИСЕЛ НУССЕЛЬТА',
91, ' (ОСНОВНОЙ УЧАСТОК ТРУБЫ СЕЧЕНИЯ N 7-9) = 'F6.3)
C-----
92 TYPE 92, P, G, DZETA, ALTRE, N, A, B, C, DZETAT, DP2T, QTR, QKSR,
92 QLSUR
92 FORMAT(
8, ' P = 'F7.8' G = 'F8.6' DZETA = 'F7.5' ALTRE = 'F5.1,
8, ' N = 'F13' A = 'F9.5' B = 'F12.8' C = 'F10.6' DZETAT',
8, ' = 'F7.5' DP2T = 'F6.1' QTR = 'F4.1' QKSR = 'F4.1,
8, ' QLSUR = 'F4.1)
94 TYPE 94, (T2(I), I=1, 12)
94 FORMAT(1X, 12F6.1)
96 TYPE 96, (T(I), I=1, 12)
96 FORMAT(1X, 12F6.1)
98 TYPE 98, B, D-LT, PSI, KSI, K, PHG, TAT, B2, DN, EPS, TPR, T2W, SKP
98 FORMAT(2F8.4, 2F6.2, 2F7.3, 2F7.8, 2F6.1, 2F8.4, 2F6.2, 2F6.1,
98, ' F7.1, F8.4)
100 TYPE 100
100 FORMAT('X' /A) /A) ЭТО ПОСЛЕДНИЙ РЕЖИМ ? (AA=JET)
ACCEPT 4, JN
IF(DN.NE. 'AA'.AND.DN.NE. 'NET') GO TO 90
IF(DN.EQ. 'NET') GO TO 8
END

```

Рис. 14.10. Продолжение

ная обратная задача теплопроводности (см. программу). Для этой цели трубопровод разбивается на 72 элемента, в каждом из которых учитывается количество теплоты, теряемое за счет естественной конвекции и излучения с внешней цилиндрической поверхности элемента в окружающую среду, а также количество теплоты, передаваемое от соседних элементов путем теплопроводности через торцовые поверхности данного элемента. Температура каждого из элементов считается известной (из опыта).

Указанный выше метод обработки измерений, основанный на теории ошибок, позволяет использовать результаты эксперимента и в том случае, если несколько термодпар (не более трех из десяти) не работают. При известном расходе воздуха измерение температуры воздуха на выходе из рабочего участка трубы [T (11)] не является обязательным.

В том случае, когда неисправна термодпара для измерения температуры T (11), в программе предусмотрено вычисление температуры T (11) по уравнению теплового баланса. При отсутствии данных о температуре T (12) она принимается равной температуре окружающей среды [T (12) = TAT].

Помимо пунктов, наименование которых указано в блоках ввода исходных данных и печати результатов (см. программу), на печать выводится также следующая информация:

P — атмосферное давление, Па;

G — расход воздуха, кг/с;

DZETA — коэффициент трения;

ALTRE — коэффициент теплоотдачи, полученный по падению давления вдоль трубы на основе аналогии Рейнольдса, Вт/(м² · К);

N — число условных уравнений;

A, B и C — значения постоянных в уравнении, аппроксимирующем распределение температур;

DZETAT — теоретическое значение коэффициента трения;

DP2T — теоретическое значение падения давления на рабочем участке трубы, Па;

QTR — количество теплоты, поступающее внутрь трубы путем конвекции (в % от количества теплоты, подводимого путем нагревания рабочего участка трубы электрическим током);

QKSR — количество теплоты, теряемое за счет естественной конвекции с внешней поверхности трубы, %;

QLSUR — количество теплоты, теряемое за счет излучения, %;

T2 (I) — опытные значения температур стенки трубы в десяти сечениях, °C;

T (I) — значения температур стенки трубы, соответствующие аппроксимирующей зависимости, °C;

R — электрическое сопротивление рабочего участка трубы, Ом;

D — внутренний диаметр трубы, м;

LT — длина рабочего участка трубы, м;

PSI — коэффициент в формуле для расчета скорости воздуха по перепаду давления в трубке Пито;

KSI — поправочный коэффициент, учитывающий погрешность при измерении температуры воздуха T (11) на выходе из рабочего участка;

PHG — атмосферное давление, мм. рт. ст.;

TAT — температура окружающей среды, °C;

D2 — внешний диаметр трубы, м;

DX — шаг по координате (вдоль трубы), м;

EPS — степень черноты внешней поверхности трубы;

TPR — теплопроводность материала трубы, Вт/(м · К);

T2W — средняя температура стенки трубы [среднее значение $T_2(I), ^\circ\text{C}$]; $1 \sum_1^{10} T_2(I) \cdot L(I)/(LT)$ (см. программу);

SKP — средняя квадратичная погрешность, связанная с заменой опытных значений $T_2(I)$ значениями $T(I), ^\circ\text{C}$.

§ 14.4. Контактный теплообмен между твердыми телами

14.66. Оценить термосопротивление R_k в вакууме и атмосферном воздухе контакта поверхностей двух пластин, находящихся под удельной нагрузкой $p_k = 2,0$ МПа при температуре 300°C . Материал пластин — сталь 30 ($\lambda = 41,9$ Вт/(м · К), $\sigma_s = 480$ МПа), шероховатость поверхностей $Ra_i = 30$ мкм ($i = 1, 2$).

Решение. Для воздуха $\lambda_c = 44,5 \cdot 10^{-3}$ Вт/(м · К). В соответствии с рекомендациями [12] $r^* = 35 \cdot 10^{-6}$ м. Привести последовательность расчета:

$$\eta = p_k / (3\sigma_s) = 2 / (3 \cdot 480) = 1,39 \cdot 10^{-3};$$

$$n = 1045 + 56,9 p_k - 1,43 p_k^2 = 1045 + 56,9 \cdot 2 - 1,43 \cdot 2^2 = 1160; \quad (14.7)$$

$$A = (1 - 1,41 \sqrt{\eta} + 0,3\eta^{1,5})^{-1} [1 + 0,5\eta^{-1} (1 - \eta)^{-1} \times \\ \times \Sigma Ra_i]^{-1} = (1 - 1,41 \sqrt{1,39 \cdot 10^{-3}} + 0,3 (1,39 \cdot 10^{-3})^{1,5})^{-1} \times \\ \times [1 + 0,5 \cdot 1,39 \cdot 10^{-3} (3,5 \cdot 10^{-5})^{-1} (1 - 1,39 \cdot 10^{-3})^{-1} 3 \times \\ \times 10^{-5} \cdot 2]^{-1} = 1,054; \quad (14.8)$$

$$R_k = [4A\lambda_1 \lambda_2 \eta^{0,001n} / (\pi r \Sigma \lambda_i) + B\lambda_c / \Sigma Ra_i]^{-1}, \quad (14.9)$$

где $\Sigma y_i = y_1 + y_2$; $B = 1,4$;

$$R_{k, \text{пар}} = [4 \cdot 1,054 \cdot 41,9 \cdot 41,9 (1,39 \cdot 10^{-3})^{0,001 \cdot 1160} / (\pi \cdot 3,5 \times \\ \times 10^{-5} \cdot 2 \cdot 41,9)]^{-1} = 2,57 \cdot 10^{-3} (\text{м}^2 \cdot \text{К}) / \text{Вт},$$

$$R_{k, \text{возд}} = [R_{k, \text{пар}}^{-1} + B\lambda_c / \Sigma Ra_i]^{-1} = [10^3 / 2,57 + 1,4 \cdot 44,5 \times \\ \times 10^{-3} / (2 \cdot 3 \cdot 10^{-5})]^{-1} = 7,0 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2 \cdot \text{К} / \text{Вт}.$$

* В этом параграфе r — радиус пятна контакта.

14.67. Решить задачу 14.66, считая одну пластину выполненной из Al_2O_3 ($\lambda = 17,5$ Вт/(м · К), $\sigma_s = 210$ МПа, $Ra = 1,9$ мкм), другую — из графита ($\lambda = 113$ Вт/(м · К), $\sigma_s = 40$ МПа, $Ra = 7,5$ мкм).

14.68. Определить плотность теплового потока q_k , проходящего в вакууме через плоскость контакта двух тонких пластин, находящихся при средней температуре 650°C под удельной нагрузкой $2,5$ МПа. Разность между температурами пластин $\Delta T_k = 1$ К. Материалы пластин — сталь 12X18H9T ($\sigma_s = 150$ МПа; $\lambda = 23,5$ Вт/(м · К)) и BeO ($\sigma_s = 600$ МПа, $\lambda = 25,5$ Вт/(м · К)). Какое значение ΔT_k установится, если при $q_k = \text{const}$ удельную нагрузку увеличить в 6 раз?

14.69. При каком давлении p_k на тонкие прослойки из молибдена ($\lambda = 124$ Вт/(м · К); $\sigma_s = 1800$ МПа) и графита ($\lambda = 76$ Вт/(м · К), $\sigma_s = 40$ МПа) плотность теплового потока между ними в вакууме составляет $7,5 \cdot 10^3$ Вт/м² при средней температуре 650°C и разности температур $\Delta T_k = 0,5$ К? Найти также термическую проводимость мест фактического контакта пластин при $p_k = 20$ МПа.

14.70. Для пластин из молибдена ($\lambda = 124$ Вт/(м · К), $\sigma_s = 1800$ МПа) и Al_2O_3 ($\lambda = 7,86$ Вт/(м · К)) при $T_k = 925$ К в вакууме получены экспериментальные значения контактного термического сопротивления: $R_{k, \text{э}} \times 10^4 = 7,5; 3,2; 2,7; 2,0$ м² · К/Вт при удельных нагрузках $p_k = 0,625; 5,0; 10,0; 20,0$ МПа соответственно. Шероховатость поверхностей $Ra = 1,0$ мкм. Определить предел прочности для Al_2O_3 из условия наилучшего относительно приближения (%) экспериментальных результатов $R_{k, \text{э}}$ к соответствующим значениям $R_{k, \text{р}}$, получаемым по формуле (14.9) (см. задачу 14.66); для пар металл — твердая керамика следует принимать $r = (10 \dots 15) \cdot 10^{-6}$ м.

14.71. В плоской термоэлектрической батарее перспективно использование электроизоляционного теплоконтактного перехода между металлической поверхностью и покрытием из алунда (Al_2O_3), плазменно напыляемого на стальную подложку (такое покрытие имеет высокую термостойкость и механическую прочность). Экспериментально получено, что термосопротивление названного перехода в воздухе с температурой 250°C $R_k = 8 \cdot 10^{-4}$ м² · К/Вт при толщине покрытия $2 \cdot 10^{-4}$ м; $p_k = 2$ МПа и шероховатости металлической поверхности $Ra = 1,0$ мкм. Вычислить R_k для вакуума. Оценить шероховатость пористой структуры алунда и тем самым показать необходимость дополнительного использования эластичных прокладок или покры-

тий с целью снижения R_k . Принять $\lambda = 18,4 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$; $\sigma_s = 460 \text{ МПа}$ для 12Х18Н9Т и $\lambda = 18,6 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$; $\sigma_6 = 210 \text{ МПа}$ для Al_2O_3 .

14.72. В плоской термоэлектрической батарее оба электроизоляционных перехода представляют собой плазменно напыленный на коммутационные пластины алунд (Al_2O_3) толщиной $2 \cdot 10^{-4} \text{ м}$. Покрытие пропитано кремнийорганическим лаком (для улучшения диэлектрических свойств) и контактирует с поверхностями теплопроводов из 12Х18Н9Т через герметик У-1-18. При этом термосопротивления переходов, равные $2 \cdot 10^{-4}$ и $3 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2 \cdot \text{К/Вт}$ со стороны холодного ($T_{хп} = 323 \text{ К}$) и горячего ($T_{гп} = 523 \text{ К}$) теплопроводов соответственно (как в вакууме, так и в воздухе), вместе составляют 15% от общего термосопротивления батареи. Известно, что выражение для абсолютного электрического к.п.д. термоэлектродгенератора имеет вид

$$\eta_{a,з} = \eta_{o,з} (1 - T_x/T_r), \quad T_r < T_{гп}, \quad T_x > T_{хп},$$

где $\eta_{o,з}$ — величина, в основном зависящая от физических свойств материалов электродов; T_r и T_x — температуры «горячей» и «холодной» коммутационных пластин.

Во сколько раз уменьшится значение $\eta_{a,з}$ в вакууме и воздухе, если алундированная и металлическая поверхности соприкасаются при удельной нагрузке $p_k = 2 \text{ МПа}$ без использования лака и герметика и имеют суммарную шероховатость $\Sigma Ra_i = 3 \cdot 10^{-4} \text{ м}$. Принять: $\sigma_s = 460 \text{ МПа}$ и $\lambda = 15,5; 18,4; 21,5 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$ для стали; $\sigma_s = 210 \text{ МПа}$ и $\lambda = 31,4; 18,6; 10,8 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$ для Al_2O_3 при $T = 323, 523, 723 \text{ К}$ соответственно.

14.73. В батарее, описанной в задаче 14.72, с целью повышения температуростойкости контакта «горячей» коммутационной пластины с теплопроводом вместо кремнийорганического лака возможно использование органосиликатного материала ЭНБ-32. Как при этом изменится значение $\eta_{a,з}$ и какой должна быть температура «горячего» теплопровода $T_{гп}$, если температуру «горячей» коммутационной пластины поддерживать равной $T_r = 723 \text{ К}$? Экспериментально получено, что термосопротивление «горячего» перехода при этом равно $7,5 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2 \cdot \text{К/Вт}$ в вакууме и $6,1 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2 \cdot \text{К/Вт}$ в воздухе.

14.74. При использовании сосудов Дюара в криогенной технике в качестве опор для крепления внутреннего сосуда достаточно эффективно применение набора пластин, выполненных из стали 12Х18Н9Т. Согласно опытным данным ка-

жущаяся теплопроводность набора пластин толщиной $0,1 \text{ мм}$ в 30 раз ниже теплопроводности сплошного металла. Оценить шероховатость пластин при удельной нагрузке на них $p_k = 3 \text{ МПа}$ и температуре 20°C . Принять, что для стали $\sigma_s = 655 \text{ МПа}$; $\lambda = 15,2 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$.

14.75. В сосудах для хранения сжиженных газов внутренняя оболочка часто крепится к наружной на стальных подвесках в виде прямых стержней или цепей с овальными звеньями. При удельной нагрузке p контактное термосопротивление $R_{1к}$ между парой звеньев стальной цепи [с диаметром прутка $d = (3...12) \text{ мм}$] и термосопротивление теплопроводности $R_{1т}$ одного звена цепи (из прутка длиной l) могут быть рассчитаны по формулам: $R_{1к} = 2,08(E/P)^{0,34}/\lambda$, где $P = \pi l d^2/2$, и $R_{1т} = l/(\pi d^2 \lambda)$ соответственно. Для цепи, каждое звено которой выполнено из прутка диаметром 5 мм , длиной 206 мм , сравнить ее термосопротивление теплопроводности R_t с ее полным термосопротивлением R_1 при удельной нагрузке $p_1 = 2,7 \text{ МПа}$. Пояснить, почему при $p_2 \geq 30 \text{ МПа}$ (полное термосопротивление R_2) подвески резервуаров рекомендуется выполнять в виде прямых стержней. Принять, что для стали 12Х18Н9Т, из которой изготовлены звенья и стержни, $E = 2,02 \cdot 10^5 \text{ МПа}$; $\lambda = 15 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$.

14.76. Контактные поверхности насадного обода и внутренней части диска турбины имеют номинальный диаметр $d_k = 0,055 \text{ м}$ с возможными положительными отклонениями: $(0...3) \cdot 10^{-3} \text{ м}$ для отверстия и $(2...4) \cdot 10^{-3} \text{ м}$ для вала. Возможная суммарная шероховатость контактных поверхностей $\Sigma Ra_i = 10...20 \text{ мкм}$. Минимальный и максимальный диаметры соединения $d_1 = 0,015 \text{ м}$ и $d_2 = 0,1 \text{ м}$, его средняя температура 150°C , материал — сталь 45 [коэффициент линейного расширения $\alpha_i = 1,22 \cdot 10^{-5} \text{ К}^{-1}$, модуль упругости $E_i = 1,96 \cdot 10^5 \text{ МПа}$, коэффициент Пуассона $\mu_i = 0,3$, теплопроводность $\lambda_i = 47,5 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$, где $i = 1, 2$; $\sigma_s = 600 \text{ МПа}$]. Оценить максимально и минимально возможные значения p_k и ΔT_k , соответствующие (в атмосфере воздуха) значению плотности теплового потока, направленного внутрь соединения, $q_k = 144 \text{ кВт/м}^2$.

Решение. Принципиальной особенностью контактирования поверхностей здесь является выполнение зависимости типа

$$p_k = [d_k^{-1} (\delta_0 - 1,2 \Sigma Ra_i) + (\alpha_1 - \alpha_2) (T_1 - 273) + \alpha_2 \Delta T_k] \{ \Sigma E_i^{-1} [\zeta_i + (-1)^i \mu_i] \}^{-1}; \quad (14.10)$$

$$\Delta T_K = T_1 - T_2 = R_K q_K; \zeta_i = (1 + D_i)/(1 - D_i);$$

$$\ln D_i = 2(-1)^i \ln(d_K/d_i). \quad (14.11)$$

Здесь δ_0 — диаметральный натяг (м) при 273 К, устанавливаемый предварительным измерением.

Последовательная подстановка в (14.10) выражений (14.11) для ΔT_K и (14.9) (см. задачу 14.66) для R_K при $B = 2$ приводит к следующему результату:

$$p_K^2 + p_K(C/G + D/F) - E/(FG) = 0, \quad E = \alpha_2 q_K - CD; \quad (14.12)$$

$$C = 2\lambda_c / \Sigma Ra_i; \quad D = (\alpha_2 - \alpha_1)(T_1 - 273) - (\delta_0 - 1,2\Sigma Ra_i)/d_K;$$

$$G = 4A\lambda_1 \lambda_2 (p_K / 3\sigma_B)^{0,001n} / (p_K \pi r \Sigma \lambda_i);$$

$$F = \Sigma E_i^{-1} [\zeta_i + (-1)^i \mu_i]. \quad (14.13)$$

Уравнение (14.12) с независимыми от p_K величинами C , D , F , E удобно для определения p_K методом итераций. А именно, задавшись в первом приближении каким-либо значением $\tilde{p}_K^{(1)}$, следует вычислить $n^{(1)}$, $A^{(1)}$ по (14.7), (14.8) (см. задачу 14.66), $G^{(1)}$ по (14.13) и, наконец, найти $p_K^{(1)}$ как корень квадратного уравнения (14.12).

В следующем приближении можно, например, принять

$$\tilde{p}_K^{(2)} = 0,5(\tilde{p}_K^{(1)} + p_K^{(1)}); \quad (14.14)$$

вычислив $G^{(2)}$ с учетом (14.14), (14.13), можно найти из (14.12) $p_K^{(2)}$. Подобный процесс уточнения решения (14.12) быстро приводит к выполнению равенства $\tilde{p}_K^{(j)} \approx p_K^{(j)}$ с точностью, позволяющей рассматривать $p_K^{(j)}$ в качестве окончательного решения (14.15).

В рассматриваемом случае $R_{K, \max}$ и $|\Delta T_K|_{\min}$ имеют место при:

$$\delta_{0, \max} = 4 \cdot 10^{-5} \text{ м}; \quad \Sigma Ra_{i, \min} = 1 \cdot 10^{-5} \text{ м}; \quad r_{\min} = 3 \cdot 10^{-5} \text{ м};$$

$$C = 2\lambda_c / \Sigma Ra_i = 2 \cdot 35,1 \cdot 10^{-3} / (1 \cdot 10^{-5}) = 7,02 \cdot 10^3 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)};$$

$$D = (\alpha_2 - \alpha_1)(T_1 - 273) - (\delta_0 - 1,2\Sigma Ra_i)/d_K = (1,22 \cdot 10^{-5} - 1,22 \cdot 10^{-5})(423 - 273) - (4 \cdot 10^{-5} - 1,2 \cdot 10^{-5})/0,055 =$$

$$= -5,09 \cdot 10^{-4};$$

$$E = \alpha_2 q_K - CD = 1,22 \cdot 10^{-5}(-1,44 \cdot 10^5) - 7,02 \cdot 10^3 \times$$

$$\times (-5,09 \cdot 10^{-4}) = 1,816;$$

$$D_1 = (d_1/d_K)^2 = (0,015/0,055)^2 = 0,0743;$$

$$D_2 = (d_2/d_K)^2 = (0,005/0,1)^2 = 0,3025;$$

$$\zeta_1 = (1 + D_1)/(1 - D_1) = (1 + 0,0743)/(1 - 0,0743) = 1,161;$$

$$\zeta_2 = (1 + D_2)/(1 - D_2) = (1 + 0,3025)/(1 - 0,3025) = 1,867;$$

$$F = (\zeta_1 - \mu_1)/E_1 + (\zeta_2 + \mu_2)/E_2 = (1,161 - 0,3)/(1,96 \cdot 10^5) +$$

$$+ (1,867 + 0,3)/(1,96 \cdot 10^5) = 1,545 \cdot 10^{-5} \text{ МПа}.$$

В формуле для $C \lambda_c = 35,1 \cdot 10^{-3} \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$ — теплопроводность воздуха. В выражении для E значение q_K считается отрицательным в соответствии со знаком ΔT_K .

В первом приближении принимаем $\tilde{p}_K^{(1)} = 10 \text{ МПа}$, тогда $n^{(1)} = 1045 + 56,9 p_K - 1,43 p_K^2 = 1045 + 56,9 \cdot 10 - 1,43 \times 10^2 = 1,47 \cdot 10^2$;

$$\eta^{(1)} = p_K / (3\sigma_B) = 10 / (3 \cdot 600) = 55 \cdot 10^{-4};$$

$$A^{(1)} = (1 - 1,41 \sqrt{\eta} + 0,3 \eta^{1,5})^{-1} [1 + \eta \Sigma Ra_i / (2r(1 - \eta))]^{-1} = (1 - 1,41 \sqrt{55 \cdot 10^{-4}} + 0,3 (55 \cdot 10^{-4})^{1,5})^{-1} \times$$

$$\times \{1 + 55 \cdot 10^{-4} \cdot 10^{-5} / [2 \cdot 3 \cdot 10^{-5} (1 - 55 \cdot 10^{-4})]\}^{-1} = 1,12$$

$$G = 4A\lambda_1 \lambda_2 [p_K / (3\sigma_B)]^{0,001n} / [\pi r p_K \Sigma \lambda_i] = 4 \cdot 1,12 \cdot 47,5 \cdot 47,5 \times$$

$$\times [10 / (3 \cdot 600)]^{0,001 \cdot 1470} / [\pi \cdot 3 \cdot 10^{-5} \cdot 10 \cdot 47,5 \cdot 2] = 54,6;$$

$$p_K^2 + (C/G + D/F) p_K - E/(FG) = p_K^2 + [7,02 \cdot 10^3 / 54,6 - 5,09 \cdot 10^{-4} / (1,545 \cdot 10^{-5})] p_K - 1,816 / (1,545 \cdot 10^{-5} \cdot 54,6) =$$

$$= 0,$$

или $p_K^2 + 95,7 p_K - 2153 = 0$, откуда $p_K^{(1)} = 18,8 \text{ МПа}$.

Во втором приближении $\tilde{p}_K^{(2)} = 18,8$, тогда $n = 1,61$; $\eta = 0,0104$; $A = 1,17$; $G = 40,54$; $p_K^{(2)} + 140,3 p_K - 2899 = 0$, откуда $p_K^{(2)} = 18,3 \text{ МПа} = p_{K, \max}$.

Минимально возможное значение

$$|\Delta T_K|_{\min} = |q_K| / |G p_K + C| = 1,44 \cdot 10^5 / (40,54 \cdot 18,3 + 7,02 \cdot 10^3) = 18,5 \text{ К}.$$

С другой стороны, $p_{K, \min}$ и $|\Delta T_K|_{\max}$ имеют место при зазоре

$$\delta_{0, \min} = -1 \cdot 10^{-5} \text{ м и } \Sigma Ra_{i, \max} = 2 \cdot 10^{-5} \text{ м; при этом}$$

$$p_K = 0 \text{ и } |\Delta T_K|_{\max} = |q_K| [-\delta_0 / \lambda_c + \Sigma Ra_i / (1,4 \lambda_c)] = 1,44 \times$$

$$\times 10^5 [10^{-5} / (35,1 \cdot 10^{-3}) + 2 \cdot 10^{-5} / (1,4 \cdot 35,1 \cdot 10^{-3})] = 99,6 \text{ К}.$$

14.77. Для опытного образца соединения, описанного в задаче 14.76, $\Sigma Ra_i = 1,8 \cdot 10^{-5}$ м, $\delta_0 = 2,2 \cdot 10^{-5}$ м. Какому значению плотности теплового потока q_k изнутри соединения соответствует величина $\Delta T_k = 27$ К? Каким должно быть ΔT_k , если $R_k = 2,24 \cdot 10^{-4}$ м²·К/Вт?

14.78. Между урановым стержнем тепловыделяющего элемента (ТВЭЛ) и его оболочкой из стали 12Х18Н9Т предусмотрена посадка с возможными отклонениями $(0...2,7) \cdot 10^{-5}$ м для отверстия и $(0,3...2) \cdot 10^{-5}$ для вала. Суммарная шероховатость контактных поверхностей $\Sigma Ra_i = 10...20$ мкм. Номинальные наружный и внутренний диаметры оболочки 36 и 32 мм. Расчетная плотность тепловыделения $8,4 \cdot 10^4$ Вт на 1 м длины ТВЭЛа, средняя температура в зоне контакта 400° С. Используя формулы (14.10) и (14.9) из решений задач 14.76 и 14.66 соответственно, найти отношение максимально и минимально возможных значений ΔT_k , а также отношение максимально возможной удельной нагрузки $p_{k \max}$ к значению p_{kT} , соответствующему $\Delta T_{k \max}$. Считать, что для урана $\sigma_u = 240$ МПа; $E_1 = 1,6 \cdot 10^5$ МПа; $\mu_1 = 0,3$; $\alpha_1 = 1,5 \cdot 10^{-5}$ К⁻¹; $\lambda_1 = 32,3$ Вт/(м·К); для стали $\sigma_s = 445$ МПа; $E_2 = 1,77 \cdot 10^5$ МПа; $\mu_2 = 0,3$; $\alpha_2 = 1,75 \cdot 10^{-5}$ К⁻¹; $\lambda_2 = 20,6$ Вт/(м·К).

14.79. Для ТВЭЛа, описанного в задаче 14.78, измеренные в стационарном режиме значения температур наружных поверхностей стержня и оболочки оказались равными 465 и 270° С, а также 460 и 279° С при тепловыделении на 1 м его длины $7,1 \cdot 10^4$ Вт и $6,00 \cdot 10^4$ Вт соответственно. Не свидетельствует ли это о каких-либо отклонениях ТВЭЛа от нормы? Считать возможным использование формул (14.9) и (14.10), приведенных в задачах 14.66 и 14.76.

14.80. Для полупроводникового триода П-207 максимально допустимая температура коллекторного перехода $t_{p-n} = 85^\circ$ С; внутреннее термическое сопротивление, преодолеваемое тепловым потоком на пути от р-п-перехода к корпусу, равно $R_{пк} = 0,6$ К/Вт; потери тепловой мощности в триоде $P = 15$ Вт. Триод используется с радиатором, температура перегрева которого (относительно воздушной среды) в зоне контакта с триодом пропорциональна рассеиваемой тепловой мощности с коэффициентом $F_p = 1,73$ К/Вт. Известен практически возможный диапазон контактного термосопротивления между триодами и радиаторами: $R_k = (0,3...0,5)$ К/Вт. При какой максимальной температуре среды гарантирована длительная работа триода? Как изменилось бы это предельное значение при отсутствии контактного термосопротивления?

КОНВЕКТИВНЫЙ ТЕПЛООБМЕН

§ 15.1. Теплообмен при течении жидкости и газа в трубах и каналах

15.1. В вертикальной трубе квадратного сечения 40×40 мм и длиной 6 м (рис. 15.1) движется снизу вверх воздух. Определить количество теплоты, передаваемое от воздуха к стенке трубы в единицу времени, если скорость

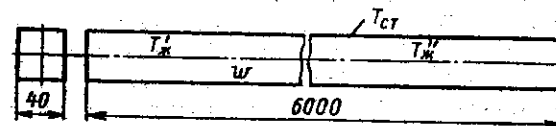


Рис. 15.1

воздуха $w = 1$ м/с, температуры воздуха на входе и выходе $T_ж' = 423$ К и $T_ж'' = 323$ К соответственно, а средняя температура стенки $T_{ст} = 313$ К.

Решение.

$$d_{эв} = 4F/U = 4 \cdot 0,04^2 / (4 \cdot 0,04) = 0,04 \text{ м.}$$

При средней температуре жидкости, равной $0,5 (T_ж' + T_ж'') = 0,5 (423 + 323) = 373$ К, $\nu = 23,13 \cdot 10^{-6}$ м²/с, $Re_{ж} = wd_{эв}/\nu = 1,0 \cdot 0,04 / (23,13 \cdot 10^{-6}) = 1730 < 2300$, режим течения ламинарный.

Для ламинарного течения в вертикальных трубах при противоположных направлениях вынужденной и свободной конвекций у стенки согласно формуле, предложенной Б. С. Петуховым,

$$\begin{aligned} \overline{Nu}_{ж} &= 0,037 Re_{ж}^{0,75} Pr_{ж}^{0,4} (\mu_{ст}/\mu_{ж})^{-0,25} = \\ &= 0,037 \cdot 1730^{0,75} \cdot 0,688^{0,4} (1,95/2,23)^{-0,25} = 8,83; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \alpha &= \overline{Nu}_{ж} \lambda / d_{эв} = 8,83 \cdot 0,0321 / 0,04 = 7,09 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}; \\ Q &= \alpha b l (T_ж - T_{ст}) = 7,09 \cdot 4 \cdot 0,04 \cdot 6 (373 - 313) = 408,2 \text{ Вт.} \end{aligned}$$

15.2. Определить средний коэффициент теплоотдачи и падение давления при течении трансформаторного масла в трубке радиатора диаметром $d = 8$ мм и длиной $L = 1$ м (рис. 15.2), если температура масла на входе в трубку $T_ж' =$

$= 353 \text{ K}$, средняя температура стенки $T_{\text{ст}} = 293 \text{ K}$, а скорость масла $w = 0,6 \text{ м/с}$.

15.3. Определить относительную длину участка тепловой стабилизации $l_{\text{ст}}/d$ при ламинарном течении воды в трубе диаметром 14 мм в условиях постоянной по длине температуры стенки, если средняя массовая температура воды 323 K, а число Рейнольдса $Re = 1500$. Вычислить коэффициент теплоотдачи на основном участке трубы.

15.4. Определить длину участка тепловой стабилизации в трубке диаметром 10 мм в условиях постоянной по длине

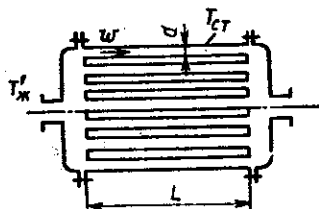


Рис. 15.2

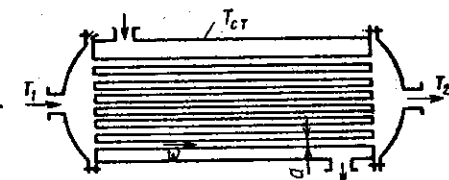


Рис. 15.3

трубы плотности теплового потока на стенке при числе $Re = 1000$ и вычислить коэффициент теплоотдачи на основном участке трубы при течениях: а) трансформаторного масла, имеющего среднюю температуру $T_{\text{ср}} = 373 \text{ K}$; б) воды, $T_{\text{ср}} = 503 \text{ K}$; в) ртути, $T_{\text{ср}} = 393 \text{ K}$; г) висмута, $T_{\text{ср}} = 673 \text{ K}$; д) натрия, $T_{\text{ср}} = 673 \text{ K}$.

15.5. Вычислить коэффициент теплоотдачи при течении глицерина 87%-ной концентрации по трубкам нагревателя (рис. 15.3). Глицерин нагревается паром от $T_1 = 293 \text{ K}$ до $T_2 = 373 \text{ K}$. Средняя температура стенки трубы $T_{\text{ст}} = 393 \text{ K}$, скорость течения глицерина $w = 0,12 \text{ м/с}$, внутренний диаметр трубок $d = 32 \text{ мм}$.

Решение. При температуре $0,5 (393 + 333) = 363 \text{ K}$ физические свойства глицерина равны:
 $\rho = 1200 \text{ кг/м}^3$; $c = 2,514 \text{ кДж/(кг·K)}$; $\lambda = 0,337 \text{ Вт/(м·K)}$;
 $\mu = 0,853 \cdot 10^{-3} \text{ Па·с}$; $\beta = 5 \cdot 10^{-4} \text{ 1/K}$.

Поскольку $Re = w\rho d/\mu = 0,12 \cdot 1200 \cdot 0,032 / (0,853 \cdot 10^{-3}) = 540 < 2300$, режим течения в трубе ламинарный.

По формуле Петухова

$$\overline{Nu}_{\text{ж}} = 0,037 Re_{\text{ж}}^{0,75} Pr_{\text{ж}}^{0,4} (\mu_{\text{ст}}/\mu_{\text{ж}})^{-0,11} = 0,037 \cdot 540^{0,75} \cdot 63,6^{0,4} (0,230/0,853)^{-0,11} = 4,50,$$

где $Pr_{\text{ж}} = \mu c/\lambda = 0,853 \cdot 10^{-3} \cdot 2,514 / 0,337 = 63,6$, тогда

$$\alpha = \overline{Nu}_{\text{ж}} (\lambda/d) = 4,50 (0,337/0,032) = 47,4 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{K)}.$$

15.6. Определить коэффициент теплоотдачи от стенок трубок конденсатора к охлаждающей воде. Внутренний диаметр трубок 25 мм, а длина 2,5 м. Скорость движения воды 0,15 м/с, средняя массовая температура воды 313 K.

15.7. По трубке диаметром 6 мм протекает вода со скоростью 0,4 м/с. Температура стенки $T_{\text{ст}} = 323 \text{ K}$. Определить длину трубки, если температура воды на входе равна 283 K, а на выходе 293 K.

15.8. Оценить относительную эффективность теплоотдачи в круглом длинном канале при ламинарном течении теплоносителя в случаях $q_{\text{ст}} = \text{const}$ и $T_{\text{ст}} = \text{const}$ при прочих равных условиях.

15.9. Оценить относительную эффективность теплоотдачи каналов круглого и квадратного сечения при ламинарном режиме течения жидкости в случае $q = \text{const}$.

15.10. Определить коэффициент теплоотдачи от внутренней поверхности трубки конденсатора паротурбинной установки к охлаждающей воде, количество передаваемой теплоты и длину трубки, если средняя по длине температура стенки $T_{\text{ст}} = 301 \text{ K}$, внутренний диаметр трубки $d = 16 \text{ мм}$, температуры воды на входе и выходе из трубки равны $T'_{\text{ж}} = 283 \text{ K}$ и $T''_{\text{ж}} = 291 \text{ K}$, соответственно и средняя скорость воды $w = 2 \text{ м/с}$.

$$\text{Решение. } T_{\text{опр}} = (T'_{\text{ж}} + T''_{\text{ж}})/2 = 0,5 (283 + 291) = 287 \text{ K};$$

$$v = 1,18 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}; Re_{\text{ж}} = wd/v = 2 \cdot 10^{-3} / (1,18 \cdot 10^{-6}) = 27100 > 2 \cdot 10^4,$$

следовательно, течение турбулентное;

$$Pr_{\text{ж}} = 8,5, \lambda = 0,584 \text{ Вт/(м·K)}; \rho = 999 \text{ кг/м}^3; c_p = 4,187 \text{ кДж/(кг·K)}.$$

При $T_{\text{ст}} = 301 \text{ K}$

$$Pr_{\text{ст}} = 5,7; Nu_{\text{ж}} = 0,021 Re_{\text{ж}}^{0,8} Pr_{\text{ж}}^{0,43} (Pr_{\text{ж}}/Pr_{\text{ст}})^{0,11} = 0,021 \cdot 27100^{0,8} \cdot 8,5^{0,43} (8,5/5,7)^{0,11} = 194;$$

$$\alpha = Nu_{\text{ж}} \lambda/d = 194 \cdot 0,584 / (16 \cdot 10^{-3}) = 7,08 \text{ кВт/(м}^2 \cdot \text{K)};$$

$$G = w\rho\pi d^2/4 = 2 \cdot 999 \cdot 3,14 \cdot (1,6 \cdot 10^{-2})^2/4 = 0,403 \text{ кг/с};$$

$$Q = Gc_p (T''_{\text{ж}} - T'_{\text{ж}}) = 0,403 \cdot 4,187 \cdot 8 = 13,5 \text{ кВт};$$

$$\Delta T = \frac{(T_{\text{ст}} - T'_{\text{ж}}) - (T_{\text{ст}} - T''_{\text{ж}})}{\ln [(T_{\text{ст}} - T'_{\text{ж}})/(T_{\text{ст}} - T''_{\text{ж}})]} = \frac{(301 - 291) - (301 - 283)}{\ln [(301 - 291)/(301 - 283)]} = 13,7 \text{ K};$$

$$l = Q/(\alpha \Delta T \pi d) = 13500 / (7320 \cdot 13,7 \cdot 3,14 \cdot 16 \cdot 10^{-3}) = 2,77 \text{ м}.$$

15.11. По трубе диаметром $d = 14$ мм и длиной 900 мм течет ртуть со скоростью $w = 2,5$ м/с. Средняя температура ртути $T_{ж} = 523$ К. Определить количество теплоты, переносимое от ртути к стенке трубы в единицу времени, если средняя температура стенки $T_{ст} = 423$ К.

15.12. Для теплообменного устройства, поперечный разрез которого изображен на рис. 15.4, требуется определить коэффициент теплоотдачи от горячего воздуха, протекающего по коробу квадратного сечения со стороной $h = 500$ мм, к внешней поверхности труб, по которым протекает вода. Внешний диаметр труб $d = 75$ мм. Средняя по длине температура воздуха в устройстве $T_{ср} = 873$ К, длина устройства $L = 4$ м, средняя скорость воздуха $w = 18$ м/с. Расстояние между осями труб $s_1 = s_2 = 150$ мм.

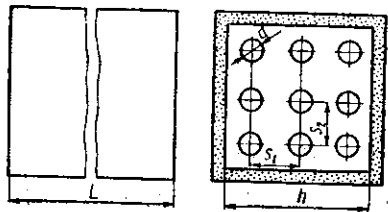


Рис. 15.4

15.13. Определить коэффициент теплоотдачи при течении жидкометаллического теплоносителя (25% Na + 75% K) по трубе диаметром 30 мм со скоростью $w = 5$ м/с. Средняя температура теплоносителя 673 К.

Решение. При 673 К $\rho = 775$ кг/м³; $c = 1002$ Дж/(кг·К); $\lambda = 22,1$ Вт/(м·К);

$$Nu = 7 + 0,025 (wd\rho c/\lambda)^{0,8} = 7 + 0,025 (0,03 \cdot 5 \cdot 1002 \times 775/22,1)^{0,8} = 30,86;$$

$$\alpha = Nu \lambda / d = 30,86 \cdot 22,1 / 0,03 = 22,15 \text{ кВт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}).$$

15.14. По трубке с внутренним диаметром 8 мм, длиной $l > 50d$ протекает вода со скоростью $w = 1,2$ м/с. С наружной стороны трубка обогревается так, что температура ее внутренней поверхности $T_{ст} = 363$ К, вода нагревается от $T'_{ж} = 288$ К на входе до $T''_{ж} = 318$ К на выходе из трубки. Определить коэффициент сопротивления трения.

15.15. Определить интенсивность теплоотдачи от внутренней поверхности труб нагревателя к воздуху, движущемуся в трубах со скоростью 50 м/с. Температура воздуха на входе в нагреватель 283 К, а на выходе из него 363 К. Внутренний диаметр труб 20 мм. Температура внутренней поверхности труб 393 К. Считать, что статическое давление воздуха в трубе равно 0,1 МПа.

15.16. Определить интенсивность теплоотдачи от внутренней поверхности труб нагревателя, предназначенного для подогрева 12%-ного водного раствора серной кислоты. Плотность раствора 1,36 г/см³. Раствор подогревается от 323 до 329 К насыщенным паром с давлением 0,3 МПа ($T'' = 406$ К). Подача аппарата 190 м³/ч, число трубок с внутренним диаметром 24 мм равно 100.

Решение. При средней температуре раствора 323 К $\mu = 785 \cdot 10^{-6}$ Па·с; $\rho = 1,36 \cdot 10^3$ кг/м³; $c = 3,142$ кДж/(кг·К); $\lambda = 0,582$ Вт/(м·К).

Скорость течения раствора в трубках

$$w = \frac{V}{(\pi d^2/4) n \cdot 3600} = \frac{190}{(\pi \cdot 0,024^2/4) 100 \cdot 3600} = 1,17 \text{ м/с};$$

$$Re = w\rho d/\mu = 1,17 \cdot 1360 \cdot 0,024/785 \cdot 10^{-6} = 48\,650 > 10^4,$$

следовательно, режим течения турбулентный;

$$Pr = \mu c/\lambda = 785 \cdot 10^{-6} \cdot 3142/0,582 = 4,24;$$

$$Nu = 0,023 Re^{0,8} Pr^{0,4} (Pr/Pr_{ст})^{0,06} = 0,023 \cdot 48\,650^{0,8} \times 4,24^{0,4} (4,24/3,10)^{0,06} = 230;$$

$$\alpha = Nu \lambda / d = 230 \cdot 0,582/0,024 = 5,58 \text{ кВт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}).$$

15.17. Из опыта известно, что процесс теплоотдачи при ламинарном течении несжимаемой жидкости с постоянными физическими свойствами на основном участке круглой трубы определяется следующими восемью размерными величинами: w — средней по сечению трубы скоростью; ρ — плотностью жидкости; d — диаметром трубы; μ , λ и c — вязкостью, теплопроводностью и массовой теплоемкостью жидкости; $g\beta\Delta T$ — подъемной силой, отнесенной к единице массы жидкости, и α — коэффициентом теплоотдачи. Приняв за основные величины длину, время, массу и температуру, составить безразмерные комплексы, характеризующие явление, и определить их число.

15.18. При ламинарном стабилизированном течении жидкости в трубе на участке длиной l падение давления определяется формулой $\Delta p = 128\mu M_t l / (\pi r d^4)$, где M_t — массовый расход жидкости. Представить эту зависимость в критериальной форме.

15.19. При турбулентном стабилизированном течении жидкости в трубе на участке длиной l падение давления определяется формулой $\Delta p = 0,1582[4M_t/(\pi d^2)]^{3/4} \bar{w} \mu^{1/4} d^{-5/4}$.

где M_t — массовый расход жидкости, а \bar{w} — средняя по сечению скорость. Представить эту зависимость в критериальной форме.

§ 15.2. Теплообмен при внешнем обтекании тел

15.20. Для расчета теплоотдачи от длинного кругового цилиндра к потоку, направленному по нормали к оси цилиндра, существуют различные формулы. Так, например, в рассматриваемых условиях коэффициент теплоотдачи может быть рассчитан по формуле Эккерта [25]:

$$Nu = C Re^m. \quad (15.1)$$

Значения C и m для случая обтекания цилиндра воздухом следующие:

Re . . .	0,4...4	4...40	40...4000	4000...40 000	40 000...40 0000
C . . .	0,891	0,821	0,615	0,174	0,0239
m . . .	0,330	0,385	0,466	0,618	0,805

По данным А. А. Жукаускаса [5]:

$$Nu_{ж} = 0,5 Re_{ж}^{0,5} Pr_{ж}^{0,33} (Pr_{ж}/Pr_{ст})^{0,25} \text{ при } 5 < Re_{ж} \leq 10^3. \quad (15.2)$$

$$Nu_{ж} = 0,25 Re_{ж}^{0,6} Pr_{ж}^{0,33} (Pr_{ж}/Pr_{ст})^{0,25} \text{ при } 10^3 < Re_{ж} < 2 \cdot 10^5; \quad (15.3)$$

$$Nu_{ж} = 0,023 Re_{ж}^{0,8} Pr_{ж}^{0,37} (Pr_{ж}/Pr_{ст})^{0,25} \text{ при } 3 \cdot 10^5 < Re_{ж} < 2 \cdot 10^6. \quad (15.4)$$

Критерии подобия в этих формулах построены по диаметру цилиндра и скорости невозмущенного набегающего потока. В формуле (15.1) в качестве определяющей выбрана средняя температура $0,5 (T_{ст} + T_{ж})$, а в формулах (15.2)... (15.4) — температура набегающего потока $T_{ж}$.

Соотношения (15.2)... (15.4) относятся к капельным жидкостям. Для газов, где $Pr_{ж} \approx Pr_{ст}$, поправку $(Pr_{ж}/Pr_{ст})^{0,25}$ следует опустить.

Если требуется высокая точность расчета, следует иметь в виду, что параметры, рассчитанные по критериальным зависимостям различных авторов, могут существенно различаться.

Для того чтобы убедиться в этом, сравните средние по поверхности цилиндра коэффициенты теплоотдачи, рассчитанные по формулам (15.2) ... (15.4) и (15.1), $\alpha_{ж}$ и α_{σ} соответ-

ственно, предполагая, что цилиндрические поверхности диаметрами 5, 50 и 500 м обтекаются поперечным потоком воздуха, движущимся со скоростью 1 м/с. Температура воздуха равна 0°C , температура цилиндрических поверхностей 200°C .

Чему равны наибольшее и наименьшее относительные отклонения α_{σ} от $\alpha_{ж}$ для приведенных выше диаметров цилиндрических поверхностей?

15.21. Ртутный термометр, предназначенный для измерения температуры потока воздуха, движущегося в трубопроводе со скоростью $w = 0,5$ м/с, расположен под прямым углом к направлению потока. Средняя температура воздуха в трубопроводе $t_{ж} = 100^\circ\text{C}$, температура термометра в месте, где он проходит через стенку трубопровода, $t_0 = 30^\circ\text{C}$. Наружный диаметр термометра $d = 20$ мм, толщина стенок стеклянной трубки термометра $\delta = 2$ мм, теплопроводность стекла $\lambda = 0,96$ Вт/(м·К). Оценить поправку в показаниях термометра за счет отвода теплоты вдоль термометра, если глубина погружения термометра в поток $l = 50$ мм.

Решение. Ошибку в измерении температуры за счет отвода теплоты вдоль термометра можно оценить по формуле

$$t_{ж} - t_{\tau} = \frac{t_{ж} - t_0}{\text{ch}(l \sqrt{\alpha \pi d / (\lambda \delta)})},$$

где t_{τ} — температура чувствительной части термометра, $^\circ\text{C}$; α — коэффициент теплоотдачи от потока к термометру, Вт/(м²·К); f — площадь поперечного сечения стенок термометра, м².

Температуру термометра легко определить из приведенного выше соотношения, если известен коэффициент теплоотдачи α . Для его определения воспользуемся формулами (15.2)... (15.4).

При $t_{ж} = 100^\circ\text{C}$ физические свойства воздуха определяем по таблицам Приложения:

$$\nu = 23,13 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}; \quad \lambda = 0,0321 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К}); \quad Pr_{ж} = 0,688.$$

Число Рейнольдса

$$Re_{ж} = wd/\nu = 0,5 \cdot 0,02 / (23,13 \cdot 10^{-6}) = 432,3.$$

Дальнейший расчет ведем по формуле (15.2), предполагая, что $Pr_{ж} = Pr_{ст}$:

$$Nu_{ж} = 0,5 \cdot 432,3^{0,5} \cdot 0,688^{0,33} = 9,0.$$

Коэффициент теплоотдачи

$$\alpha = Nu_{ж} \lambda / d = 9 \cdot 0,0321 / 0,02 = 14,48 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}.$$

Площадь поперечного сечения стенок термометра

$$f = \pi [d^2 - (d - 2\delta)^2] / 4 = \pi \delta (d + \delta) = \pi 0,002 (0,02 - 0,002) = 113 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2;$$

$$\Delta t = t_{ж} - t_{т} = (100 - 30) \text{ ch } [0,05 \sqrt{14,48 \cdot \pi \cdot 0,02 / (0,96 \times 113 \cdot 10^{-6})}] = 70 / \text{ch } (4,577) = 1,44 \text{ }^{\circ}\text{C}.$$

Если пренебречь поправкой на излучение от термометра к более холодным стенкам трубопровода и поправкой на выступающий столбик ртути, показания термометра будут ниже температуры жидкости на $1,4^{\circ}\text{C}$.

15.22. Какой будет температура, показываемая термометром, если глубину его погружения в поток увеличить до 90 мм, а все прочие условия оставить теми же, что и в задаче 15.21.

15.23. Какой будет относительная погрешность Δ в показаниях термометра, если его поместить в защитную трубку из нержавеющей стали толщиной $\delta_t = 1$ мм, погруженную в поток на глубину $l = 130$ мм и расположенную под прямым углом к направлению движения воздуха. Теплопроводность нержавеющей стали равна $22,4 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$. Считать, что между защитной трубкой и термометром существует идеальный тепловой контакт. Все прочие условия совпадают с условиями задачи 15.21.

15.24. Медный электрический провод диаметром $d_1 = 10$ мм, покрытый резиновой изоляцией толщиной $\delta = 1,5$ мм, охлаждается потоком сухого воздуха. Скорость и температура набегающего потока воздуха $w = 1,5 \text{ м/с}$ и $t_{ж} = 20^{\circ}\text{C}$ соответственно. Угол между направлением потока воздуха и осью трубы $\varphi = 60^{\circ}$. Вычислить допустимую силу тока в электрическом проводе, если температура резиновой изоляции не должна превышать 70°C . Определить критический диаметр тепловой изоляции. Удельное электрическое сопротивление меди $\rho = 0,0175 \text{ Ом} \cdot \text{мм}^2/\text{м}$; теплопроводность резиновой изоляции $\lambda_p = 0,15 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$.

Решение. По таблицам Приложения определяем теплофизические свойства сухого воздуха при $t_{ж} = 20^{\circ}\text{C}$: $\nu = 15,06 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$, $\lambda = 0,0259 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$, $Pr_{ж} = 0,703$.

Число Рейнольдса

$$Re_{ж} = wd_2/\nu = 1,5 \cdot 0,013 / (15,06 \cdot 10^{-6}) = 1294,8.$$

$$\text{Здесь } d_2 = d_1 + 2\delta = 10 + 2 \cdot 1,5 = 13 \text{ мм}.$$

Для вычисления числа Нуссельта воспользуемся формулой (15.3):

$$Nu_{ж} = 0,25 \cdot 1294,8^{0,6} \cdot 0,703^{0,38} = 16,1.$$

Тогда

$$\alpha = Nu_{ж} \lambda / d_2 = 16,1 \cdot 0,0259 / 0,013 = 32,1 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}.$$

Формула (15.3) справедлива, если угол φ между направлением потока и осью трубы равен 90° . Если $30^{\circ} \leq \varphi \leq 90^{\circ}$, можно использовать зависимость

$$\alpha_{\varphi} = \alpha_{\varphi=90^{\circ}} (1 - 0,54 \cos^2 \varphi).$$

Для рассматриваемого случая

$$\alpha_{\varphi} = \alpha_2 = 32,1 (1 - 0,54 \cos^2 60^{\circ}) = 27,8 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}.$$

Допустимую силу тока I определим, воспользовавшись уравнением теплового баланса:

$$k_1 (t_{доп} - t_{ж}) = I^2 R / (\pi d_1 l),$$

где l — длина токопровода, м; k_1 — коэффициент теплопередачи; $R = \rho l / (\pi d_1^2 / 4)$ — сопротивление электропровода, Ом. Следовательно,

$$I^2 = \frac{k_1 (t_{доп} - t_{ж}) \pi d_1 l}{\rho l / (\pi d_1^2 / 4)},$$

откуда

$$I = \pi d_1 \sqrt{k_1 (t_{доп} - t_{ж}) d_1 / (4\rho)}.$$

Предварительно вычислим коэффициент теплопередачи:

$$k_1 = 1/[d_1/(\alpha_2 d_2) + 0,5 d_1 \ln(d_2/d_1)/\lambda_p] = 1/[10/(27,8 \cdot 13) + 0,5 \cdot 0,01 \ln(13/10)/0,15] = 27,5 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}.$$

Подставляя известные величины в формулу для I , получим

$$I = \pi 0,01 \sqrt{27,5 (70 - 20) 0,01 / (4 \cdot 0,0175 \cdot 10^{-6})} = 440 \text{ А}.$$

Критический диаметр изоляции

$$d_{кр} = 2\lambda_p/\alpha_2 = 2 \cdot 0,15/27,8 = 10,8 \text{ мм}.$$

15.25. Найти отношение коэффициентов теплоотдачи ($\alpha_{\text{вн}}/\alpha_{\text{вн}}$) от стенки трубы к воздуху: при движении воздуха внутри длинной гладкой трубы круглого поперечного сечения с внутренним диаметром $d_{\text{вн}} = 50$ мм; при внешнем поперечном обтекании воздухом одиночной трубы с наружным диаметром $d_{\text{вн}} = 50$ мм, для скорости: а) 4 м/с; б) 8 м/с; в) 12 м/с. Среднюю температуру воздуха во всех случаях принять равной 10°C .

15.26. Рассчитать значения средних коэффициентов теплоотдачи $\bar{\alpha}$ [Вт/(м²·К)] от воздушного потока к внешней поверхности поперечно обтекаемых труб, расположенных в шахматном порядке. Сравнить значения коэффициентов теплоотдачи, полученные по различным формулам.

а) По формуле [5]:

$$\text{Nu}_{\text{ж}} = 0,41 \text{Re}_{\text{ж}}^{0,6} \text{Pr}_{\text{ж}}^{0,33} \epsilon_s, \quad (15.5)$$

где $\epsilon_s = (s_1/s_2)^{1/6}$ при $s_1/s_2 < 2$; $\epsilon_s = 1,12$ при $s_1/s_2 \geq 2$.

Определяющий размер — диаметр трубы, определяющая температура — температура невозмущенного набегающего потока, характерная скорость — средняя скорость в самом узком сечении трубного пучка.

б) По формуле [22]:

$$\text{Nu} = 0,35 \text{Re}^{0,57} \text{Pr}^{0,31} \epsilon, \quad (15.6)$$

где $\epsilon = 1 + 0,1(s_1/d) + 0,34(s_2/d)$.

в) По формуле [22]:

$$\text{Nu}_0 = (1,878 + 0,256 \text{Re}_0^{0,36})^2 (s_1/d) [(s_1/d) - (\pi/4)]. \quad (15.7)$$

В отличие от формул (15.5) и (15.6) в последней формуле в качестве характерной скорости принята скорость набегающего потока. В формулах (15.6), (15.7) физические свойства среды отнесены к средней температуре $0,5 (T_{\text{ж}} + T_{\text{ст}})$.

Диаметр труб равен 100 мм, поперечный и продольный шаги трубного пучка $s_1 = 250$ мм и $s_2 = 300$ мм соответственно. Средняя скорость воздуха в узком сечении пучка равна 5 м/с. Средняя температура воздуха $t_{\text{ж}} = 350^\circ\text{C}$, а средняя температура внешней поверхности труб $t_{\text{ст}} = 250^\circ\text{C}$.

15.27. Найти соотношение между средними коэффициентами теплоотдачи для 5-го ряда труб по ходу воздуха для двух воздухоподогревателей, конструктивно выполненных в виде трубных пучков: а) с шахматным расположением труб; б) с коридорным расположением труб.

Оба пучка обтекаются поперечным потоком воздуха со средней температурой $t_{\text{ж}} = 200^\circ\text{C}$ и скоростью в самом узком сечении пучка $w = 8$ м/с. Диаметры труб в обоих пучках одинаковы и равны 50 мм, относительные шаги также одинаковы: $s_1 = 120$ мм и $s_2 = 160$ мм.

15.28. Подогреватель питательной воды котельной установки изготовлен из труб с наружным диаметром $d = 30$ мм, расположенных в шахматном порядке с поперечным и продольным шагами $s_1 = s_2 = 2,5 d$. Число труб в ряду $m = 8$, число рядов $n = 6$. Трубы располагаются поперек потока.

Температура воздуха, поступающего в подогреватель, $t'_{\text{ж}} = 400^\circ\text{C}$, а на выходе из подогревателя $t''_{\text{ж}} = 300^\circ\text{C}$. Средняя температура наружной поверхности труб $t_{\text{ст}} = 150^\circ\text{C}$. Скорость воздуха в узком сечении трубного пучка $w = 10$ м/с.

Какой длины должны быть трубы, чтобы тепловой поток, передаваемый воде, протекающей внутри труб, был равен 300 кВт?

Решение. Средняя температура воздуха в подогревателе

$$t_{\text{ж}} = 0,5 (t'_{\text{ж}} + t''_{\text{ж}}) = 0,5 (400 + 300) = 350^\circ\text{C}.$$

Теплофизические свойства воздуха при $t_{\text{ж}}$: $\nu = 55,46 \times 10^{-6}$ м²/с; $\lambda = 0,0491$ Вт/(м·К); $\text{Pr}_{\text{ж}} = 0,676$.

Число Рейнольдса

$$\text{Re}_{\text{ж}} = wd/\nu = 10 \cdot 0,03 \cdot 10^6 / 55,46 = 5409.$$

Для третьего ряда шахматного пучка

$$\text{Nu}_{\text{ж}} = 0,41 \text{Re}_{\text{ж}}^{0,6} \text{Pr}_{\text{ж}}^{0,33} = 0,41 \cdot 5409^{0,6} \cdot 0,676^{0,33} = 62,6;$$

$$\bar{\alpha}_3 = \text{Nu}_{\text{ж}} \lambda / d = 62,6 \cdot 0,0491 / 0,03 = 102,4 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}.$$

Средний коэффициент теплоотдачи шахматного пучка

$$\bar{\alpha} = [0,6\bar{\alpha}_3 + 0,7\bar{\alpha}_3 + (n-2)\bar{\alpha}_3] / n = \bar{\alpha}_3 (1 - 0,7/n) = 102,4 (1 - 0,7/6) = 90,5 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}.$$

Плотность теплового потока

$$q = \bar{\alpha} (t_{\text{ж}} - t_{\text{ст}}) = 90,5 (350 - 150) = 18,09 \text{ кВт/м}^2.$$

Требуемая поверхность нагрева

$$F = Q/q = 300 \cdot 10^3 / 18,09 = 16,6 \text{ м}^2.$$

Необходимая длина труб

$$L = F / (\pi d m n) = 16,6 / (\pi \cdot 0,03 \cdot 8 \cdot 6) = 3,67 \text{ м.}$$

15.29. В перекрестноточном рекуператоре коридорный пучок труб обтекается потоком воды. Внешний диаметр труб равен 25 мм, продольный шаг $s_2 = 2d$, средняя скорость в узком сечении пучка равна 0,5 м/с. Средняя температура воды $t_{ж} = 40^\circ \text{С}$, а средняя температура внешней поверхности труб $t_{ст} = 90^\circ \text{С}$. Найти средний коэффициент теплоотдачи α_2 от внешней поверхности труб к воде для второго ряда труб.

§ 15.3. Теплообмен в атомных реакторах

15.30. Определить коэффициент теплоотдачи, переданное количество теплоты, площадь поверхности и длину трубы 2-го контура парогенератора атомного реактора. В качестве теплоносителя использован натрий [3,13]. Температура натрия на входе в трубу парогенератора $T'_ж = 773 \text{ К}$, на выходе из нее $T''_ж = 573 \text{ К}$. Средняя скорость натрия в трубе $w = 7 \text{ м/с}$, внутренний диаметр трубы $d = 17,2 \text{ мм}$. Средняя температура внутренней поверхности трубы $d = 623 \text{ К}$.

Решение. Из таблиц физических свойств жидких металлов [4] при $T_{ж} = 0,5 (T'_ж + T''_ж) = 0,5 (773 + 573) = 673 \text{ К}$: $\lambda = 68,7 \text{ Вт/(м·К)}$; $\alpha = 61 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$; $c = 1,273 \text{ кДж/(кг·К)}$; $\rho = 854 \text{ кг/м}^3$.

Критерий Пекле

$$Re = wd/\alpha = 7 \cdot 0,0172 / (61 \cdot 10^{-6}) = 1950.$$

Коэффициент теплоотдачи находим, используя формулу для стабилизированного течения жидкости в трубе:

$$Nu = 5 + 0,025 Re^{0,8} = 5 + 0,025 (1950)^{0,8} = 15,7;$$

$$\alpha = Nu \lambda / d = 15,7 \cdot 68,7 / 0,0172 = 63,45 \text{ кВт/(м}^2 \cdot \text{К)}.$$

Массовый расход натрия

$$M_t = \rho w \pi d^2 / 4 = 854 \cdot 7 \cdot 3,14 (17,2 \cdot 10^{-3})^2 / 4 = 1,35 \text{ кг/с}$$

Плотность теплового потока, подводимого к поверхности трубы,

$$q = \alpha (T_{ж} - T_{ст}) = 63450,0 (673 - 623) = 31,7 \cdot 10^3 \text{ кВт/м}^2.$$

Тепловой поток, поступающий от натрия,

$$Q_{Na} = c M_t (T'_ж - T''_ж) = 1273 \cdot 1,35 (773 - 573) = 3,44 \cdot 10^3 \text{ кВт};$$

Необходимая поверхность

$$F = Q_{Na} / q = 3,44 \cdot 10^3 / (31,7 \cdot 10^3) = 0,1085 \text{ м}^2.$$

Длина трубы

$$l = F / (\pi d) = 0,1085 / (3,14 \cdot 0,0172) = 2 \text{ м.}$$

15.31. Определить температуру на поверхности и в центре уранового стержня 1 атомного реактора (рис. 15.5) при условии равномерности потока нейтронов, если по кольцевому пространству замедлителя 3, образованному стержнем и внутренним кожухом 2, циркулирует охладитель 4 (жидкий натрий) со скоростью $w = 3 \text{ м/с}$. Температура натрия на входе $T'_ж = 394^\circ \text{С}$, на выходе $T''_ж = 561^\circ \text{С}$. Наружный диаметр стержня $d_{ст} = 26 \text{ мм}$, внутренний диаметр кожуха замедлителя $d_k = 38 \text{ мм}$. Коэффициент теплоотдачи от стержня к охладителю $\alpha = 45\,000 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}$; теплопроводность урана $\lambda_y = 32,6 \text{ Вт/(м·К)}$. Активная длина реактора $L = 4,5 \text{ м}$. Плотность натрия $\rho = 902 \text{ кг/м}^3$, теплоемкость $c = 1330 \text{ Дж/(кг·К)}$.

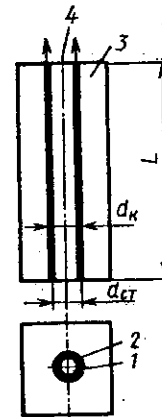


Рис. 15.5

15.32. Наружная температура уранового стержня из условий прочности не должна превышать $T = 923 \text{ К}$. Какова при этом должна быть скорость охладителя [сплав Рв (44,5%) и Вi (55,5 %)]; $c = 146,6 \text{ Дж/(кг·К)}$; $\rho = 10\,364 \text{ кг/м}^3$, если температура его на входе $T'_ж = 423 \text{ К}$, на выходе $T''_ж = 450^\circ \text{С}$? Диаметр стержня $d = 26 \text{ мм}$; живое сечение для прохода охладителя $f = 5 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$, длина активной зоны реактора $L = 4,5 \text{ м}$. Коэффициент теплоотдачи от стержня к охладителю $\alpha = 9000 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}$.

15.33. Как изменится температурный режим ТВЭЛа, если в тепловыделяющей сборке (ТВС) реактора, работающего на быстрых нейтронах, уменьшить скорость движения лития от 10 до 5 м/с. Максимально допустимая температура ТВЭЛа при $r_0 = 3,45 \text{ мм}$ $T_0 = 1723 \text{ К}$; $q_0 = 500 \cdot 10^7 \text{ Вт/м}^2$; температура лития на входе в реактор 623 К, на выходе 823 К; $d_{эвб} = 6,1 \text{ мм}$; теплопроводность карбидного топлива $\lambda = 18 \text{ Вт/(м·К)}$.

Решение. Определяющая температура принимается средней из температур потока на входе и выходе из ТВС: $T_{ж} = 0,5 (T'_ж + T''_ж) = 0,5 (623 + 823) = 723 \text{ К}$.

Физические свойства теплоносителя: $\lambda = 47,35 \text{ Вт/(м·К)}$; $\nu = 77,5 \cdot 10^{-8} \text{ м}^2/\text{с}$; $a = 2,2 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$.

Значения критериев Пекле для 1-го ($w = 10 \text{ м/с}$) и 2-го ($w = 5 \text{ м/с}$) случаев:

$$Pe_1 = wd_{\text{экв}}/a = 10 \cdot 6,1 \cdot 10^{-3} / (2,2 \cdot 10^{-5}) = 2700;$$

$$Pe_2 = wd_{\text{экв}}/a = 5 \cdot 6,1 \cdot 10^{-3} / (2,2 \cdot 10^{-5}) = 1350.$$

Значения чисел Нуссельта:

$$Nu_1 = 7 + 0,025 Pe^{0,8} = 7 + 0,025 \cdot 2700^{0,8} = 21;$$

$$Nu_2 = 7 + 0,025 Pe^{0,8} = 7 + 0,025 \cdot 1350^{0,8} = 15.$$

Следовательно,

$$\alpha_1 = Nu_1 \lambda / d_{\text{экв}} = 21 \cdot 47,35 / (6,1 \cdot 10^{-3}) = 165,7 \text{ кВт/(м}^2 \cdot \text{К)}$$

$$\alpha_2 = Nu_2 \lambda / d_{\text{экв}} = 15 \cdot 47,35 / (6,1 \cdot 10^{-3}) = 118,4 \text{ кВт/(м}^2 \cdot \text{К)}.$$

Температура внутри ТВЭЛа (при $r_0 = 345 \cdot 10^{-5} \text{ м}$):

$$t_{01} = t_{\text{ж}} + \frac{q_v r_0}{2\alpha} + \frac{q_v r_0^2}{4\lambda} = 450 + \frac{500 \cdot 10^7 \cdot 345 \cdot 10^{-5}}{2 \cdot 165 \cdot 700} +$$

$$+ \frac{500 \cdot 10^7 (345 \cdot 10^{-5})^2}{4 \cdot 18} = 1329^\circ \text{C} \quad (T_{01} = 1602 \text{ К});$$

$$t_{02} = 450 + \frac{500 \cdot 10^7 \cdot 345 \cdot 10^{-5}}{2 \cdot 118 \cdot 400} + \frac{500 \cdot 10^7 (345 \cdot 10^{-5})^2}{4 \cdot 18} =$$

$$= 1379^\circ \text{C} \quad (T_{02} = 1652 \text{ К}).$$

Температура внутри ТВЭЛа повысится на $T_0'' - T_0' = 1652 - 1602 = 50 \text{ К}$ и останется меньше допустимой ($1652 < 1723$) К.

15.34. Определить коэффициент теплоотдачи в атомном реакторе. Средняя скорость теплоносителя (25% Na + 75% K) 5 м/с, средняя температура 400°C , внутренний диаметр трубы, по которой течет теплоноситель, 30 мм. Считать тепловой поток, поступающий в стенку трубы, постоянным.

15.35. Найти средний коэффициент теплоотдачи и переданный тепловой поток в испарителе 2-го контура атомной установки. В качестве теплоносителя используется натрий. Его температура на входе в испаритель $T_{\text{ж}}' = 743 \text{ К}$, на выходе $T_{\text{ж}}'' = 600 \text{ К}$. Поверхность испарителя $F = 60 \text{ м}^2$. Испаритель набран из труб с внешним диаметром $d = 25,4 \text{ мм}$. Омывание труб потоком жидкого натрия поперечное. Средняя скорость потока $w = 3 \text{ м/с}$. Средняя температура внешней поверхности труб $T_{\text{ст}} = 661 \text{ К}$.

Решение. Для поперечного омывания шахматных и коридорных пучков используем формулу $Nu_{\text{ж}} = Re_{\text{ж}}^{0,5}$. Из таблиц физических свойств жидких металлов [4] при $T_{\text{ж}} = 0,5 (T_{\text{ж}}' + T_{\text{ж}}'') = 0,5 (743 + 600) = 671 \text{ К}$ находим: $\rho = 854 \text{ кг/м}^3$; $\lambda = 68,7 \text{ Вт/(м·К)}$; $c = 1273 \text{ Дж/(кг·К)}$.

Критерий Пекле

$$Re_{\text{ж}} = wd\rho c/\lambda =$$

$$= 3 \cdot 0,0254 \cdot 854 \cdot 1273 / 68,7 = 1205;$$

$$Nu_{\text{ж}} = Re_{\text{ж}}^{0,5} = 1205^{0,5} = 34,7.$$

Коэффициент теплоотдачи

$$\alpha = Nu \lambda / d = 34,7 \cdot 68,7 / 0,0254 = 93,85 \text{ кВт/(м}^2 \cdot \text{К)}.$$

Тепловой поток, поступающий к трубам испарителя,

$$Q = \alpha F (T_{\text{ж}} - T_{\text{ст}}) = 93,85 \cdot 10^{-3} \cdot 60 (671 - 661) =$$

$$= 56,3 \text{ МВт}.$$

15.36. Определить режим движения жидкометаллического охладителя и коэффициент теплоотдачи от стенок 1 ТВЭЛа (рис. 15.6) к охладителю. Охладитель движется внутри ТВЭЛа по прямоугольному каналу 2 размером $70 \times 15 \text{ мм}$. В качестве охладителя использован натрий. Температура его на входе в реактор $T_{\text{ж}}' = 448 \text{ К}$, на выходе $T_{\text{ж}}'' = 898 \text{ К}$. При средней арифметической температуре охладителя физические свойства натрия: $\nu = 33 \cdot 10^{-8} \text{ м}^2/\text{с}$, $a = 58,9 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$, $\lambda = 64 \text{ Вт/(м·К)}$. Средняя скорость движения теплоносителя $w = 5 \text{ м/с}$.

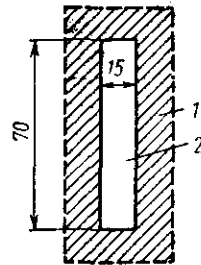


Рис. 15.6

ГЛАВА 16

ПРИЛОЖЕНИЯ ТЕОРИИ ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ К ЯВЛЕНИЯМ ТЕПЛОМАССОБМЕНА

16.1. Определить распределение скорости и температуры в поперечном сечении ламинарного пограничного слоя при обтекании пластины газом с числом $P_r = 1$, используя следующие граничные условия:

- 1) при $\xi = \xi_t = 0$ $w = \theta = 0$ — условия прилипания;
- 2) при $\xi = \xi_t = 0$ $\partial^2 w / \partial \xi^2 = \partial^2 \theta / \partial \xi^2 = 0$ — условие линейности профилей скорости и температуры вблизи стенки;

3) при $\xi = \xi_T = 1$ $\vartheta = w = 1$; $\partial w / \partial \xi = \partial \vartheta / \partial \xi_T = 0$ — условие плавного сопряжения профилей на внешней границе пограничного слоя.

Здесь $\xi = y/\delta$ — относительная толщина динамического пограничного слоя; $\xi_T = y/\delta_T$ — относительная толщина теплового пограничного слоя; $w = w_x/w_\infty$ — безразмерная продольная составляющая скорости; $\vartheta = (T - T_{ст})/(T_\infty - T_{ст})$ — безразмерная температура.

Решение. Зададим безразмерные профили скорости и температуры в виде полиномов третьей степени:

$$w = a + b\xi + c\xi^2 + d\xi^3;$$

$$\vartheta = a_T + b_T \xi_T + c_T \xi_T^2 + d_T \xi_T^3$$

и определим постоянные коэффициенты полиномов, используя заданные граничные условия.

Из первого и второго граничных условий следует, что $a = a_T = 0$; $c = c_T = 0$. Используя третье граничное условие, составим уравнения:

$$b + d = 1; \quad b_T + d_T = 1;$$

$$b + 3d = 0; \quad b_T + 3d_T = 0,$$

решив которые, получим: $b = 3/2$; $d = -1/2$; $b_T = 3/2$; $d_T = -1/2$.

Таким образом, безразмерные профили скорости и температуры могут быть приближенно аппроксимированы следующими зависимостями:

$$w = 3/2\xi - 1/2\xi^3;$$

$$\vartheta = 3/2\xi_T - 1/2\xi_T^3.$$

16.2. Используя профиль скорости, полученный в задаче 16.1, найти зависимость локального коэффициента трения $c_f = 2\tau_{ст}/(\rho w_\infty^2)$ от числа Re_x при ламинарном течении в пограничном слое, развивающемся в условиях безградиентного обтекания.

16.3. Используя полученное в задаче 16.2 выражение для коэффициента трения, найти так называемый «стандартный» закон трения, т. е. зависимость вида $c_f/2 = f(Re^{**})$.

16.4. Найти соотношение между толщинами теплового и динамического пограничных слоев в условиях ламинарного квазиизотермического безградиентного обтекания пластины потоком газа. Для решения задачи использовать интегральное уравнение энергии.

16.5. Тонкая пластина с острой передней кромкой омывается потоком воздуха со скоростью $w_\infty = 2$ м/с при тем-

пературе $t_\infty = 60^\circ \text{C}$. Считая, что в этом случае $Re_{кр} = 5 \cdot 10^5$, определить в сечениях $x_1 = 0,15$ м и $x_2 = 0,25$ м характер течения в пограничном слое и найти: а) толщины теплового пограничного слоя; б) локальные коэффициенты теплоотдачи, используя точное решение; в) средний коэффициент теплоотдачи на длине 0,5 м.

16.6. Используя выражение для толщины теплового пограничного слоя, полученное в задаче 16.4, и выражение для температурного профиля, полученное в задаче 16.1, найти конкретную форму зависимости $St = f(Pr, Re_x)$ в условиях ламинарного квазиизотермического обтекания пластины.

16.7. Используя зависимость $St = f(Pr, Re_x)$, полученную в задаче 16.6, найти так называемый «стандартный» закон теплообмена для ламинарного режима течения в пограничном слое, т. е. зависимость $St = f(Re_x^{**}, Pr)$ для условий безградиентного обтекания пластины с постоянной температурой стенки.

Решение. Интегральное уравнение энергии в рассматриваемых условиях имеет вид

$$d Re_x^{**} / d Re_x = St.$$

Подставляя в это уравнение найденную в задаче 16.6 зависимость $St = 0,33 Pr^{-2/3} Re_x^{-1/2}$, получим $d Re_x^{**} = 0,33 \times \times Pr^{-2/3} Re_x^{-1/2} d Re_x$, или после интегрирования

$$Re_x^{1/2} = Re_x^{**} Pr^{2/3} / 0,66.$$

Учитывая зависимость для St , окончательно получим

$$St = 0,22 / (Re_x^{**} Pr^{4/3}).$$

16.8. Пластина длиной $L = 1$ м обтекается потоком воздуха, движущимся со скоростью 100 м/с и имеющим степень турбулентности $\varepsilon = 0,2\%$. Температура набегающего потока равна 20°C ; температура пластины поддерживается постоянной и равна 50°C . Определить локальное значение коэффициента теплоотдачи в сечении, отстоящем на 1 м от передней кромки пластины.

Решение. Определим расстояние x_1 от передней кромки пластины до того сечения, в котором ламинарный пограничный слой на поверхности пластины переходит в турбулентный. При значении степени турбулентности $\varepsilon = 0,2\%$ критическое число Рейнольдса равно $2 \cdot 10^6$ (119), рис. VI.26), следовательно,

$$x_1 = Re_{x1} v / w_\infty = 2 \cdot 10^6 \cdot 15,28 \cdot 10^{-6} / 100 = 0,305 \text{ м}.$$

Кинематическая вязкость $\nu = 15,28 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ и другие теплофизические свойства воздуха при температуре 20°С определяются по таблицам Приложения.

Найдем значение числа $Re_{\tau 1}^*$ в критическом сечении $x_1 = 0,305 \text{ м}$, используя зависимость, полученную при решении задачи 16.7:

$$Re_{\tau 1}^* = 0,66 Re_{x_1}^{1/2} / Pr^{2/3} = 0,66 (2 \cdot 10^6)^{1/2} / 0,71^{2/3} = 1173.$$

Число Re_x в сечении $x = 1 \text{ м}$

$$Re_x = wL/\nu = 100 \cdot 1,0 / (15,28 \cdot 10^{-6}) = 6,545 \cdot 10^6.$$

Число Re_{τ}^* в сечении $x = 1 \text{ м}$ определим из выражения [19]:

$$Re_{\tau}^* = [(m+1) B (Re_x - Re_{x1}) / (2 Pr^{0,75})]^{1/(m+1)} + \\ + Re_{\tau 1}^* = [(0,25+1) 0,0256 (6,545 \cdot 10^6 - 2 \cdot 10^6) / (2 \times \\ \times 0,703^{0,75})]^{1/(0,25+1)} + 1173 = 10630,$$

где $m = 0,25$; $B = 0,0256$.

Локальное число St определим из «стандартного» закона теплообмена для турбулентного режима течения в пограничном слое [9]:

$$St = 0,0256 / (2 Re_{\tau}^{0,25} Pr^{0,75}) = 0,0256 / (2 \cdot 703^{0,75} \times \\ \times 10630^{0,25}) = 1,62 \cdot 10^{-3}.$$

Поскольку

$$St = Nu / (Re \cdot Pr) = \alpha / (\rho c_p w_{\infty}),$$

коэффициент теплоотдачи

$$\alpha = St \rho c_p w_{\infty} = 1,62 \cdot 10^{-3} \cdot 1,205 \cdot 1005 \cdot 100 = \\ = 196 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}).$$

16.9. Определить локальное значение коэффициента теплоотдачи для условий задачи 16.8, считая, что турбулентный пограничный слой развивается от передней критической точки.

16.10. Определить, насколько изменится локальный коэффициент теплоотдачи в сечении $x = 1 \text{ м}$ для условий задачи 16.9, если температурный напор вдоль поверхности пластины изменяется по закону $\Delta T = 20^\circ (x/L)^2$.

16.11. Определить, насколько уменьшится локальный коэффициент теплоотдачи в сечении $x = 1 \text{ м}$ по сравнению с квазиизотермическим случаем (см. задачу 16.9), если температура стенки равна 827°С .

16.12. Используя точное решение системы дифференциальных уравнений ламинарного пограничного слоя с постоянными физическими свойствами ([19], табл. VI. 4), определить коэффициент теплоотдачи в окрестности критической точки круглого поперечно обтекаемого цилиндра, имеющего диаметр $2R = 0,1 \text{ м}$; параметры набегающего потока $w_{\infty} = 10 \text{ м/с}$; $p_{\infty} = 0,1 \text{ МПа}$; $T_{\infty} = 273 \text{ К}$. Распределение скорости в лобовой части цилиндра на внешней границе пограничного слоя может быть представлено в виде $w_{\infty} = 2 w_{\infty} \sin (x/R)$, где x — расстояние, отсчитываемое по дуге от передней критической точки.

16.13. Определить значение коэффициента теплоотдачи в окрестности критической точки круглого поперечно обтекаемого цилиндра для случая, рассмотренного в задаче 16.12, интегральным методом.

Решение. Интегральное уравнение энергии ламинарного пограничного слоя, записанное для случая квазиизотермического обтекания поверхности с постоянной температурой несжимаемым потоком жидкости, имеет вид

$$d Re_{\tau}^* / d \bar{x} = Re_L St_0,$$

где $St_0 = 0,22 / (Pr^{4/3} Re_{\tau}^{**})$ (см. решение задачи 16.7).

Решение интегрального уравнения энергии в рассматриваемом случае приводит к следующему выражению:

$$Re_{\tau}^{**} = \left[0,44 \int_0^x w_{\infty} d x / (Pr^{4/3} v_{\infty}) \right]^{1/2}.$$

Подставляя в это выражение линейный ($m = 1$) закон изменения скорости на внешней границе пограничного слоя: $w_{\infty} = Cx$, вычислим число Re_{τ}^{**} :

$$Re_{\tau}^{**} = \left[0,44 C \int_0^x x dx / (Pr^{4/3} v_{\infty}) \right]^{1/2} = \\ = [0,22 C / (Pr^{4/3} v_{\infty})]^{1/2} x.$$

Составим равенство

$$St = Nu / (Re_x Pr) = 0,22 / [x Pr^{2/3} (0,22 C / v_{\infty})^{1/2}],$$

откуда

$$Nu Re_x^{-1/2} = 0,22 Re_x^{1/2} Pr / [x Pr^{2/3} (0,22 C / v_{\infty})^{1/2}] = \\ = 0,22^{1/2} Pr^{1/3}.$$

Для сравнения этого результата с точным решением воспользуемся табл. VI.4 [19]. При $Pr = 0,7$ и $m = 1$ точное решение дает значение

$$Nu Re_x^{-1/2} = 0,496;$$

при решении интегральным методом

$$Nu Re_x^{-1/2} = 0,22^{1/2} \cdot 0,7^{1/3} = 0,416.$$

Так как полученное значение комплекса $Nu Re_x^{-1/2}$ отличается от точного на 16 %, то и коэффициент теплоотдачи, найденный интегральным методом, на 16 % меньше точного значения, т. е. $\alpha = 55,1$, Вт/(м²·К).

16.14. Используя данные о распределении скоростей на поверхности поперечно обтекаемого цилиндра (см. задачу 16.12), определить значения коэффициента теплоотдачи и комплекса $Nu_d Re_d^{-1/2}$ в точке поверхности цилиндра, определяемой центральным углом $\varphi = 30^\circ$. Результат решения сравнить с имеющимися экспериментальными данными. Для решения задачи использовать метод интегральных соотношений.

16.15. Пористая пластина омывается потоком воздуха в продольном направлении со скоростью $w_\infty = 50$ м/с и температурой $T_\infty = 1273$ К. Пластина охлаждается воздухом с начальной температурой $T_n = 303$ К. Определить закон изменения расхода охлаждающего воздуха по длине пластины при условии, что температуру поверхности пластины необходимо поддерживать равной $T_{ст} = 773$ К.

Решение. В том случае, когда задана температура поверхности пластины $T_{ст}$, тепловой поток на стенке можно определить из балансового уравнения

$$q_{ст} = j_{ст} c_p (T_{ст} - T_n).$$

Если предположить, что в заданном интервале температуры теплоемкость воздуха не зависит от температуры, то последнее уравнение можно преобразовать к следующему виду:

$$b_T = \rho_{ст} w_{ст} / (\rho_\infty w_\infty St_0) = \Psi_s / K,$$

$$\text{где } K = (T_{ст} - T_n) / (T_\infty - T_{ст}); \Psi_s = St / St_0.$$

Интегральное уравнение энергии для случая $T_{ст} = \text{const}$, $\Delta T = T_\infty - T_{ст} = \text{const}$ имеет вид

$$d Re_T^{**} / d \bar{x} = Re_L St (1 + b_T) = Re_L St_0 \Psi_s (K + 1) / K,$$

а интеграл этого уравнения при условиях развития турбулентного пограничного слоя от передней кромки пластины и $w_\infty / w_{0,\infty} = 1$ вычисляется по формуле

$$Re_T^{**} = [(1 + m) B \Psi_s Re_x (K + 1) / (2K Pr^{0,75})]^{1/(m+1)}.$$

Определим поправку на неизотермичность и вдув к стандартному закону теплообмена:

$$\Psi_s \approx 4 [(1 - b_T / b_{T,кр}) / \sqrt{\Psi} + 1]^2 = \Psi_T (1 - b_T / b_{T,кр})^2,$$

где $\Psi_T = [2 / (\sqrt{\Psi} + 1)]^2$ — поправка на неизотермичность.

Ранее мы получили $\Psi_s = K b_T$, следовательно,

$$K b_T = \Psi_T (1 - b_T / b_{T,кр})^2,$$

откуда

$$b_T = b_{T,кр} - K b_{T,кр}^2 [\sqrt{4 \Psi_T / (K b_{T,кр})} + 1 - 1] / (2 \Psi_T).$$

Критический параметр вдува определим из следующего уравнения для $\psi < 1$ [19]:

$$\begin{aligned} b_{T,кр} &= [\ln [(1 + \sqrt{1 - \psi}) / (1 - \sqrt{1 - \psi})]] / (1 - \psi) = \\ &= [\ln [(1 + \sqrt{1 - 0,607}) / (1 - \sqrt{1 - 0,607})]] / (1 - 0,607) = \\ &= 3,75, \end{aligned}$$

где

$$\psi = T_{ст} / T_\infty = 778 / 1278 = 0,607 < 1;$$

$$\Psi_T = [2 / (\sqrt{\Psi} + 1)]^2 = [2 / (\sqrt{0,607} + 1)]^2 = 1,26;$$

$$\begin{aligned} K &= (T_{ст} - T_n) / (T_\infty - T_{ст}) = (773 - 303) / (1273 - 773) = \\ &= 0,94. \end{aligned}$$

Тогда

$$\begin{aligned} b_T &= b_{T,кр} - K b_{T,кр}^2 [\sqrt{4 \Psi_T / (K b_{T,кр})} + 1 - 1] / (2 \Psi_T) = \\ &= 3,75 - 0,94 \cdot 3,75^2 [\sqrt{4 \cdot 1,26 / (0,94 \cdot 3,75)} + 1 - 1] / (2 \cdot 1,26) = 0,819 \end{aligned}$$

и, следовательно,

$$\Psi_s = b_T K = 0,819 \cdot 0,94 = 0,77.$$

Определим число Re_T^{**} , принимая $m = 0,25$; $Pr = 0,72$; $B = 0,0256$; $v_\infty = v_{1000} = 177,1 \cdot 10^{-6}$ м²/с:

$$\begin{aligned} Re_T^{**} &= [(1 + m) B \Psi_s w_\infty x (K + 1) / (2K v Pr^{0,75})]^{1/(m+1)} = \\ &= [(1 + 0,25) 0,0256 \cdot 0,77 \cdot 50 \cdot x (0,94 + 1) / (2 \cdot 0,94 \cdot 177,1 \times \\ &\times 10^{-6} 0,72^{0,75})]^{1/(1+0,25)} = 1480 x^{0,8}. \end{aligned}$$

Плотность тока $\{ \text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с}) \}$ охлаждающего воздуха находим из уравнения

$$b_{\tau} = \rho_{\text{ст}} w_{\text{ст}} / (\rho_{\infty} w_{\infty} St_0 \Psi_s),$$

т. е.

$$\rho_{\text{ст}} w_{\text{ст}} = b_{\tau} \Psi_s \rho_{\infty} w_{\infty} St_0.$$

$$\begin{aligned} \text{Здесь } St_0 &= B \mu_{\text{ст}}^{0,25} / (2 \mu_{\infty}^{0,25} Pr^{0,75} Re_{\tau}^{*0,25}) = \\ &= 0,0256 \cdot 36,2 \cdot 10^{-6 \cdot 0,25} / [2 \cdot 49 \cdot 10^{-6 \cdot 0,25} \cdot 0,72^{0,75} \times \\ &\times (1480 x^{0,8})^{0,25}] = 2,45 \cdot 10^{-3} x^{-0,2} \end{aligned}$$

и тогда

$$\begin{aligned} \rho_{\text{ст}} w_{\text{ст}} &= 0,819 \cdot 0,77 \cdot 0,277 \cdot 50 \cdot 2,45 \cdot 10^{-3} x^{-0,2} = \\ &= 0,0214 x^{-0,2}. \end{aligned}$$

16.16. Решить задачу 16.15 при условии, что в качестве охлаждающего газа используется водород. Сравнить значения плотностей тока водорода и воздуха и сделать выводы.

16.17. Найти распределение локальных значений чисел St_{∞} и Nu_{∞} по длине дозвуковой части комбинированного сопла в предположении, что турбулентный пограничный слой развивается от начального сечения сопла. Общая длина сопла $L = 203$ мм, площади поперечных сечений докритической части сопла приведены в табл. 16.1.

Таблица 16.1

$\bar{x} = x/L$	0	0,413	0,436	0,452	0,472
$F_{\text{кр}}/F$	0,1112	0,1112	0,1112	0,112	0,128

Продолжение табл. 16.1

$\bar{x} = x/L$	0,503	0,536	0,551	0,575	0,600	0,627
$F_{\text{кр}}/F$	0,147	0,181	0,255	0,445	0,856	1,00

Параметры торможения воздуха в сопле: $T_0 = 600$ К; $p_0 = 0,44$ МПа. Температура стенки постоянна по длине сопла и равна $T_{\text{ст}} = 347$ К. Теплофизические свойства воздуха взять из таблиц Приложения.

Решение. Распределение термодинамической температуры и скорости по внешней границе пограничного слоя определим с помощью таблиц газодинамических функций [1] исходя из значения $q(\lambda) = F_{\text{кр}}/F$, где $\lambda = w_{\infty}/w_{\text{кр}}$, откуда $w_{\infty} = \lambda w_{\text{кр}}$.

Скорость в критическом сечении

$$w_{\text{кр}} = \alpha \sqrt{RT_0} = 1,08 \sqrt{287 \cdot 600} = 448 \text{ м/с},$$

где $\alpha = \sqrt{2k/(k+1)}$.

Термодинамическая температура $T_{\infty} = \tau(\lambda) T_0$.

Значения необходимых газодинамических функций q , τ , λ и величин T_{∞} и w_{∞} представлены в табл. 16.2.

Определим поправку Ψ_s к стандартному закону теплообмена на неизотермичность и сжимаемость:

$$\Psi_s = [(V\bar{\psi} + 1)^2/4 + 0,03 M_{\infty}^2]^{-1},$$

где $\psi = T_{\text{ст}}/T_{\infty}$. Результаты расчета Ψ_s приведены в табл. 16.2.

Определим значения чисел $Re_{\tau 0\infty}^*$ в сечениях сопла, указанных в табл. 16.1, считая, что турбулентный пограничный слой развивается от начального сечения сопла:

$$\begin{aligned} Re_{\tau 0\infty}^* &= \frac{1}{\Delta T \bar{D}} \left[\frac{1+m}{2 Pr^{0,75}} B Re_{0\infty} \int_0^{\bar{x}} \Psi_s \left(\frac{\mu_{\text{ст}}}{\mu_{0\infty}} \right)^m \bar{D}^{m-1} \times \right. \\ &\times \Delta T^{1+m} \left(\frac{k-1}{k+1} \right)^{0,5} \left(\frac{2}{k+1} \right)^{1/(k-1)} d\bar{x} \left. \right]^{1/(1+m)}, \quad (16.1) \end{aligned}$$

где $\bar{D} = D/D_{\text{кр}} = (F/F_{\text{кр}})^{1/2}$; $\Delta T = T_{\text{ст}}^* - T_{\text{ст}}$; $\bar{x} = x/L$; $T_{\text{ст}}^* = \sqrt[3]{Pr} (T_0 - T_{\infty}) + T_{\infty}$ — адиабатная температура стенки;

$$\begin{aligned} Re_{0\infty} &= \rho_{0\infty} w_{\text{макс}} L / \mu_{0\infty} = \rho_{0\infty} \sqrt{2c_p T_0} L / \mu_{0\infty} = \\ &= 2,55 \sqrt{2 \cdot 1052 \cdot 600} \cdot 0,203 / (30,55 \cdot 10^{-6}) = 1,907 \cdot 10^7. \end{aligned}$$

Плотность воздуха при $p = 0,44$ МПа и $T = 600$ К определена по справочнику [4]: $\rho_{0\infty} = 2,55$ кг/м³. После подстановки значений: $Re_{0\infty} = 1,907 \cdot 10^7$; $B = 0,0256$; $m = 0,25$;

$$\begin{aligned} \left(\frac{k-1}{k+1} \right)^{0,5} \left(\frac{2}{k+1} \right)^{1/(k-1)} &= \left(\frac{1,41-1}{1,41+1} \right)^{0,5} \times \\ &\times \left(\frac{2}{1,41+1} \right)^{1/(1,41-1)} = 0,259; \end{aligned}$$

\bar{x}	0	0,413	0,436	0,452	0,477	0,503	0,536	0,561	0,575	0,600	0,627
$q(\lambda)$	0,111	0,111	0,111	0,111	0,128	0,147	0,181	0,255	0,445	0,856	1,000
$\tau(\lambda)$	0,999	0,999	0,999	0,999	0,999	0,998	0,997	0,996	0,986	0,930	0,833
T_{∞}, K	599,5	599,5	599,5	599,4	599,4	598,8	598,2	597	592,0	558,0	500,0
λ	0,072	0,072	0,072	0,075	0,080	0,092	0,120	0,163	0,290	0,650	1,000
$w_{\infty}, m/c$	32,30	32,30	32,30	33,60	35,80	41,20	54,00	73,00	130,0	291,2	448,0
ψ	0,579	0,579	0,579	0,579	0,579	0,580	0,580	0,581	0,586	0,622	0,694
Ψ_s	1,290	1,290	1,290	1,290	1,290	1,290	1,289	1,288	1,283	1,250	1,150
$1/\bar{D}$	0,333	0,333	0,333	0,346	0,358	0,384	0,425	0,505	0,667	0,925	1,000
$\bar{D}^{-0,75}$	0,438	0,438	0,438	0,451	0,462	0,488	0,526	0,599	0,738	0,943	1,000
ΔT	252,9	252,9	252,9	252,9	252,9	252,9	252,8	252,7	252,0	247,8	240,7
$\Delta T^{1,25}$	1009	1009	1009	1009	1009	1009	1008	1007	1004	983,2	948,1
Φ	569,9	569,9	569,9	586,8	601,2	634,7	683,4	777,3	950,6	1159	1090
J	0	235,4	248,5	257,8	273,9	295,6	306,6	317,6	338,3	364,7	395,1
$(96422/\mu_{\infty})^{0,25} \times 10^{-3}$	0	767,0	800,9	824,8	865,8	920,2	947,5	974,6	1025	1089	1161
Re_{∞}^{**}	0	1010	1054	1128	1225	1398	1593	1948	2714	4064	4822
$St_{\infty} \cdot 10^3$	—	3,400	3,370	3,310	3,240	3,140	3,040	2,890	2,650	2,330	2,060
e	0,998	0,998	0,998	0,998	0,997	0,996	0,994	0,989	0,965	0,833	0,634
$\rho_{\infty}, kg/m^3$	2,545	2,545	2,545	2,545	2,540	2,540	2,530	2,520	2,460	2,120	1,617
$\mu_{\infty} \cdot 10^{-6}, Pa \cdot c$	30,55	30,55	30,55	30,55	30,55	30,45	30,45	30,40	30,30	28,50	27,03
$Re_{\infty} \cdot 10^{-6}$	0,546	0,546	0,546	0,570	0,600	0,700	0,910	1,230	2,140	4,400	5,440
Nu_{∞}	—	1337	1325	1358	1400	1582	1992	2559	4083	7381	8060

$$(\mu_{ст}/\mu_{\infty})^m = (20,85 \cdot 10^{-6}/30,55 \cdot 10^{-6})^{0,25} = 0,909;$$

$$Pr^{0,75} = 0,675^{0,75} = 0,745,$$

уравнение (16.1) принимает вид

$$Re_{\infty}^{**} = \left(96422 \int_0^{\bar{x}} \Psi_s \bar{D}^{0,75} \Delta T^{1,25} d\bar{x} \right)^{0,8} / (\Delta T \bar{D}).$$

Значения всех переменных величин, зависящих от \bar{x} , и числа

Re_{∞}^{**} сведены в табл. 16.2; интеграл $J = \int_0^{\bar{x}} \Psi_s \bar{D}^{-0,75} \times$

$\times \Delta T^{1,25} d\bar{x} = \int_0^{\bar{x}} \Phi d\bar{x}$ для каждого \bar{x} вычисляется графически.

Распределение чисел St_{∞} по длине сопла находится по формуле

$$St_{\infty} = 0,0256 \Psi_s \mu_{ст}^{0,25} / (2 \mu_{\infty}^{0,25} Re_{\infty}^{**0,25} Pr^{0,75})$$

и тогда

$$Nu_{\infty} = Re_{\infty} Pr St_{\infty},$$

$$\text{где } Re_{\infty} = \rho_{\infty} w_{\infty} L / \mu_{\infty} = 0,203 \rho_{\infty} w_{\infty} / \mu_{\infty}.$$

Результаты расчета чисел St_{∞} и Nu_{∞} представлены в табл. 16.2. Сравнение расчетных данных с экспериментальными (123), рис. 43) дает хорошее совпадение.

16.18. Рассчитать распределение локальных значений коэффициентов теплоотдачи и плотности теплового потока на выпуклой и вогнутой поверхности лопатки газовой турбины в предположении, что турбулентный пограничный слой развивается от передней кромки лопатки. Расчетная схема лопатки представлена на рис. 16.1. Рабочее тело — воздух. Параметры набегающего потока: скорость воздуха относительно лопатки $w_{\infty} = 253$ м/с; температура $T_{\infty} = 1110$ К; давление $p_{\infty} = 0,473$ МПа. Температуру поверхности лопатки принять постоянной и равной $T_{ст} = 873$ К. Распределение температуры по внешней границе пограничного слоя в зависимости от расстояния x от передней кромки лопатки приведено в табл. 16.3.

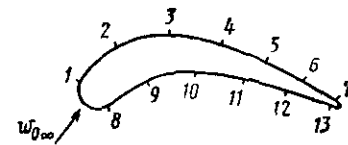


Рис. 16.1

Таблица 16.3

Точка	1	2	3	4	5	6	7
x , мм	3,81	14,0	24,1	31,7	41,8	52,0	62,1
T_{∞} , К	1072	1052	987	1030	1055	1069	1072

Продолжение табл. 16.3

Точка	8	9	10	11	12	13
x , мм	2,54	12,7	22,9	38,1	43,2	53,4
T_{∞} , К	1123	1122	1119	1116	1100	1072

Теплофизические свойства воздуха взять из таблиц Приложения.

Решение. Определим параметры торможения невозмущенного потока $T_{0\infty}$ и $\rho_{0\infty}$, воспользовавшись таблицами газодинамических функций [1] и известными значениями параметров набегающего потока: число Маха $M = w_{0\infty}/\sqrt{kRT_{\infty}} = 253/\sqrt{1,4 \cdot 287 \cdot 1110} = 0,379$; $\tau(M) = 0,972$; $\pi(M) = 0,905$; $T_{0\infty} = T_{\infty}/\tau = 1110/0,972 = 1142$ К; $\rho_{0\infty} = \rho_{\infty}/\pi = 0,473/0,905 = 0,523$ МПа.

Плотность воздуха при параметрах торможения определим по таблице [4]: $\rho_{0\infty} = 1,596$ кг/м³.

Вычислим число Re_{τ}^{**} , предполагая, что турбулентный пограничный слой развивается от передней кромки лопатки:

$$Re_{\tau}^{**} = \frac{1}{\Delta T} \left[\frac{(1+m)}{2 Pr^{0,75}} B Re_{0\infty} \int_0^{\bar{x}} \Psi_s \left(\frac{\mu_{ст}}{\mu_{0\infty}} \right)^m u (1 - u^2)^{1/(k-1)} \Delta T^{(1+m)} d\bar{x} \right]^{1/(m+1)} \quad (16.2)$$

Так как $u = w_{\infty}/w_{\max}$; $(1 - u^2)^{1/(k-1)} = \rho_{\infty}/\rho_{0\infty}$;

$u (1 - u^2)^{1/(k-1)} = w_{\infty} \rho_{\infty}/(w_{\max} \rho_{0\infty})$,

где $w_{\max} = \sqrt{2 c_p T_{\infty}} = \sqrt{2 \cdot 1006 \cdot 1142} = 1516$ м/с,

формула (16.2) принимает вид

$$Re_{\tau}^{**} = \frac{1}{\Delta T} \left[\frac{(1+m)}{2 Pr^{0,75}} B Re_{0\infty} \int_0^{\bar{x}} \Psi_s \left(\frac{\mu_{ст}}{\mu_{0\infty}} \right)^{0,25} \frac{\rho_{\infty} w_{\infty}}{2419} \times \Delta T^{(1+m)} d\bar{x} \right]^{1/(m+1)} \quad (16.3)$$

Определим величины ΔT , Ψ_s и $\rho_{\infty} w_{\infty}$, зависящие от координаты x :

$$\Delta T = T_{ст}^* - T_{ст},$$

где $T_{ст}^* = r (T_{0\infty} - T_{\infty}) + T_{\infty}$ — адиабатная температура стенки; $r = \sqrt{Pr} \simeq 0,9$ — коэффициент восстановления температуры; поправка на неизотермичность и сжимаемость

$$\Psi_s = [2/(V \sqrt{T_{ст}/T_{\infty}} + 1)]^2.$$

Плотность тока воздуха $\rho_{\infty} w_{\infty}$ находим с помощью таблиц газодинамических функций по следующей схеме:

$$\frac{T_{\infty}}{T_{0\infty}} = \tau \begin{cases} M \rightarrow \omega_{\infty} = M \sqrt{kRT_{\infty}} \\ \varepsilon \rightarrow \rho_{\infty} = \varepsilon \rho_{0\infty} \end{cases} \rightarrow \rho_{\infty} w_{\infty}.$$

Результаты расчета ΔT , Ψ_s , $\rho_{\infty} w_{\infty}$ представлены в табл. 16.4.

В выражении для Re_{τ}^{**} : $B = 0,0256$; $m = 0,25$; $Pr = 0,72$;

$$\mu_{ст} = 39,14 \cdot 10^{-6} \text{ Н} \cdot \text{с/м}^2; \mu_{0\infty} = 45,9 \cdot 10^{-6} \text{ Н} \cdot \text{с/м}^2.$$

Для выпуклой стороны лопатки

$$Re_{0\infty \text{ вып}} = \rho_{0\infty} w_{\max} S_{\text{вып}}/\mu_{0\infty} = 1,596 \cdot 1516 \cdot 62,1 \times 10^{-3}/(45,9 \cdot 10^{-6}) = 3,273 \cdot 10^6$$

и тогда в соответствии с формулой (16.3)

$$Re_{\tau \text{ вып}}^{**} = \left(26,84 \int_0^{\bar{x}} \Psi_s (\rho_{\infty} w_{\infty}) \Delta T^{1,25} d\bar{x} \right)^{0,8} / \Delta T. \quad (16.4)$$

Для вогнутой стороны лопатки

$$Re_{0\infty \text{ вогн}} = \rho_{0\infty} w_{\max} S_{\text{вогн}}/\mu_{0\infty} = 1,596 \cdot 1516 \cdot 53,4 \times 10^{-3}/(45,9 \cdot 10^{-6}) = 2,81 \cdot 10^6$$

и, следовательно,

$$Re_{\tau}^{**} \text{ вогн} = \left(23,04 \int_0^{\bar{x}} \Psi_s (\rho_{\infty} \omega_{\infty}) \Delta T^{1,25} d\bar{x} \right)^{0,8} / \Delta T. \quad (16.5)$$

Значения интеграла $J = \int_0^{\bar{x}} \Phi d\bar{x} = \int_0^{\bar{x}} \Psi_s (\rho_{\infty} \omega_{\infty}) \Delta T^{1,25} \times \bar{x} d\bar{x}$ найдены графически, после чего по формулам (16.4), (16.5) подсчитаны числа Re_{τ}^{**} (при $x = 0$ $\Phi = 0$, так как по условиям задачи пограничный слой начинается развиваться от передней кромки лопатки, где δ_{τ} и δ_{τ}^{**} равны нулю, а следовательно, $Re_{\tau}^{**} = 0$). Результаты расчета сведены в табл. 16.4.

Зная Re_{τ}^{**} , определяем число St:

$$St = B \Psi_s \mu_{\text{ст}}^{0,25} / (2 \mu_{\infty}^{0,25} Re_{\tau}^{**0,25} Pr^{0,75}) = 0,0256 \Psi_s \times \\ \times 39,14 \cdot 10^{-6 \cdot 0,25} / (2 \cdot 45,9 \cdot 10^{-6 \cdot 0,25} \cdot 0,72^{0,75} \times \\ \times Re_{\tau}^{**0,25}) = 1,575 \cdot 10^{-2} \Psi_s / Re_{\tau}^{**0,25}$$

Распределение локальных значений коэффициентов теплоотдачи и плотности теплового потока рассчитывается по формулам

$$\alpha = St \rho_{\infty} \omega_{\infty} c_{p\infty}; q = \alpha (T_{\text{ст}}^* - T_{\text{ст}}).$$

16.19. Найти распределение относительного удельного расхода воздуха $F = \rho_{\text{ст}} \omega_{\text{ст}} / (\rho_{\infty} \omega_{\infty})$ вдоль вогнутой поверхности лопатки газовой турбины, необходимое для поддержания постоянной температуры этой поверхности $T_{\text{ст}} = 873$ К. Охлаждающий воздух поступает из компрессора во внутреннюю полость лопатки при температуре 473 К. Параметры течения воздуха на внешней границе пограничного слоя и размеры лопатки взять из задачи 16.18.

16.20. Графитовая пластина длиной 300 мм обдувается потоком кислорода со скоростью $\omega_{\infty} = 100$ м/с. Температура и давление невозмущенного потока $T_{\infty} = 298$, $p_{\infty} = 0,1$ МПа. Поток кислорода направлен вдоль пластины. Определить параметр вдува $b_{\tau 1}$ и температуру поверхности пластины $T_{\text{ст}}$, считая, что в турбулентном пограничном слое имеют место следующие химические реакции: $2O \rightleftharpoons O_2$; $C + 1/2 O_2 \rightleftharpoons CO$.

Таблица 16.4

Точки	$\Delta T, K$	$T_{\text{ст}}/T_{\infty}$	Ψ_s	$\sqrt{Re_{\tau}^{**}},$ м/с	M	$\tau (M)$	$\omega_{\infty},$ м/с	$\varepsilon (M)$	$\rho_{\infty},$ кг/м ³	$\rho_{\infty} \omega_{\infty},$ кг/(м ² ·с)
1	262,0	0,814	1,105	656,3	0,570	0,939	374,1	0,854	1,363	509,9
2	260,0	0,830	1,100	650,1	0,656	0,921	426,5	0,814	1,330	554,5
3	253,5	0,884	1,063	629,7	0,885	0,864	557,3	0,690	1,101	613,6
4	258,0	0,848	1,084	643,3	0,735	0,902	472,8	0,774	1,235	583,9
5	260,3	0,827	1,100	651,1	0,641	0,924	417,4	0,820	1,309	546,4
6	261,7	0,817	1,104	655,4	0,585	0,936	383,4	0,847	1,352	518,4
7	262,0	0,814	1,105	656,3	0,570	0,939	374,1	0,854	1,363	509,9
8	267,1	0,777	1,130	671,7	0,295	0,983	198,2	0,958	1,530	303,2
9	267,0	0,778	1,129	671,4	0,304	0,982	204,1	0,955	1,524	311,0
10	266,7	0,780	1,128	670,5	0,323	0,980	216,6	0,950	1,516	328,4
11	266,4	0,782	1,126	669,6	0,342	0,977	229,0	0,944	1,507	345,1
12	264,5	0,794	1,118	664,8	0,437	0,963	290,5	0,911	1,454	422,4
13	262,0	0,814	1,105	656,3	0,580	0,939	380,7	0,851	1,358	517,0

Продолжение табл. 16.4

Точки	$\Delta T^{1,25}$	$\Phi \cdot 10^{-3}$	$\bar{x} - x/S$		$J \cdot 10^{-3}$	Re_{τ}^{**}	$St \cdot 10^4$	$\alpha, \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$	$q_{\text{ст}}, \text{ кВт}/\text{м}^2$
			$x/S_{\text{вып}}$	$x/S_{\text{вогн}}$					
1	1054	5939	0,061	—	181,1	135,2	51,0	2168	568,0
2	1044	6368	0,225	—	1190	614,6	35,0	1952	507,5
3	1012	6601	0,388	—	2247	1048	29,0	1790	453,8
4	1034	6545	0,510	—	3049	1315	28,0	1645	424,4
5	1045	6284	0,673	—	4095	1651	27,0	1484	386,3
6	1053	6024	0,837	—	4610	1804	26,6	1387	363,0
7	1054	5939	1,000	—	5585	2100	25,7	1318	345,3
8	1080	3700	—	0,048	88,05	65,93	62,0	1891	505,1
9	1079	3790	—	0,234	786,0	380,0	40,0	1251	334,0
10	1078	3993	—	0,429	1545	653,0	35,0	1156	308,3
11	1076	4182	—	0,714	2710	1025	31,0	1076	286,6
12	1067	5037	—	0,809	3148	1164	30,0	1275	337,2
13	1054	6022	—	1,000	4204	1481	28,0	1456	381,5

Решение. Температуру пластины определим из уравнения теплового баланса на поверхности пластины ([19], уравнение VI.186)

$$q_{ст} = \rho_{\infty} w_{\infty} St \left\{ \sum_i C_{i\infty} (i_{i\infty} - i_{ict}) + w_{\infty}^2/2 + \right. \\ \left. + \sum_i [\tilde{C}_{i\infty} - (b_{т1} + 1) (\tilde{C}_i - r_{i, El} C_{El})_{ст}] \Delta Q_{El} - \right. \\ \left. - \sum_i [C_{i200} - (b_{т1} + 1) C_{i2ст}] \Delta Q_{i2} - b_{т1} i_{\phi} \right\}.$$

В рассматриваемом случае это уравнение можно значительно упростить. Учитывая, что полную концентрацию компонента можно выразить с помощью соотношения $\tilde{C}_i = C_i + C_{i2} + r_{i, El} C_{El}$, получим

$$q_{ст} = \rho_{\infty} w_{\infty} St \left\{ \sum_i C_{i\infty} (i_{i\infty} - i_{ict}) + w_{\infty}^2/2 + \sum_i [C_{i\infty} - \right. \\ \left. - (b_{т1} + 1) (C_i + C_{i2})_{ст}] \Delta Q_{\infty} - \sum_i [C_{i2\infty} - \right. \\ \left. - (b_{т1} + 1) C_{i2ст}] \Delta Q_{i2} - b_{т1} i_{\phi} \right\}.$$

Считая, что весь кислород на стенке поглощается материалом стенки, т. е. $\tilde{C}_{O_{ст}} = 0$, $C_{O_{ст}} = 0$, а во внешнем потоке присутствует только O_2 , окончательно получим

$$q_{ст}/(\rho_{\infty} w_{\infty} St) = C_{O_2\infty} i_{O_2ст} - C_{O_2\infty} i_{O_2\infty} + \\ + w_{\infty}^2/2 + C_{CO\infty} \Delta Q_{CO} - C_{O_2\infty} \Delta Q_{O_2} - b_{т1} i_{\phi}. \quad (16.6)$$

Считая режим квазистационарным, т. е. что скорость возгонки принимает некоторое постоянное значение, а материал стенки нагревается от некоторой начальной температуры T_n до температуры $T_{ст}$, определим $q_{ст}$:

$$q_{ст} = \rho_{ст} w_{ст} C_{ст} (T_{ст} - T_n). \quad (16.7)$$

Из уравнений (16.6) и (16.7) после несложных преобразований получим

$$b_{т1} [C_c (T_{ст} - T_n) + i_{\phi}] = \Delta i_{\phiф},$$

где

$$\Delta i_{\phiф} = C_{O_2\infty} i_{O_2ст} - C_{O_2\infty} i_{O_2\infty} + w_{\infty}^2/2 + \\ + C_{O_2\infty} \Delta Q_{CO} - C_{O_2\infty} \Delta Q_{O_2}. \quad (16.8)$$

Решив уравнение (16.8), определим $T_{ст}$.

Тепловые эффекты образования (кДж/г) вычисляются по формулам:

$$\Delta Q_{CO} = i_O + \mu_c i_C/\mu_O - \mu_{CO} i_{CO}/\mu_O;$$

$$\Delta Q_{O_2} = i_O - i_{O_2},$$

где i_O , i_{O_2} , i_C , i_{CO} — значения удельных энтальпий компонентов.

Теплота, выделяемая при диссипации энергии в пограничном слое, равна

$$w_{\infty}^2/2 = 10^4/2 = 5000 \text{ Дж/кг} = 5 \cdot 10^{-3} \text{ кДж/г}.$$

Параметр вдува определим из граничных условий. В случае тройной аналогии можно записать

$$b_{т1} = \rho_{ст} w_{ст}/(\rho_{\infty} w_{\infty} St) = C_{ст}/(1 - \tilde{C}_{ст}),$$

где $\tilde{C}_{ст}$ — полная концентрация углерода на стенке, которая в рассматриваемом случае может быть подсчитана по формуле

$$\tilde{C}_{ст} = (C_c + r_{c, CO} C_{CO})_{ст}.$$

На стенке весь испарившийся углерод реагирует с кислородом, поступающим за счет конвекции и диффузии к стенке, поэтому $C_{ст} = 0$; $C_{COст} = 1$, следовательно,

$$b_{т1} = r_{c, CO}/(1 - r_{c, CO}) = 12/(28(1 - 12/28)) = 0,75.$$

Таблица 16.5

Т, К	2000	3000	4000	4500
i_O , кДж/г	1,039	1,118	1,194	1,235
i_{O_2} , кДж/г	0,106	0,175	0,248	0,285
i_{CO} , кДж/г	0,116	0,191	0,267	0,306
i_{ϕ} , кДж/г	3,400	3,384	3,367	3,358
ΔQ_{O_2} , кДж/г	0,910	0,915	0,918	0,919
ΔQ_{CO} , кДж/(г·К)	3,513	3,525	3,532	3,540
$C_c \cdot 10^{-3}$, кДж/(г·К)	0,1168	0,1206	0,1237	0,1254
$\Delta i_{\phiф}$, кДж/г	2,709	2,785	2,868	2,906
$b_{т1} [C_c (T_{ст} - 298) + i_{\phi}]$, кДж/г	2,699	2,782	2,869	2,914

Для графического решения уравнения (16.8) составлена табл. 16.5 и вычислены значения энтальпий и тепловых эффектов образования. Результатом решения является значение температуры стенки $T_{ст} = 3400$ К.

16.21. Для условий задачи 16.20 определить массовую скорость уноса $(\rho w)_c$ графита в сечении $x = 0,3$ м, а также толщину δ унесенного слоя графита за время $\Delta t = 30$ с. Считать, что турбулентный пограничный слой развивается от передней кромки пластины.

16.22. На сколько уменьшится интенсивность выгорания графита, если в качестве окислителя в предыдущей задаче использовать атмосферный воздух? Массовую долю кислорода в воздухе принять равной $C_{O_2} = 0,232$.

ГЛАВА 17

ТЕПЛООБМЕН ПРИ БОЛЬШИХ СКОРОСТЯХ И ТЕМПЕРАТУРАХ ГАЗОВОГО ПОТОКА

17.1. Определить температуру тонкой теплоизолированной пластины, продольно обтекаемой потоком газа. Скорость газа 2000 м/с; статическая температура потока 480 К; $k = 1,22$; молярная масса газа 23 кг/кмоль. Лучистым теплообменом и теплоемкостью пластины пренебречь. Режим течения в пограничном слое считать турбулентным.

Решение. Газовая постоянная

$$R = 8314/\mu = 8314/23 = 362 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К)};$$

скорость звука

$$a = \sqrt{kRT} = \sqrt{1,22 \cdot 362 \cdot 480} = 460 \text{ м/с};$$

число Маха

$$M = w/a = 2000/460 = 5,34.$$

Число Pr связано с k формулой $Pr = 4k/(9k - 5)$, поэтому

$$Pr = 4 \cdot 1,22/(9 \cdot 1,22 - 5) = 0,815; \quad r = \sqrt[3]{Pr} = \sqrt[3]{0,815} = 0,93.$$

Температура пластины

$$T_{ст}^* = T \left(1 + \frac{k-1}{2} r M^2 \right) = 480 \left(1 + \frac{1,22-1}{2} 0,93 \times \right. \\ \left. \times 4,34^2 \right) = 1410 \text{ К}.$$

17.2. Вычислить температуру в передней критической точке затупленного конуса, движущегося в воздухе со скоростью 1450 м/с под нулевым углом атаки. Температура воздуха -40°C . Коэффициент восстановления температуры $r = 1$. Лучистым теплообменом и отводом теплоты внутри тела пренебречь.

17.3. Найти значение конвективного теплового потока в критическом сечении сопла ракетного двигателя. Расстояние критического сечения от головки камеры сгорания 0,5 м, температура стенки сопла со стороны газов 800°C , статическое давление и температура потока равны 1,29 МПа и 2350°C соответственно. Продукты сгорания имеют следующие физические свойства: $\mu_{ст} = 3,1 \cdot 10^{-5}$ Па \cdot с; $c_{рст} = 1520$ Дж/(кг \cdot К); $k = 1,18$; $R = 341$ Дж (кг \cdot К).

Решение. Определим число Pr

$$Pr = 4k/(9k - 5) = 4 \cdot 1,18/(9 \cdot 1,18 - 5) = 0,84$$

и теплопроводность продуктов сгорания

$$\lambda_{ст} = \mu_{ст} \cdot c_{рст} / Pr = 3,1 \cdot 10^{-5} \cdot 1520 / 0,84 = 5,61 \cdot 10^{-2} \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}.$$

Скорость потока

$$w_1 = w_{кр} = \sqrt{kRT_{кр}} = \sqrt{1,18 \cdot 341 \cdot 2623} = 1028 \text{ м/с}.$$

Режим течения в пограничном слое считаем турбулентным. Коэффициент восстановления температуры $r = \sqrt[3]{Pr} =$

$$\sqrt[3]{0,84} = 0,94. \text{ Число } M = 1.$$

Адиабатная температура стенки

$$T_{ст}^* = T_1 \left(1 + \frac{k-1}{2} r M_1^2 \right) = 2623 \left(1 + \right. \\ \left. + \frac{1,18-1}{2} 0,94 \right) = 2840 \text{ К}.$$

Плотность при температуре стенки

$$\rho_{ст} = p/(RT_{ст}) = 12,9 \cdot 10^5 / (341 \cdot 1073) = 3,52 \text{ кг/м}^3.$$

Коэффициент теплоотдачи определяем по формуле [12]

$$\alpha = 0,029 \frac{\lambda_{ст}}{x} \left(\frac{w_1 \rho_{ст} x}{\mu_{ст}} \right)^{0,8} Pr_{ст}^{0,43} \left(\frac{T_{ст}}{T_{ст}^*} \right)^{0,4} \left(\frac{T_{ст}^*}{T_1} \right)^{0,11} =$$

$$= 0,029 \frac{5,61 \cdot 10^{-2}}{0,5} \left(\frac{1028 \cdot 3,52 \cdot 0,5}{3,1 \cdot 10^{-5}} \right)^{0,8} 0,84^{0,43} \times$$

$$\times \left(\frac{1073}{2840} \right)^{0,4} \left(\frac{2840}{2623} \right)^{0,11} = 3370 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}.$$

Конвективный тепловой поток в критическом сечении сопла

$$q_{ст} = \alpha (T_{ст}^* - T_{ст}) = 3370 (2840 - 1073) = 5,95 \text{ МВт/м}^2.$$

17.4. Определить коэффициент теплоотдачи в выходном сечении сопла ракетного двигателя, находящемся на расстоянии 0,75 м от головки камеры сгорания. Расход продуктов сгорания в двигателе 14 кг/с. Температура стенки сопла 800° С; статическая температура потока 1497° С; давление на срезе сопла 981 Па; диаметр выходного сечения 0,25 м. Физические свойства газа взять из предыдущей задачи. Режим течения в пограничном слое считать турбулентным.

17.5. Найти средний коэффициент теплоотдачи от воздушного потока к плоской пластине длиной $l = 200$ мм, обтекаемой в продольном направлении. Скорость потока 1000 м/с. Температура поверхности пластины 227° С. Статическое давление и температура потока равны 500 Па и -65° С. Физические свойства воздуха: $\lambda_{ст} = 0,04$ Вт/(м·К); $\mu_{ст} = 2,67 \cdot 10^{-6}$ Па·с; $\mu_{\infty} = 1,21 \cdot 10^{-6}$ Па·с; $Pr_{ст} = 0,68$.

Решение. Плотность воздуха при температуре потока

$$\rho_{\infty} = p_{\infty} / RT_{\infty} = 500 / (287 \cdot 208) = 8,37 \cdot 10^{-3} \text{ кг/м}^3.$$

Число Рейнольдса

$$Re_{\infty} = w_{\infty} \rho_{\infty} x / \mu_{\infty} = 1000 \cdot 8,37 \cdot 10^{-3} \cdot 0,2 / (1,21 \cdot 10^{-6}) =$$

$$= 1,39 \cdot 10^5 < Re_{кр} = 2,3 \cdot 10^5.$$

Следовательно, режим течения в пограничном слое ламинарный.

Плотность воздуха при температуре поверхности пластины

$$\rho_{ст} = p_{\infty} / (RT_{ст}) = 500 / (287 \cdot 500) = 3,48 \cdot 10^{-3} \text{ кг/м}^3.$$

Средний коэффициент теплоотдачи

$$\alpha = 0,332 \lambda_{ст} \left(\frac{w_{\infty} \rho_{ст}}{\mu_{ст}} \right)^{1/2} Pr_{ст}^{1/3} \int_0^l \frac{dx}{V_x} =$$

$$= 0,664 \frac{\lambda_{ст}}{l} \left(\frac{w_{\infty} \rho_{ст} l}{\mu_{ст}} \right)^{1/2} Pr_{ст}^{1/3} =$$

$$= 0,664 \frac{4 \cdot 10^{-2}}{0,2} \left(\frac{1000 \cdot 3,48 \cdot 10^{-3} \cdot 0,2}{2,67 \cdot 10^{-6}} \right)^{1/2} (0,68)^{1/3} =$$

$$= 18,9 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}.$$

17.6. Определить плотность конвективного теплового потока, поступающего в сечение поверхности тонкого крыла сверхзвукового летательного аппарата, расположенное на расстоянии 0,4 м от передней кромки. Температура поверхности крыла 77° С. Скорость полета соответствует числу $M_{\infty} = 4,91$. Температура и давление окружающего воздуха -41° С и 32,2 кПа. Крыло обтекается под нулевым углом атаки. Режим течения в пограничном слое турбулентный. Физические свойства воздуха: $\lambda_{ст} = 0,03$ Вт/(м·К); $\mu_{ст} = 2,07 \cdot 10^{-6}$ Па·с; $Pr_{ст} = 0,7$.

17.7. Тело, имеющее форму острого конуса с полууглом при вершине 30°, движется в атмосфере Земли на высоте 3000 м под нулевым углом атаки. Скорость полета 2200 м/с. Вычислить местное значение коэффициента теплоотдачи на расстоянии 1 м от вершины конуса, измеренном вдоль образующей. Режим течения в пограничном слое турбулентный. Температура поверхности тела $t_{ст} = 200$ ° С; $\lambda_{ст} = 3,93 \times 10^{-2}$ Вт/(м·К); $Pr_{ст} = 0,68$; $\mu_{ст} = 26 \cdot 10^{-6}$ Па·с. Коэффициент восстановления температуры принять равным 0,89. Влиянием диссоциации пренебречь.

Решение. По таблицам стандартной атмосферы [17] находим физические параметры воздуха на высоте 3000 м: $T_{\infty} = 269$ К; $\rho_{\infty} = 0,909$ кг/м³; $a_{\infty} = 329$ м/с; $v_{\infty} = 1,86 \cdot 10^{-5}$ м²/с. Число Маха $M_{\infty} = w_{\infty} / a_{\infty} = 2200 / 329 = 6,69$.

Определяем параметры за косым скачком уплотнения, возникающим при обтекании конуса. Из таблиц [8] находим значения скорости, температуры и плотности во внешнем потоке у поверхности конуса: $w_1 = 1820$ м/с; $T_1 = 1034$ К; $\rho_1 = 4,23$ кг/м³; $a_1 = \sqrt{kRT_1} = \sqrt{1,4 \cdot 287 \cdot 1034} = 6,45$ м/с; $M_1 = w_1 / a_1 = 1820 / 645 = 2,82$. Для воздуха $(k-1)/2 = 0,2$.

Вычисляем адиабатную температуру стенки

$$T_{ст}^* = T_1 \left(1 + \frac{k-1}{2} M_1^2 \right) = 1034 (1 + 0,2 \cdot 0,89 \cdot 2,82)^2 = 2500 \text{ К.}$$

Плотность воздуха при температуре стенки

$$\rho_{ст} = \rho_1 T_1 / T_{ст} = 4,23 \cdot 1034 / 473 = 9,25 \text{ кг/м}^3.$$

Коэффициент теплоотдачи определяем по формуле [12]

$$\alpha = 0,034 \frac{\lambda_{ст}}{x} \left(\frac{w_1 \rho_{ст} x}{\mu_{ст}} \right)^{0,8} Pr_{ст}^{0,43} \left(\frac{T_{ст}}{T_{ст}^*} \right)^{0,4} \left(\frac{T_{ст}}{T_1} \right)^{0,11} = 0,034 \cdot 3,93 \cdot 10^{-2} \left(\frac{1820 \cdot 9,25 \cdot 1}{26 \cdot 10^{-6}} \right)^{0,8} 0,68^{0,43} \left(\frac{473}{2500} \right)^{0,4} \times \left(\frac{2500}{1034} \right)^{0,11} = 7,17 \text{ кВт/(м}^2 \cdot \text{К)}.$$

17.8. Определить адиабатную температуру стенки, коэффициент теплоотдачи и плотность теплового потока в сечении $x = 1$ м головной части летательного аппарата, имеющей форму острого конуса с полууглом при вершине 20° , при полете с нулевым углом атаки. Параметры внешнего потока у поверхности головной части за косым скачком уплотнения следующие: $M_1 = 3,51$; $T_1 = 423 \text{ К}$; $\rho_1 = 0,055 \text{ кг/м}^3$; температура поверхности головной части $T_{ст} = 373 \text{ К}$; $\lambda_{ст} = 3,21 \cdot 10^{-2} \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$; $\mu_{ст} = 21,8 \times 10^{-6} \text{ Па} \cdot \text{с}$; $Pr = 0,69$. Режим течения в пограничном слое считать турбулентным (x — координата, отсчитываемая от передней критической точки вдоль контура тела).

17.9. Вычислить плотность теплового потока, поступающего в обшивку тонкого плоского руля управляемой ракеты, летящей на высоте 40 км со скоростью 1290 м/с, в точке, находящейся на расстоянии 0,1 м от передней кромки, со стороны, обращенной к потоку. Угол отклонения плоскости руля от направления набегающего потока составляет $10^\circ 50'$. Обшивка имеет температуру 150°С . Режим течения в пограничном слое ламинарный. Параметры воздуха на высоте 40 км: $T_\infty = 258 \text{ К}$; $p_\infty = 296 \text{ Па}$; $\rho_\infty = 4 \cdot 10^{-3} \text{ кг/м}^3$; $a_\infty = 322 \text{ м/с}$; $\mu_\infty = 16,4 \cdot 10^{-6} \text{ Па} \cdot \text{с}$. Параметры потока за косым скачком определить по таблицам [8].

17.10. Определить коэффициент теплоотдачи и плотность теплового потока в передней критической точке затупленного конуса, обтекаемого потоком воздуха со скоростью, соответствующей числу $M_\infty = 4$. Температура поверхности

поддерживается равной 100°С . Радиус затупления конуса равен 50 мм. Режим течения в окрестности передней критической точки считать ламинарным. Параметры набегающего потока соответствуют высоте 35 км.

Решение. Коэффициент теплоотдачи в передней критической точке осесимметричного тела при ламинарном режиме течения в пограничном слое может быть вычислен по формуле [12]:

$$Nu_{ст0} = B Re_{ст0}^{0,5} Pr_{ст}^{0,4} [\mu_\infty \rho_\infty / (\mu_{ст} \rho_{ст})]^{0,4},$$

где $Nu_{ст0} = \alpha x_0 / \lambda_{ст}$; $Re_{ст0} = a_{кр} \rho_{ст} x_0 / \mu_{ст}$; $a_{кр}$ — критическая скорость звука, для воздуха $a_{кр} = 18,3 \sqrt{T_0}$; $\rho_{ст} = \rho_0 / (RT_{ст})$ — плотность воздуха при температуре $T_{ст}$ и давлении полного торможения за прямым скачком уплотнения; x_0 — расстояние вдоль контура тела от передней критической точки до точки, соответствующей углу $\varphi = 45^\circ$ (рис. 17.1); $x_0 = \pi d / 8 = \pi 0,1 / 8 = 0,039 \text{ м}$ (здесь $d = 2R$, где R — радиус затупления конуса); коэффициент $B = 0,763$ для осесимметричного и 0,57 для плоского тела.

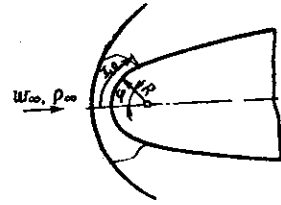


Рис. 17.1

Из таблиц стандартной атмосферы [17] для высоты 35 км находим: $p_\infty = 580 \text{ Па}$; $T_\infty = 244 \text{ К}$; $\rho_\infty = 8,28 \cdot 10^{-3} \text{ кг/м}^3$; $\mu_\infty = 15,7 \cdot 10^{-6} \text{ Па} \cdot \text{с}$; $a_\infty = 313 \text{ м/с}$.

Параметры заторможенного потока при $M_\infty = 4$:

$$T_0 = T_\infty \left(1 + \frac{k-1}{2} M_\infty^2 \right) = 244 (1 + 0,2 \cdot 4^2) = 1026 \text{ К};$$

$$p_0 = p_\infty \left(1 + \frac{k-1}{2} M_\infty^2 \right)^{\frac{k}{k-1}} = 580 (1 + 0,2 \cdot 4^2)^{3,5} = 88,2 \text{ кПа}.$$

Физические параметры воздуха при $t_{ст} = 100^\circ \text{С}$ и $p_\infty = 580 \text{ Па}$: $\lambda_{ст} = 3,21 \cdot 10^{-2} \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$; $\mu_{ст} = 21,8 \cdot 10^{-6} \text{ Па} \cdot \text{с}$; $Pr_{ст} = 0,69$; $\rho_{ст} = \rho_\infty T_\infty / T_{ст} = 8,28 \cdot 10^{-3} \cdot 244 / 373 = 5,41 \cdot 10^{-3} \text{ кг/м}^3$.

Давление полного адиабатного торможения за прямым скачком уплотнения берем из таблиц [8]: при $M_\infty = 4$ $p_0 / p_\infty =$

$= 0,139$, откуда $\rho_0 = 0,139 \cdot 88,2 = 12,27$ кПа. Можно также воспользоваться формулой

$$\rho_0 = \rho_\infty \frac{166,7 M_\infty^2}{(7M_\infty^2 - 1)^{2,5}}$$

В передней критической точке адиабатная температура стенки и критическая скорость звука равны соответственно:

$$T_{ст} = T_0 = 1026 \text{ К}; a_{кр} = 18,3 \sqrt{T_0} = 18,3 \sqrt{1026} = 585 \text{ м/с}.$$

Плотность за прямым скачком уплотнения при температуре $T_{ст}$ составляет

$$\rho'_{ст} = \rho'_0 / (RT_{ст}) = 12\,270 / (287 \cdot 373) = 0,115 \text{ кг/м}^3.$$

Находим коэффициент теплоотдачи

$$\alpha = 0,763 \frac{\lambda_{ст}}{x_a} \sqrt{\frac{a_{кр} \rho'_{ст} x_0}{\mu_{ст}}} Pr_{ст}^{0,4} \left(\frac{\mu_\infty \rho_\infty}{\mu_{ст} \rho_{ст}} \right)^{0,4} =$$

$$= 0,763 \frac{3,21 \cdot 10^{-2}}{0,039} \sqrt{\frac{585 \cdot 0,115 \cdot 0,039}{21,8 \cdot 10^{-6}}} 0,69^{0,4} \times$$

$$\times \left(\frac{15,7 \cdot 10^{-6} \cdot 8,28 \cdot 10^{-3}}{21,8 \cdot 10^{-6} \cdot 5,41 \cdot 10^{-3}} \right)^{0,4} = 197 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}.$$

Определяем плотность теплового потока в передней критической точке

$$q_{ст} = \alpha (T_0 - T_{ст}) = 197 (1026 - 373) = 129 \text{ кВт/м}^2.$$

17.11. Воспользовавшись формулой, приведенной в предыдущей задаче, определить коэффициент теплоотдачи в передней критической точке тела, летящего на высоте 28 км со скоростью, соответствующей числу $M_\infty = 4,5$. Тело имеет форму сферы, диаметр которой 200 мм. Температура поверхности тела $T_{ст} = 773$ К.

Физические свойства воздуха: $\lambda_{ст} = 5,74 \cdot 10^{-2}$ Вт/(м·К); $\mu_{ст} = 36,2 \cdot 10^{-6}$ Па·с; $T_\infty = 244$ К; $\rho_\infty = 581$ Па; $Pr_{ст} = 0,69$; $\mu_\infty = 15,7 \cdot 10^{-6}$ Па·с.

17.12. Определить плотность теплового потока на передней критической линии прямого крыла, поперечное сечение передней кромки которого имеет форму затупленного клина с радиусом затупления 5 мм. Температура поверхности передней кромки крыла 300°С . Скорость полета 1500 м/с.

Температура и давление окружающей среды равны -56°С и 2530 Па соответственно. Физические свойства воздуха:

$$\lambda_{ст} = 4,60 \cdot 10^{-2} \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}; \mu_{ст} = 29,8 \cdot 10^{-6} \text{ Па} \cdot \text{с};$$

$$Pr_{ст} = 0,67; \mu_\infty = 14,2 \cdot 10^{-6} \text{ Па} \cdot \text{с}.$$

Режим течения в окрестности передней кромки крыла считать ламинарным.

Для решения воспользоваться формулой, приведенной в задаче 17.10.

17.13. Определить коэффициент теплоотдачи на цилиндрической части корпуса летательного аппарата в сечении, находящемся на расстоянии 10 м от передней критической точки, при полете на высотах 0, 10 и 20 км. Скорость полета 1500 м/с. Температура поверхности корпуса поддерживается равной 400°С ; $\lambda_{ст} = 5,21 \cdot 10^{-2}$ Вт/(м·К); $\mu_{ст} = 33,1 \cdot 10^{-6}$ Па·с; $Pr_{ст} = 0,68$.

Параметры внешнего потока в расчетном сечении у поверхности корпуса принять равными параметрами невозмущенного потока. Физические характеристики атмосферы для указанных высот:

H, км	0	10	20
t, °С	15	-50	-56
p, Па	$1013 \cdot 10^2$	26 490	5527

Режим течения в пограничном слое считать турбулентным.

17.14. Воспользовавшись условиями предыдущей задачи, вычислить плотность теплового потока, поступающего к поверхности корпуса летательного аппарата, при полете на высоте 30, 40 и 60 км. Считать, что режим течения в пограничном слое становится ламинарным при

$$Re < Re_{кр} = (\omega_\infty \rho_\infty x / \mu_\infty) = 5 \cdot 10^6.$$

Данные о физических свойствах воздуха:

H, км	30	40	50
t, °С	-42,8	-15,5	0,85
p, Па	1184,0	295,9	84,6
$\mu \cdot 10^6$, Па·с	15,0	16,4	17,2

17.15. Во сколько раз увеличится коэффициент теплоотдачи в сечении $x = 1$ м на нижней стороне тонкого самолетного крыла при изменении угла атаки от 0 до $20^\circ 21'$, где x — координата, отсчитываемая от передней критической точки вдоль контура поперечного сечения крыла? Параметры

набегающего потока: $M_\infty = 3,5$; $p_\infty = 308 \cdot 10^3$ Па; $T_\infty = 230$ К; $\mu_\infty = 14,9 \cdot 10^{-6}$ Па·с. Температура поверхности крыла 40° С. Параметры за косым скачком уплотнения найти по таблицам [8].

Определить режим течения в пограничном слое, воспользовавшись значением критического числа Рейнольдса для плоской пластины.

17.16. Определить погрешность при измерении температуры в камере сгорания воздушно-реактивного двигателя, обусловленную тепловым излучением. Средняя скорость потока в камере сгорания 70 м/с. Температура измеряется термопарой, установленной поперек потока. Показание термопары 650° С, диаметр защитной трубки термопары 8 мм, диаметр камеры сгорания 320 мм; температура внутренней поверхности камеры 330° С; степень черноты поверхности защитной трубки 0,8. Физические свойства газа: $\lambda = 7,2 \times 10^{-2}$ Вт/(м·К); $\nu = 135 \cdot 10^{-6}$ м²/с. Отводом теплоты через защитную трубку пренебречь.

Решение. При установившемся тепловом режиме конвективный тепловой поток от газа к термопаре в рассматриваемых условиях равен лучистому тепловому потоку от термопары к стенкам камеры, поэтому

$$\alpha (T_\infty - T_{ст1}) = \varepsilon_{пр} C_0 \left[\left(\frac{T_{ст1}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{ст2}}{100} \right)^4 \right],$$

где α — коэффициент теплоотдачи от потока газа к поверхности защитной трубки термопары; $T_{ст1}$ и $T_{ст2}$ — температуры поверхности защитной трубки и камеры сгорания, К; T_∞ — действительная температура газа, К; $\varepsilon_{пр}$ — приведенная степень черноты системы; $C_0 = 5,7$ Вт/(м² × К⁴).

Считая, что термопара показывает температуру поверхности защитной трубки, определим действительную температуру потока

$$T_\infty = T_{ст1} + \frac{\varepsilon_{пр} C_0 [(T_{ст1}/100)^4 - (T_{ст2}/100)^4]}{\alpha}.$$

При поперечном обтекании одиночных труб воздухом коэффициент α может быть вычислен по формуле: $Nu_\infty = 0,18 Re_\infty^{0,62}$. Определяющим размером является диаметр трубы d , тогда

$$\alpha = 0,18 \frac{\lambda_\infty}{d} \left(\frac{w_\infty d}{\nu_\infty} \right)^{0,62} = 0,18 \frac{7,2 \cdot 10^{-2}}{8 \cdot 10^{-3}} \times \left(\frac{70 \cdot 8 \cdot 10^{-3}}{135 \cdot 10^{-6}} \right)^{0,62} = 285 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}.$$

Приведенная степень черноты

$$\varepsilon_{пр} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{F_1}{F_2} \left(\frac{1}{\varepsilon_2} - 1 \right)},$$

где ε_1 и F_1 — степень черноты и поверхность защитной трубки термопары; ε_2 и F_2 — степень черноты и внутренняя поверхность камеры сгорания.

Учитывая, что $F_1 \ll F_2$, принимаем $F_1/F_2 = 0$, $\varepsilon_{пр} = \varepsilon_1$, тогда

$$T_\infty = T_{ст1} + \frac{\varepsilon_1 C_0 [(T_{ст1}/100)^4 - (T_{ст2}/100)^4]}{\alpha} = 923 + \frac{0,8 \cdot 5,7 [(923/100)^4 - (603/100)^4]}{285} = 1018 \text{ К}.$$

Абсолютная погрешность при измерении температуры $\Delta T = T_\infty - T_{ст1} = 1018 - 923 = 95$ К.

Относительная погрешность

$$(\Delta T/T) 100 = (95/1018) 100 = 9,3 \, \%.$$

17.17. Исследовать влияние коэффициента температуропроводности на уровень и распределение температур в носовом профиле стреловидного крыла сверхзвукового летательного аппарата кратковременного действия, имеющего форму затупленного клина (рис. 17.2). Аэродинамический

нагрев тел, обтекаемых потоком воздуха, обусловлен эффектами диссипации энергии, повышением температуры в зонах динамического сжатия потока и высокой интенсивностью теплоотдачи, характерной для носовых частей затупленных тел. Информация о тепловом режиме элементов конструкции необходима для прочностных расчетов. Температурное поле в носовом профиле помимо условий обтекания, формы и геометрических размеров тела в условиях неустановившегося полета зависит также от физических свойств материала, из которого изготовлен профиль. В частности, неравномерность распределения температур и, следовательно, величины термических деформаций зависят от коэффициента температуропроводности материала $a = \lambda/(cp)$.

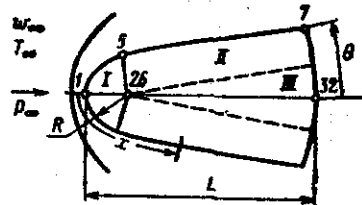


Рис. 17.2

Геометрические размеры носового профиля (рис. 17.2): радиус закругления клина $R = 8$ мм; длина $L = 40$ мм; угол полураствора $\theta = 5^\circ$. Угол между вектором скорости набегающего потока и образующей носовой части крыла γ (угол стреловидности) принять равным 60° . Угол атаки крыла считать равным нулю. Профиль симметричен относительно продольной оси. Время полета 20 с.

Условия теплоотдачи соответствуют режиму полета с изменением скорости w_∞ (м/с) и высоты H (м) в зависимости от времени τ по законам:

$$w_\infty(\tau) = (400 + 80\tau); \quad H(\tau) = (332\tau + 46\tau^2 - \tau^3). \quad (17.1)$$

При расчете теплоотдачи учесть влияние на теплообмен продольного градиента давления, числа M_∞ , изменения температуры вдоль поверхности профиля, изменения физических свойств воздуха с температурой, а также основное влияние диссоциации. Считать, что ρ_∞ , T_∞ и μ_∞ изменяются с высотой в соответствии с таблицами международной стандартной атмосферы [17].

Учесть лучший теплообмен между внешней поверхностью обтекаемого тела и средой. Степень черноты поверхности носового профиля $\epsilon_{ст} = 0,8$. Теплоотдачей задней торцевой поверхности профиля внутрь конструкции (протекающей в условиях естественной конвекции) пренебречь. Температуру профиля в начальный момент времени принять равной 15°C .

Рассчитать поле температур в сечении профиля, параллельном вектору скорости набегающего потока и нормальному к плоскости симметрии профиля. Изменением температуры в направлении размаха крыла пренебречь. Получить численные решения задачи для тел, имеющих постоянное значение коэффициента теплоусвоения $b = \sqrt{\lambda c \rho} = 8,63$, кВт·с^{1/2}/(м²·К) при изменении коэффициента теплопроводности материала в пределах от $0,38 \cdot 10^{-5}$ до 19×10^{-5} м²/с.

При проведении расчетов считать, что поверхность носового профиля защищена от химического воздействия набегающего потока, а применяемые материалы являются достаточно тугоплавкими.

Решение. Для численного решения задачи разностным методом (см. [19], § III.11) рассматриваемая область условно разбивается на три части (рис. 17.2). В первой и третьей частях используется полярная, во второй — прямоугольная система координат. Третья часть представляет со-

бой острый клин, радиус закругления при вершине которого всегда можно выбрать достаточно малым, но отличным от нуля. Так как в уравнение теплопроводности входит величина, обратная радиусу, то при конечно-разностной аппроксимации узел, соответствующий точке, в которой $r = 0$, исключается из рассмотрения. В первой, второй и третьей частях используются разностные сетки 16×6 , 16×11 и 11×6 , соответственно. При этом большее число узлов выбирается вдоль радиуса (части I и III) и вдоль длинной стороны (часть II). Вследствие симметрии сечения тела относительно продольной оси температурное поле вычисляется только в одной из половин сечения. При численном решении (с использованием ЭВМ) двумерное дифференциальное уравнение теплопроводности заменяется конечно-разностным аналогом, имеющим в прямоугольной системе координат вид

$$\frac{T_{i,j}^{k+1/2} - T_{i,j}^k}{\Delta \tau} = \frac{1}{2} a \left[\frac{T_{i+1,j}^{k+1/2} - 2T_{i,j}^{k+1/2} + T_{i-1,j}^{k+1/2}}{(\Delta x)^2} + \frac{T_{i,j+1}^k - 2T_{i,j}^k + T_{i,j-1}^k}{(\Delta y)^2} \right]; \quad (17.2)$$

$$\frac{T_{i,j}^{k+1} - T_{i,j}^{k+1/2}}{\Delta \tau} = \frac{1}{2} a \left[\frac{T_{i+1,j}^{k+1/2} - 2T_{i,j}^{k+1/2} + T_{i-1,j}^{k+1/2}}{(\Delta x)^2} + \frac{T_{i,j+1}^{k+1} - 2T_{i,j}^{k+1} + T_{i,j-1}^{k+1}}{(\Delta y)^2} \right].$$

Эта конечно-разностная схема соответствует методу переменных направлений и благодаря поочередной аппроксимации вторых производных явным и неявным способами приводит к возможности использования эффективного метода разностной факторизации (прогонки) для решения системы двумерных конечно-разностных уравнений. Разностные уравнения для граничных узлов сетки составляются путем использования условий теплового баланса.

При решении задачи теплопроводности были заданы граничные условия третьего рода, которые изменялись вдоль координат поверхности профиля и зависели также от времени.

Для расчета теплообмена при больших скоростях используются следующие известные формулы, полученные для тел с криволинейным контуром методами локального подобия [12]:

при ламинарном режиме течения в пограничном слое

$$Nu_{cr} = 0,332 Re_{cr}^{1/2} Pr_{cr}^{1/3} \left(\frac{\mu^{(0)} \rho^{(0)}}{\mu_{cr} \rho_{cr}} \right)^{1/2} \frac{Pr_{cr}}{Pr^{(0)}} \left[1 + 0,16 \times \right. \\ \left. \times \left(1 + \frac{T_{cr}}{T_{01}} \right) \left(\frac{2m}{m+1} \right)^{1/3} \right]^{1/2}; \quad (17.3)$$

при турбулентном режиме течения в пограничном слое

$$Nu_{cr} = 0,0296 Re_{cr}^{0,8} \cdot Pr_{cr}^{0,43} \left(\frac{i_{cr}}{i_{cr}^*} \right)^{0,4} \left(1 + \frac{k-1}{2} r M_1^2 \right)^{0,11} \quad (17.4)$$

где $Nu_{cr} = \alpha_0 x_{0\phi} / \lambda_{cr}$; $Re_{cr} = w_1 \rho_{cr} x_{0\phi} / \mu_{cr}$;

$Pr_{cr} = \mu_{cr} c_{p,cr} / \lambda_{cr}$; $M_1 = w_1 / \sqrt{k R^* T_1}$;

$$m = \frac{dw_1}{dx} \frac{x}{w_1} = Eu$$

— число Эйлера, учитывающее влияние продольного градиента давления (dp_1/dx); $R^* = 8314/\mu^*$ — газовая постоянная; $k = c_p/c_v$; $T_{01} = T_1 (1 + \frac{k-1}{2} M_1^2)$; $i_{cr}^* = i_1 (1 + \frac{k-1}{2} r M_1^2)$.

Параметры, отмеченные верхним индексом «(0)», относятся к температуре $T^{(0)} = 0,5(T_{cr} + T_1) + 0,22 \frac{k-1}{2} M_1^2$.

Формулы (17.3) и (17.4) позволяют определить местные (локальные) коэффициенты теплоотдачи на поверхности носового профиля.

Эффективная длина

$$x_{0\phi} = \int_0^x \rho_{cr}(x) w_1(x) [R_0(x)]^n dx / (\rho_{cr} w_1 R_0^*)^*. \quad (17.5)$$

Здесь x — криволинейная координата, направленная вдоль контура обтекаемого тела и отсчитываемая от точки начала развития пограничного слоя; $R_0(x)$ — расстояние от точки с координатой x на контуре носового профиля до плоскости симметрии. В знаменателе выражения (17.5) стоит значение подынтегральной функции в точке с координатой x ; $\rho_{cr}(x) = \rho_1(x) / (R^* T_{cr})$; при ламинарном режиме течения в пограничном слое $n = 2$, при турбулентном $n = 5/4$. В окрест-

* Для учета изменения $T_{cr}(x)$ вдоль контура тела существуют более сложные формулы [12].

ности передней критической точки носового профиля $x_{0\phi} = x/2$.

Значения $w_1(x)$, $\rho_1(x)$, $T_1(x)$, $\rho_1(x)$, $M_1(x)$, $i_1(x)$ за ударной волной на внешней границе пограничного слоя вычисляются методами, известными из аэродинамики *.

Считается, что коэффициент восстановления температуры r линейно изменяется от единицы в передней критической точке до значения r в конце носового профиля ($r_{лам} = 0,845$; $r_{турб} = 0,89$). Критическое число Re , соответствующее переходу ламинарного режима течения в турбулентный, принимается равным $w_{\infty} \rho_{\infty} x / \mu_{\infty} = 2 \cdot 10^6$.

Для учета основного влияния диссоциации в пограничном слое вместо температур используются энтальпии и вводятся некоторые эффективные значения локальных коэффициентов теплоотдачи α и температур адиабатной поверхности (температур восстановления T_{cr}^*). При этом в уравнениях теплового баланса для граничных узлов сетки плотность теплового потока (q_{cr}) определяется следующим выражением:

$$q_{cr}(x) = \left(\frac{\alpha_0}{c_p^*} \right) (i_{cr}^* - i_{cr}) = \left(\frac{\alpha_0}{c_p^*} \right) [c_p]_0^{T_{cr}^*} \times \\ \times \left(\frac{i_{cr}^*}{[c_p]_0^{T_{cr}^*}} - T_{cr} \right) = \alpha (T_{cr}^* - T_{cr}), \quad (17.6)$$

где $\alpha = (\alpha_0/c_p^*) [c_p]_0^{T_{cr}^*}$; $T_{cr}^* = i_{cr}^* / [c_p]_0^{T_{cr}^*}$;

$$i_{cr}^* = i_1 \left(1 + \frac{k-1}{2} r M_1^2 \right); i_1 = [c_p]_0^{T_1}; c_p^* = \\ = 1190 \text{ Дж/(кг·К)};$$

α_0 — вычислялось по формулам (17.3), (17.4).

Поскольку при расчете α температура поверхности носового профиля является неизвестной функцией, значения T_{cr} для каждого граничного узла брались с предыдущего слоя по времени.

Граничное условие

$$\alpha (T_{cr}^* - T_{cr}) - \psi T_{cr}^4 = \lambda (\partial T / \partial n)_{cr} \quad (17.7)$$

удобно линеаризировать и представить в форме

$$\alpha_p (T_p - T_{cr}) = -\lambda (\partial T / \partial n)_{cr}. \quad (17.8)$$

* Краснов Н. Ф., Кошевой В. Н., Данилов А. Н. и др. Аэродинамика ракет. М., 1968. С. 772

Параметры α_p и T_p определяют путем решения следующей системы уравнений:

$$\begin{aligned}\alpha(T_{ст}^* - T_{ст}) - \psi T_{ст}^4 &= \alpha_p(T_p - T_{ст}); \\ \alpha(T_{ст}^* - T_p) - \psi T_p^4 &= 0,\end{aligned}\quad (17.9)$$

где T_p — температура поверхности обтекаемого тела, соответствующая тепловому равновесию между конвективным и лучистым потоками теплоты; $\psi = \epsilon_{ст} C_0 \cdot 10^{-8}$; $C_0 = 5,7$ Вт/(м \cdot К 4); λ — теплопроводность материала профиля.

Введение α_p и T_p позволило избежать неустойчивости в граничных узлах сетки, которая могла возникнуть при решении системы разностных уравнений в случае, когда $T_{ст}^*$ было близко к $T_{ст}$.

При проведении расчетов шаг по времени (Δt) принимался равным 0,5 с.

Результаты расчетов, выполненных на ЭВМ, представлены в табл. 17.1.

Таблица 17.1

Bi	Fo	t_1 , °C	t_{32} , °C	Δt , К	t_{τ} , °C	$t_{2\tau}$, °C	q_1 , кВт/м 2
3,56	1,20	1359	130	1229	394	506	2,95
2,22	3,12	1354	226	1128	477	705	2,97
1,28	9,37	1340	501	839	677	874	3,08
0,84	21,9	1334	765	569	880	990	3,12
0,51	59,4	1346	1032	314	1103	1126	3,00

В табл. 17.3 приведены данные для 20-й секунды полета: $Bi = \alpha_1 R / \lambda$; $Fo = at / R^2$; α_1 — коэффициент теплоотдачи в передней критической точке обтекаемого тела; t_i — температура в различных точках сечения носового профиля, i — номер узла разностной сетки (см. рис. 17.2); $\Delta t = |t_1 - t_{32}|$; $q_1 = |q_{1к} - q_{1л}|$, где $q_{1к}$ и $q_{1л}$ — плотность конвективного и лучистого тепловых потоков в передней критической точке.

Расчеты показывают, что в рассматриваемых условиях при $b = \sqrt{\lambda \epsilon_p} = \text{const}$ температура t_1 изменяется мало, так как по мере увеличения Fo (за счет a) определяющий безразмерный комплекс Bi вследствие увеличения λ падает.

Относительно высокий уровень температуры в узлах 1 и 26 является следствием резкого увеличения скорости полета в плотных слоях атмосферы, см. закон изменения $\omega_{\infty}(\tau)$,

$H(\tau)$. Из полученных данных следует, что по мере увеличения коэффициента $a = \lambda / (\epsilon_p)$ (при $\tau = \text{const}$ и $R = \text{const}$ он пропорционален Fo) неравномерность распределения температуры в теле Δt уменьшается.

Так как при $\tau = 20$ с разность температур ($T_{ст1}^* - T_1$) мала по сравнению с $T_{ст1}^*$ ($T_{ст1}^*$ — температура адиабатной поверхности, соответствующая узлу 1), то небольшие изменения T_1 приводят к некоторому изменению q_1 . При $\tau = 20$ с значения α_1 , а также $T_{ст1}^*$ во всех вариантах этой серии расчетов практически одинаковы.

17.18. Используя условия задачи 17.17, исследовать влияние коэффициента теплоусвоения $b = \sqrt{\lambda \epsilon_p}$ на уровень и распределение температур в носовом профиле крыла в конце полета, при условии, что коэффициент температуропроводности $a = \lambda / (\epsilon_p) = 4,58 \cdot 10^{-5}$ м 2 /с = const, а b изменяется от 0,42 до 36,9 кВт \cdot с $^{1/2}$ /(м 2 ·К). Время полета 20 с.

17.19. Используя условия задачи 17.17, исследовать влияние критерия $Fo = at / R^2$ на уровень и распределение температур в носовом профиле стреловидного крыла в конечный момент полета ($\tau = 20$ с) при условии, что $Bi = \alpha_1 R / \lambda = \text{const}$, а Fo изменяется за счет изменения $a = \lambda / (\epsilon_p)$.

Рассчитать на ЭВМ варианты, в которых коэффициенты $a = \lambda / (\epsilon_p)$ и $b = \sqrt{\lambda \epsilon_p}$ принимают значения:

Вариант	1	2	3	4	5
$a \cdot 10^5$, м 2 /с	0,98	1,66	2,00	3,33	9,98
b , кВт \cdot с $^{1/2}$ /(м 2 ·К)	13,4	10,3	9,36	7,25	4,19

17.20. Вычислить распределение температур в носовом профиле крыла (руля) сверхзвукового летательного аппарата в конечный момент полета $\tau = 25$ с для следующих условий обтекания профиля потоком воздуха: $\omega_{\infty}(\tau) = (400 + 80\tau)$, м/с; $H(\tau) = (332\tau + 40\tau^2 - \tau^3)$ м при $(0 \leq \tau \leq 20)$ с; $\omega_{\infty}(\tau) = (2700 - 35\tau)$, м/с; $H(\tau) = (872\tau - 400)$ м при $(20 < \tau \leq 25)$ с.

Геометрические размеры профиля (см. рис. 17.2): $R = 8 \cdot 10^{-3}$ м; $L = 40 \cdot 10^{-3}$; $\theta = 5^\circ$; угол стреловидности крыла $\gamma = 60^\circ$.

Численные решения получить для пяти вариантов, в которых в качестве материала носового профиля выбраны: бериллий, вольфрам, молибден, ниобий и титан. Считать, что носовые профили защищены от химического воздействия набегающего потока специально нанесенной пленкой окислов. Начальная температура в профиле 15° С, степень черноты

поверхности $\epsilon_{ст} = 0,8$. При решении задачи учесть влияние всех факторов, которые перечислены в задаче 17.17. На основе полученных данных сделать практически полезные выводы.

17.21. Исследовать влияние радиуса закругления передней кромки крыла летательного аппарата на уровень и распределение температур в носовом профиле, имеющем форму закругленного клина. Получить численные решения для пяти

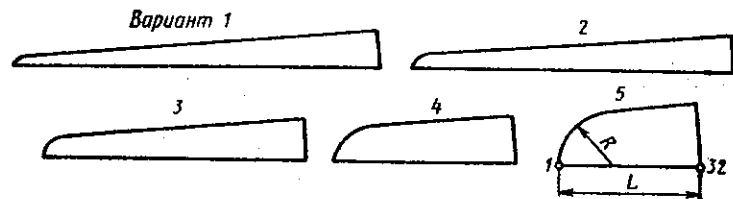


Рис. 17.3

вариантов носовых профилей с равной массой при следующих геометрических размерах: $\theta = 5^\circ$; угол стреловидности $\gamma = 60^\circ$ (рис. 17.3). Радиус закругления и длина профиля:

Вариант	1	2	3	4	5
R , мм	1	2	4	8	12
L , мм	79,7	71,2	57,4	40,0	30,7

Профили изготовлены из стали, имеющей $\lambda = 41,87$ Вт/(м·К) и $c_p = 4271$ кДж/(м³·К). Начальная температура профиля 15°C ; $\epsilon_{ст} = 0,8$.

Летательный аппарат движется в атмосфере Земли. Изменение скорости и высоты полета соответствует следующим данным:

t , с	0	20	40	60	80	100
w_∞ , м/с	400	1000	1600	2200	2800	3400
H , км	0	8	16	24	32	40

С помощью ЭВМ получить данные для 25, 50, 75 и 100-й секунд полета и дать заключение о влиянии формы и размеров профиля.

При выборе шага по времени для пространственной сетки, принятой в задаче 17.17, руководствоваться следующими данными ($\tau = 20$ с; $R = 8$ мм; $L = 40$ мм):

Δt , с	0,05	0,10	0,25	0,50	1	2	5
t_1 , $^\circ\text{C}$	219	219	219,5	220,6	222,3	224,2	225,3

17.22. Исследовать зависимость теплового режима носового профиля руля летательного аппарата от геометрических размеров и получить данные, характеризующие роль лучистого теплообмена в общем процессе переноса теплоты. Для этой цели получить численные решения для пяти подобных профилей, имеющих следующие геометрические размеры и физические свойства материала: $\theta = 5^\circ$; $\gamma = 60^\circ$; $\epsilon_{ст} = 0,8$; $t_{нач} = 15^\circ\text{C}$;

R , мм	2	4	8	16	32
L , мм	10	20	40	80	160
$\alpha \cdot 10^6$, м²/с	0,612	2,45	9,80	39,2	157
$c_p \cdot 10^{-3}$, кДж/(м³·К)	68,3	47,1	4,27	1,07	0,268

Условия полета соответствуют данным, помещенным в задаче 17.21. Расчеты выполнить для $\tau = 50$ с.

17.23. При проектировании летательных аппаратов угол стреловидности крыла γ может быть различным в различных вариантах конструкции. Как повлияет величина угла γ на уровень аэродинамического нагрева носового профиля? Вычислить температуру в передней критической точке крыла при углах стреловидности γ , равных 10, 20, 30, 40, 50, 60 и 70° в момент времени $\tau = 80$ с при $t_{нач} = 15^\circ\text{C}$, $Fo = \alpha\tau/R^2 = 12,24$; $b = \sqrt{\lambda c_p} = 13,4$ кВт·с¹/²/(м²·К); $\epsilon_{ст} = 0,8$. Геометрические размеры носового профиля крыла $R = 8$ мм; $L = 40$ мм; $\theta = 5^\circ$.

При проведении расчетов учесть влияние всех факторов, указанных в тексте задачи 17.17. Условия полета соответствуют следующим данным:

τ , с	0	20	30	40	50	60	70	80					
$w_\infty \cdot 10^{-2}$, м/с.	4	20	16,5	16	17,8	22,3	29	40					
τ , с	0	2	4	6	8	10	20	30	40	50	60	70	80
H , км	0	0,8	2	3,3	5	6,9	16,8	26	33	38,8	43,5	47,2	50

17.24. Получить информацию о том, как изменяются температуры t_i , коэффициенты теплоотдачи α_i , температуры адиабатной поверхности $T_{ст i}$ и плотности суммарных тепловых потоков q_i вдоль контура сечения носового профиля крыла летательного аппарата, имеющего форму закругленного клина (см. рис. 17.2), на 20, 50 и 80-й секундах полета. Условия полета соответствуют данным, приведенным в задаче 17.23. Профили изготовлены из материала, имеющего $\lambda = 47,35$ Вт/(м·К), $c_p = 1576$ кДж/(м³·К); $R = 8$ мм; $L = 40$ мм; $\theta = 5^\circ$; $\gamma = 60^\circ$; $\epsilon_{ст} = 0,8$; $t_{нач} = 15^\circ\text{C}$. Указанные параметры вычислить в граничных узлах $i = 1, 5$ и 7 разностной сетки (см. рис. 17.2).

17.25. Как зависит уровень и распределение температур в носовом профиле руля высокоскоростного летательного аппарата от степени черноты поверхности профиля? Предполагается, что летательный аппарат движется в плотных слоях земной атмосферы по некоторой траектории, соответствующей следующим данным ($w_\infty = 300 + 740 \tau$):

τ , с	0	0,2	0,4	0,6	0,8	1	1,5
H , км	0	0,0851	0,2267	0,4240	0,6780	0,9685	1,950

τ , с	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0
H , км	3,150	4,640	6,112	7,584	9,056	10,53	12,00

Носовой профиль изготовлен из вольфрама и имеет следующие геометрические размеры: $R = 9$ мм, $L = 45$ мм, $\theta = 5^\circ$ (см. рис. 17.2), $\gamma = 60^\circ$. Поверхность профиля защищена от окислительного воздействия набегающего потока тонким слоем покрытия. Выполнить серию расчетов для покрытий со степенью черноты $\epsilon_{ст}$, равной 0; 0,2; 0,4; 0,6; 0,8 и 1,0. Вычислить t_1 ; t_{32} ; $\Delta t = t_1 - t_{32}$; $T_{ст1} - T_1$; q_k ; q_l/q_k . При численном решении уравнения теплопроводности шаг по времени Δt принять равным 0,02 с.

17.26. Для высокоскоростных летательных аппаратов кратковременного действия применение теплозащитных покрытий является эффективным средством снижения температурного уровня в элементах конструкции. Используя численный метод, описанный в задаче 17.17, исследовать влияние толщины теплозащитного покрытия на уровень температур в носовом профиле крыла летательного аппарата. Носовой профиль изготовлен из хромоникелевой нержавеющей стали 12X18H10T. На внешнюю поверхность профиля нанесен слой покрытия толщиной δ . Покрытие имеет следующие физические свойства: $a = \lambda / (c\rho) = 0,2 \cdot 10^{-6}$ м²/с; $b = \sqrt{\lambda c\rho} = 615$ Вт·с^{1/2}/(м²·К); $\epsilon_{ст} = 0,8$. Считать, что в покрытии не происходит фазовых и химических превращений, а также уноса массы. Внешние геометрические размеры профиля (вместе с покрытием): $R = 9$ мм; $L = 45$ мм; $\theta = 5^\circ$ (см. рис. 17.2) и $\gamma = 60^\circ$.

Вычислить температуры в узлах 12, 13 и 15 под слоем покрытия (рис. 17.4) на 20, 40, 60 и 80-й секундах полета при толщине покрытия 1 и 2 мм. Начальная температура профиля 15°С.

17.27. Воздушная прослойка между внешней оболочкой и внутренней частью носового профиля крыла летательного аппарата может существенно снизить уровень аэродинамического нагрева внутренней части и обеспечить ее рабо-

тоспособность в условиях кратковременного полета с высокой скоростью. Выполнить численные расчеты температурных полей в носовом профиле крыла летательного аппарата для условий, когда внешняя оболочка профиля изготовлена из вольфрама толщиной 2,5 мм, а внутренняя часть из стали 12X18H10T. Профиль имеет форму затупленного клина. Условия полета соответствуют данным, приведенным в задаче 17.25. Внешние размеры профиля определяются размерами оболочки и равны: $R = 9$ мм, $L = 45$ мм, $\theta = 5^\circ$ (см. рис. 17.2), угол стреловидности крыла $\gamma = 60^\circ$. Рассчитать

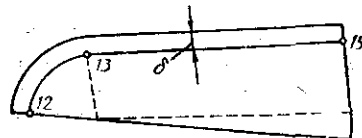


Рис. 17.4

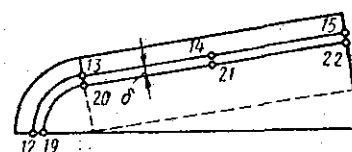


Рис. 17.5

два варианта конструкции с зазором между оболочкой и внутренней частью 0,5 и 1 мм, предполагая, что давление в прослойке равно давлению на данной высоте. Учесть лучистый теплообмен с внешней стороны профиля и в прослойке; $t_{нач} = 15^\circ\text{С}$. При решении задачи использовать метод, описанный в задаче 17.17. Шаг по времени принять равным 0,02 с. Вычислить температуры в узлах 12, 13, 14, 15, 19, 20, 21 и 22 разностной сетки (рис. 17.5) в момент времени $\tau = 5$ с. Условно считать, что химического взаимодействия между потоком и оболочкой не происходит.

17.28. Используя условия предыдущей задачи, вычислить температуры в узлах разностной сетки 12 и 19 (рис. 17.5) при толщинах воздушной прослойки 0,1; 0,25; 0,5; 1,0; 1,5 и 2 мм на 5-й секунде полета.

ГЛАВА 18

ТЕПЛОБМЕН ПРИ ИЗМЕНЕНИИ АГРЕГАТНОГО СОСТОЯНИЯ ВЕЩЕСТВА

§ 18.1. Теплообмен при конденсации пара

18.1. Найти переданное количество теплоты и количество образовавшегося конденсата на одиночной горизонтальной трубе диаметром $d = 16$ мм и длиной $l = 1,5$ м при конден-

сации на ней сухого насыщенного пара, $p_n = 4 \text{ кПа}$. Температура поверхности трубы $T_{ст} = 291 \text{ К}$. Конденсация пленочная, течение пленки конденсата ламинарное.

Решение. Коэффициент теплоотдачи находится по формуле Нуссельта для одиночной горизонтальной трубы

$$\bar{\alpha} = 0,725 \left[\frac{\lambda_{ж}^3 \rho_{ж}^2 r g}{\mu_{ж} (T_n - T_{ст}) \alpha} \right]^{1/4} =$$

$$= \left[\frac{0,6^3 \cdot 1000^2 \cdot 2444 \cdot 10^3 \cdot 9,81}{930 \cdot 10^{-6} (303 - 291) \cdot 16 \cdot 10^{-3}} \right]^{1/4} = 9461 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}.$$

Физические свойства воды взяты из таблиц Приложения при средней температуре пленки конденсата, равной $0,5 \times (T_{ст} + T_n) = 0,5 (291 + 303) = 297 \text{ К}$.

Переданное количество теплоты

$$Q = \bar{\alpha} (T_n - T_{ст}) \pi d l = 9461 (303 - 291) 3,14 \cdot 16 \cdot 10^{-3} \times$$

$$\times 1,5 = 8,556 \text{ кВт}.$$

Количество образующегося конденсата

$$M_{\tau} = Q/r = 8556/2444 = 3,50 \cdot 10^{-3} \text{ кг/с}.$$

18.2. Определить полную поверхность и поперечный размер теплопередающей поверхности вертикального короба, через одну стенку которого передается теплота протекающему в нем воздуху. Теплота через стенку передается от стекающей пленки, образовавшейся на ребре за счет конденсации на ней 30 г/с сухого насыщенного пара при $p_n = 0,1 \text{ МПа}$. Конденсация происходит из неподвижного пара. Течение пленки конденсата по стенке ламинарное. Длина короба по ходу течения пленки конденсата $l = 2 \text{ м}$. Температура стенки ребра короба со стороны стекающей пленки $T_{ст} = 313 \text{ К}$.

18.3. Как повлияет на переданное количество теплоты изменение температурного перепада между поверхностью пластины, на которой происходит конденсация, и конденсирующимся паром $(T_n - T_{ст})$? Пленочная конденсация происходит на вертикальной пластине, течение пленки конденсата ламинарное.

18.4. Определить коэффициенты теплоотдачи α при конденсации неподвижного водяного пара ($p_n = 100 \text{ кПа}$) на вертикальной пластине, имеющей температуру стенки $T_{ст} = 358 \text{ К}$: а) по критериальной зависимости Нуссельта; б) с учетом поправок ϵ_{ϕ} , ϵ_s и ϵ_{ρ} , учитывающих соответственно влияние конвективного переноса теплоты и силы инерции, за-

висимость физических свойств конденсата от температуры и волновой характер течения пленки конденсата.

18.5. Определить местный ($x = 3 \text{ м}$) коэффициент теплоотдачи к вертикальной стенке от стекающей по ней пленки конденсата водяного пара. Количество образующегося конденсата на единице длины стенки $M_{\tau} = 1,2 \text{ кг/с}$. Параметры пара $p_n = 4,24 \text{ кПа}$, $T_n = 303 \text{ К}$. Физические свойства пара считать постоянными и определить их по температуре насыщения.

Решение. Для выбора расчетной формулы определим режим течения пленки конденсата:

$$Re = \frac{qx}{r\mu_{ж}} = \frac{M_{\tau} x}{F\mu_{ж}} = \frac{1,2 \cdot 3}{801 \cdot 10^{-6}} = 4494 > Re_{кр} = 400,$$

следовательно, режим течения пленки турбулентный. Здесь $q = M_{\tau} r/F$, Вт/м^2 ; ширину стенки принимаем равной 1 м , тогда $F = 1 \text{ м}^2$. Физические свойства воды и число P_r берем из таблиц [4] при $T_n = 303 \text{ К} = 30^\circ \text{ С}$.

Для турбулентного режима течения пленки

$$Nu = 0,0325 Ga^{1/3} Re^{1/4} Pr^{1/2} = 0,0325 \left(\frac{gx^3}{\nu_{ж}^2} \right)^{1/3} \times$$

$$\times Re^{1/4} Pr^{1/2} = 0,0325 \left[\frac{9,81 \cdot 3^3}{(0,804 \cdot 10^{-6})^2} \right]^{1/3} (4494)^{1/4} \times$$

$$\times (5,42)^{1/2} = 46010;$$

$$\alpha = Nu \lambda_{ж}/x = 46010 \cdot 0,618/3 = 9478 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}.$$

18.6. Как изменится значение среднего коэффициента теплоотдачи от пленки конденсата, образующейся из неподвижного водяного пара, к плоской стенке, если к движению пленки, стекающей под действием сил тяжести, добавить движение, вызванное скоростью перемещения паровой фазы. Параметры пара: $p_n = 47,36 \text{ кПа}$; $T_n = 353 \text{ К}$. Протяженность стенки $l = 2 \text{ м}$. Режим течения пленки ламинарный. Физические свойства воды: $\lambda = 0,675 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$; $\mu = 355 \cdot 10^{-6} \text{ Па} \cdot \text{с}$; $\nu = 0,415 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$; $r = 2308,2 \text{ кДж/кг}$; $\rho'' = 0,293 \text{ кг/м}^3$, считать постоянными. Скорость пара $\omega_0 = 50 \text{ м/с}$. Количество образующегося конденсата $3 \cdot 10^{-3} \text{ кг/с}$.

Указание. Для решения использовать табл. VIII.2 из учебника [19].

18.7. Определить коэффициент теплоотдачи при конденсации $1,0 \cdot 10^{-3} \text{ кг/с}$ водяного пара на горизонтальной плос-

кой стенке теплообменного устройства при условии быстрого движущегося пара. Так как движение образовавшейся пленки происходит только за счет трения между паром и пленкой, то приближенно можно считать, что процесс протекает в условиях невесомости. Скорость пара $w'' = 70$ м/с, протяженность стенки $l = 1$ м. Пар насыщенный $p_n = 12,34$ кПа.

Решение. Физические свойства пара и жидкости выбираем по таблицам Приложения при температуре насыщения. Для воды: $\lambda_{ж} = 0,648$ Вт/(м·К); $\mu_{ж} = 549 \cdot 10^{-6}$ Па·с; $\rho_{ж} = 988$ кг/м³; $r = 2383$ кДж/кг. Для пара: $\lambda'' = 0,0186$ Вт/(м·К); $\mu'' = 10,1 \cdot 10^{-6}$ Па·с; $\rho'' = 0,0831$ кг/м³.

Плотность теплового потока, поступающего в стенку, $q = G \cdot r / (lb) = 1,0 \cdot 10^{-3} \cdot 2383 / (1 \cdot 1) = 2,383$ кВт/м². Здесь ширина стенки принята равной 1 м.

Коэффициент трения на границе между паром и пленкой

$$c_f = 2q / (r \rho'' w'') = 2 \cdot 2,383 / (2383 \cdot 0,0831 \cdot 70) = 3,438 \cdot 10^{-4}.$$

Средний коэффициент теплоотдачи для условий движения пленки за счет сил трения при $q = \text{const}$ определяется по формуле

$$\bar{\alpha} = 0,648 \left(\frac{c_f w''^2 \rho'' \rho_{ж} r}{\mu_{ж} q l} \right)^{1/2} = 0,648 \left(\frac{3,438 \cdot 10^{-4} \cdot 70^2 \cdot 0,0831 \cdot 988 \cdot 2383}{549 \cdot 10^{-6} \cdot 2,383 \cdot 1} \right)^{1/2} = 10,28 \text{ кВт/м}^2.$$

18.8. В условиях земного притяжения при конденсации насыщенного пара ($p_n = 101$ кПа) на вертикальной пластине с температурой стенки $T_{ст} = 293$ К и $Re = 350$ длина ламинарного участка, отсчитываемая от верхней кромки по направлению стекания конденсата, равна 1,5 м. Определить длину ламинарного участка при том же Re , если гравитация в сравнении с условиями земного притяжения уменьшится: а) в пять и б) в двадцать раз. Физические свойства пара и воды считать постоянными.

18.9. Для получения капельной конденсации в качестве гидрофобной добавки использовалась олеиновая кислота, впрыскиваемая в пар. Определить значение коэффициента теплоотдачи при капельной конденсации насыщенного пара в условиях $p_n = 101$ кПа на медной пластине высотой $h = 1$ м. Температура поверхности пластины $T_{ст} = 358$ К; $T_n = 373$ К.

Сравнить полученное значение коэффициента теплоотдачи с коэффициентом теплоотдачи при пленочной конден-

сации, имеющей место в указанных условиях. Течение пленки во втором случае ламинарное.

Решение. Критериальную зависимость для определения коэффициента теплоотдачи при капельной конденсации пара выбираем в зависимости от значения числа Рейнольдса

$$Re = \frac{\lambda_{ж} (T_n - T_{ст})}{r \mu_{ж}} = \frac{0,683 (373 - 358)}{2257 \cdot 10^3 \cdot 282 \cdot 10^{-6}} = 1,61 \cdot 10^{-2}.$$

При $3,3 \cdot 10^{-3} < Re < 1,8 \cdot 10^{-2}$

$$Nu = 5 \cdot 10^{-6} Re^{-1,57} \Pi_k^{1,16} Pr^{1/3}.$$

Физические свойства воды берутся из таблиц Приложения при $T_n = 373$ К: $\lambda_{ж} = 0,683$ Вт/(м·К); $\mu_{ж} = 282 \times 10^{-6}$ Па·с; $\rho_{ж} = 958$ кг/м³; $r = 2257 \cdot 10^3$ Дж/кг; $\sigma = 0,0589$ Н/м; $Pr = 1,75$.

Температурный коэффициент поверхностного натяжения:

$$\xi = \frac{1 \Delta \sigma}{\sigma \Delta T} = \frac{1 \cdot 0,00382}{0,0589 \cdot 20} = 3,24 \cdot 10^{-3} \text{ 1/К};$$

$$\Pi_k = \frac{2 \xi \sigma^2 T_n}{r \mu_{ж}^2} = \frac{2 \cdot 3,24 \cdot 10^{-3} (0,0589)^2 \cdot 373}{2257 \cdot 10^3 (282 \cdot 10^{-6})^2} = 46,72 \cdot 10^{-3};$$

$$Nu = 5 \cdot 10^{-6} Re^{-1,57} \Pi_k^{1,16} Pr^{1/3} = 5 \cdot 10^{-6} \times$$

$$\times (1,61 \cdot 10^{-2})^{-1,57} (46,72 \cdot 10^{-3})^{1,16} (1,75)^{1/3} = 113,2 \cdot 10^{-6}.$$

Коэффициент теплоотдачи при капельной конденсации

$$\bar{\alpha}_k = \frac{Nu \lambda_{ж} r \rho_{ж} (T_n - T_{ст})}{2 \sigma T_n} = \frac{113,2 \cdot 10^{-6} \cdot 0,683 \cdot 2257 \cdot 10^3 \cdot 958 (373 - 358)}{2 \cdot 0,0589 \cdot 373} =$$

$$= 57070 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}.$$

Коэффициент теплоотдачи при пленочной конденсации

$$\bar{\alpha}_n = 4/3 \left[\frac{r \rho_{ж}^2 g \lambda_{ж}^3}{4 \mu_{ж} (T_n - T_{ст}) h} \right]^{1/4} = \frac{4}{3} \times \left[\frac{2257 \cdot 10^3 (958)^2 \cdot 9,81 (0,683)^3}{4 \cdot 282 \cdot 10^{-6} (373 - 358) \cdot 1} \right]^{1/4} = 5897 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)};$$

$$\bar{\alpha}_k / \bar{\alpha}_n = 57070 / 5897 = 9,86.$$

18.10. Какую скорость пара необходимо поддерживать при конденсации насыщенного водяного пара на горизонтальной пластине при движении образовавшейся пленки только за счет трения между паром и пленкой конденсата,

чтобы суметь через поверхность $F = hb = 1,0 \cdot 0,2 = 0,2 \text{ м}^2$ передать количество теплоты, равное 12 кВт. Параметры пара $p_n = 300 \text{ кПа}$, $T_n = 406,5 \text{ К}$, $\Delta T = 10 \text{ К}$.

18.11. При больших скоростях пара определяющим фактором при теплообмене с конденсацией является скорость движения пара, а не скорость стекания пленки под действием силы веса. Определить коэффициент теплоотдачи, если скорость насыщенного пара с $p_n = 100 \text{ кПа}$ равна 100 м/с. Конденсация происходит на вертикальной стенке высотой 2 м при ламинарном режиме течения пленки.

18.12. При конденсации пара на нижней поверхности горизонтальной плиты удаление конденсата с поверхности происходит в виде отрыва капель от стенки либо от пленки. Определить средний коэффициент теплоотдачи при конденсации водяного пара на такой плите при $p_n = 101 \text{ кПа}$ и $T_n = 373 \text{ К}$. Температуру стенки принять равной $T_{ст} = 343 \text{ К}$. Коэффициент поверхностного натяжения для воды принять равным 0,0589 Н/м. Плотностью пара при расчете пренебречь.

18.13. Определить, во сколько раз уменьшится коэффициент теплоотдачи на вертикальной пластине при конденсации водяного пара с примесью в нем воздуха по сравнению со случаем конденсации чистого насыщенного пара. Определить, как влияет на коэффициент теплоотдачи величина массовой концентрации воздуха при $m_\infty = 0,01 \text{ кг/м}^3$ и $m_\infty = 0,1 \text{ кг/м}^3$. Давление смеси паров с воздухом 101 кПа. Скорость движущейся смеси $w_\infty = 3 \text{ м/с}$. Температура поверхности стенки конденсатора $T_{ст} = 363 \text{ К}$. Расчет провести для двух значений продольной координаты: $x = 0,061 \text{ м}$; $x = 0,122 \text{ м}$.

Решение. Определяющие соотношения для коэффициентов теплоотдачи при конденсации чистого пара α_n и конденсации из паровоздушной смеси $\alpha_{пвс}$ имеют вид

$$\alpha_n = q_n / (t_\infty - t_{ст}); \quad \alpha_{пвс} = q_{пвс} / (t_\infty - t_{ст}),$$

следовательно,

$$\alpha_n / \alpha_{пвс} = q_n / q_{пвс}.$$

Физические свойства воды берутся из таблиц Приложения при $T_{ст} = 363 \text{ К} = 90^\circ \text{ С}$: $\lambda_{ж} = 0,680 \text{ Вт/(м·К)}$; $\mu_{ж} = 315 \cdot 10^{-6} \text{ Па·с}$; $\rho_{ж} = 965 \text{ кг/м}^3$; $r = 2282 \text{ кДж/кг}$. Динамическая вязкость паровоздушной смеси берется по экспериментальным данным — $\mu_{пвс} = 12,18 \cdot 10^{-6} \text{ Па·с}$.

Газовая постоянная смеси

$$R_{пвс} = R_n (1 - m_\infty) + R_a m_\infty = \frac{8314}{18} (1 - 0,01) + \frac{8314}{29} 0,01 = 460 \text{ Дж/(кг·К)};$$

$$\rho_{пвс} = p / (R_{пвс} T_\infty) = 101 \cdot 10^3 / (460 \cdot 373) = 0,589 \text{ кг/м}^3.$$

Число Шмидта

$$Sc = \mu_{пвс} / (\rho_{пвс} D) = 12,18 \cdot 10^{-6} / (0,589 \cdot 0,376 \cdot 10^{-4}) = 0,55.$$

Здесь D — коэффициент диффузии.

Плотность теплового потока q_n при конденсации чистого пара в случае ламинарного течения пленки конденсата пропорциональна $(t_\infty - t_{ст})^{3/4}$. При наличии в паре примеси воздуха $q_{пвс}$ пропорциональна $(t_\infty - t_{ст})^{3/4}$, где t_∞ — температура поверхности пленки.

Для определения t_∞ необходимо вычислить коэффициенты K , D и C ;

$$K = \frac{1,43 Sc^3 (1 + Sc^{-1})}{\rho_{пвс} w_\infty \mu_{пвс}} \left(\frac{\lambda_{ж}^2 \rho_{ж}^2 g}{4 \mu_{ж} r^3} \right)^{1/2} x^{1/2} =$$

$$= \frac{1,43 \cdot 0,55^3 (1 + 0,55^{-1})}{0,589 \cdot 3 \cdot 12,18 \cdot 10^{-6}} \times \left[\frac{0,68^2 \cdot 965^2 \cdot 9,81}{4 \cdot 315 \cdot 10^{-6} (2282 \cdot 10^3)^3} \right]^{1/2} 0,122^{1/2} = 0,2740;$$

$$D = \frac{1,427 (t_\infty - t_{ст})^{3/4} t_\infty^{3/4} K + 2,52/m_\infty}{2 (0,295 t_\infty^{3/2} K + 1,71/m_\infty)} = \frac{1,427 (100 - 90)^{3/4} 100^{3/4} \cdot 0,274 + 2,52/0,01}{2 (0,295 \cdot 100^{3/2} \cdot 0,274 + 1,71/0,01)} = 0,6394;$$

$$C = \frac{1,097 (t_\infty - t_{ст})^{3/2} K + 1,55}{0,295 t_\infty^{3/2} K + 1,71/m_\infty} = \frac{1,097 (100 - 90)^{3/2} 0,274 + 1,55}{0,295 \cdot 100^{3/2} \cdot 0,274 + 1,71/0,01} = 0,044;$$

Температура t_∞ определяется по формуле

$$t_\infty = t_\infty [1 - (D - \sqrt{D^2 - C})^{4/3}] = 100 [1 - (0,6394 - \sqrt{(0,6394)^2 - 0,044})^{4/3}] = 98,84^\circ \text{ С}.$$

Следовательно,

$$\frac{\alpha_n}{\alpha_{пвс}} = \frac{q_n}{q_{пвс}} = \left(\frac{t_{\infty} - t_{ст}}{t_{\delta} - t_{ст}} \right)^{3/4} = \left(\frac{100 - 90}{98,84 - 90} \right)^{3/4} = 1,10.$$

Для $m_{\infty} = 0,1$ и $x = 0,061$ м расчеты выполняются аналогично.

Результаты расчетов отношения $\alpha_n/\alpha_{пвс}$:

x	m_{∞}	
	0,01	0,10
0,061	1,07	2,13
0,122	1,10	2,44

18.14. Какую температуру необходимо поддерживать на поверхности вертикальной пластины, чтобы при числе Рейнольдса пленки $Re_{\delta} = 350$ длина ламинарного участка пленки была не менее 3 м. Параметры пара: $p_n = 50$ кПа; $T_n = 354$ К.

§ 18.2. Теплообмен при кипении жидкости

18.15. Определить коэффициент теплоотдачи, температурный напор и температуру поверхности нагрева при пузырьковом кипении в большом объеме, если плотность теплового потока на поверхности нагрева $q = 3 \cdot 10^5$ Вт/м² и вода находится под давлением $p = 0,361$ МПа.

Решение. Используя таблицы Приложения, найдем физические свойства воды и водяного пара на линии насыщения при $p_n = 0,361$ МПа: $t_n = 140^\circ \text{C}$; $v' = 1,080 \times 10^{-3}$ м³/кг; $\lambda = 0,685$ Вт/(м·К); $Pr = 1,26$; $\mu = 2,009 \times 10^{-4}$ Па·с; $\rho'' = 1,966$ кг/м³; $r = 2,145$ МДж/кг, тогда:

$$\begin{aligned} \rho' &= 1/v' = 1/1,080 \cdot 10^{-3} = 926 \text{ кг/м}^3; & v &= \mu/\rho' = \\ &= 2,009 \cdot 10^{-4}/926 = 2,170 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}; & a &= v/Pr = \\ &= 2,170 \cdot 10^{-7}/1,26 = 1,722 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}; & \sigma &= 0,00714 \times \\ &\times [(p' - p'')/1000]^4 \cdot g = 0,00714 [(926 - 1,966)/1000]^4 \cdot 9,81, & &= \\ &= 0,51 \text{ Н/м}. \end{aligned}$$

Коэффициент теплоотдачи при пузырьковом кипении жидкости в большом объеме определяем по формуле С.С. Кутателадзе [19]:

$$\begin{aligned} \alpha &= 7 \cdot 10^{-4} \lambda / \{ \sigma^{0,5} [g(\rho' - \rho'')]^{0,2} \} [p_n g / (r \rho'' a)]^{0,7} \times \\ &\times Pr^{-0,35} = 7 \cdot 10^{-4} \cdot 0,685 / \{ 0,052^{0,5} [9,81 (926 - \\ &- 1,966)]^{0,2} \} [0,361 \cdot 10^6 \cdot 3 \cdot 10^5 / (2,145 \cdot 10^6 \cdot 1,966 \cdot 1,722 \times \\ &\times 10^{-7})]^{0,7} 1,26^{-0,35} = 2,08 \cdot 10^4 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}. \end{aligned}$$

Температурный напор

$$\Delta t = q/\alpha = 3 \cdot 10^5 / (2,08 \cdot 10^4) = 14,4^\circ \text{C}.$$

Температура стенки

$$t_{ст} = t_n + \Delta t = 140 + 14,4 = 154,4^\circ \text{C}.$$

18.16. Для исследования влияния давления на процесс теплообмена при кипении определить α , Δt и $t_{ст}$ для давлений 1,255; 2,798 и 5,505 МПа, используя условия предыдущей задачи. Для сравнения полученных результатов построить зависимости $\alpha = f(p)$ и $\Delta t = f(p)$, включив в них данные, полученные при решении задачи 18.15.

18.17. Определить плотность первого критического теплового потока от неограниченной, обращенной вверх горизонтальной пластины к воде, кипящей под давлением 0,199 МПа.

Решение. Плотность первого критического теплового потока при кипении жидкости в большом объеме может быть подсчитана по формуле С.С. Кутателадзе [19]:

$$q_{кр1} = K_1 r (\rho'')^{0,5} [\sigma g (\rho' - \rho'')]^{0,25}.$$

Значение критерия K_1 согласно опытным данным лежит в пределах 0,13...0,16. Принимаем $K_1 = 0,14$. Для $p_n = 0,199$ МПа из таблиц Приложения находим: $v' = 1,060 \times 10^{-3}$ м³/кг; $\rho'' = 1,121$ кг/м³; $r = 2,203$ МДж/кг, тогда:

$$\begin{aligned} \rho' &= 1/v' = 1/(1,060 \cdot 10^{-3}) = 943,13 \text{ кг/м}^3; \\ \sigma &= 0,00714 g [(\rho' - \rho'')/1000]^4 = 0,00714 \cdot 9,81 \times \\ &\times [(943,13 - 1,121)/1000]^4 = 0,055 \text{ Н/м}. \end{aligned}$$

Плотность первого критического теплового потока

$$\begin{aligned} q_{кр1} &= K_1 r (\rho'')^{0,5} [\sigma g (\rho' - \rho'')]^{0,25} = 0,14 \cdot 2,203 \cdot 10^6 \times \\ &\times 1,121^{0,5} \cdot [0,055 \cdot 9,81 (943,13 - 1,121)]^{0,25} = \\ &= 1,552 \text{ МВт/м}^2. \end{aligned}$$

18.18. Определить плотность первого критического теплового потока при кипении воды в большом объеме при $p = 2,798; 5,505; 11,29; 18, 674$ МПа и построить кривую $q_{кр1} = f(p)$, учитывая значение $q_{кр1}$, полученное в задаче 18.17.

18.19. Кипящая вода при давлении 4 МПа движется в трубе внутренним диаметром 16 мм со скоростью 5 м/с. Определить коэффициент теплоотдачи от кипящей воды к стенке трубы и температуру стенки, если плотность теплового потока, подводимого к жидкости, равна 500 кВт/м^2 .

Решение. Свойства воды находим из таблиц Приложения при $t_n = 250, 33^\circ\text{C}$; $r = 1712 \cdot 10^3 \text{ Дж/кг}$; $Pr_{ж} = 0,86$; $\lambda_{ж} = 0,617 \text{ Вт/(м}\cdot\text{K)}$; $\nu_{ж} = 1,37 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$; $\rho_n = 20 \text{ кг/м}^3$; $\rho_{ж} = 798,7 \text{ кг/м}^3$; $\sigma = 27,14 \cdot 10^{-3} \text{ Н/м}$.

Коэффициент теплоотдачи при вынужденном течении жидкости в трубе:

$Re_{ж} = wd/\nu_{ж} = 5 \cdot 16 \cdot 10^3 / (1,37 \cdot 10^{-7}) = 584 \cdot 10^3 > 10^4$,
течение турбулентное, следовательно,

$$\alpha_n = 0,021 \frac{\lambda_{ж}}{d} Re_{ж}^{0,8} Pr_{ж}^{0,4} = 0,021 \frac{0,617 \cdot 10^3}{16} \times \\ \times (584 \cdot 10^3)^{0,8} \cdot 0,86^{0,4} = 31\,242 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{K)}.$$

Коэффициент теплоотдачи при кипении в большом объеме:

$$Re_* = q l_* / (r \rho_n \nu_{ж}) = 5 \cdot 10^5 \cdot 0,0451 \cdot 10^2 / (10^6 \cdot 1712 \cdot 10^3 \times \\ \times 1,37 \cdot 10^{-7}) = 0,005,$$

$$\text{где } l_* = c_p \rho_{ж} \sigma T_n / (\rho_n r)^2 = 0,0451 \cdot 10^{-6} \text{ м}; \\ \text{при } Re_* \leq 10^{-3}$$

$$Nu_* = 0,0625 Re_*^{0,5} Pr_{ж}^{0,33} = 0,0625 \cdot 0,005^{0,5} \cdot 0,86^{0,33} = \\ = 0,004;$$

$$\alpha_{кип} = Nu_* \frac{\lambda_{ж}}{l_*} = 0,004 \frac{0,617}{0,0451} 10^6 = 54\,723 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{K)}.$$

$$\text{При } \alpha_n / \alpha_{кип} = 31\,242 / 54\,723 = 0,57 > 0,5$$

$$\alpha = \alpha_n [1 + (\alpha_{кип} / \alpha_n)^{0,5}]^{0,5} = 31\,242 [1 + \\ + (54\,723 / 31\,242)^{0,5}]^{0,5} = 63\,013 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{K)}.$$

Находим температурный напор и температуру стенки:

$$\Delta t = q / \alpha = 500 \cdot 10^3 / 63\,013 = 7,93^\circ\text{C}; \quad t_{ст} = t_n + \Delta t = \\ = 250,33 + 7,93 = 258,3^\circ\text{C}.$$

18.20. Жидкий водород кипит в большом объеме при давлении $p = 0,1$ МПа. Плотность теплового потока, отводимого от поверхности нагрева, $q = 60 \text{ кВт/м}^2$. Какой характер должен иметь в этих условиях процесс кипения?

Решение. Для заданных условий необходимо определить величину $q_{кр1}$ по формуле (VIII.175) [19].

Параметры состояния водорода при $p = 0,1$ МПа: $r = 452 \cdot 10^3 \text{ Дж/кг}$; $\sigma = 2,1 \cdot 10^{-3} \text{ Н/м}$; $\rho_{ж} = 70,75 \text{ кг/м}^3$; $\rho_n = 1,19 \text{ кг/м}^3$.

$$q_{кр1} = \frac{\pi}{24} r \sqrt{\rho_n} [\sigma g (\rho_{ж} - \rho_n)]^{0,25} = \frac{\pi}{24} 452 \cdot 10^3 \sqrt{1,19} \times \\ \times [2,1 \cdot 10^{-3} \cdot 9,8 (70,75 - 1,19)]^{0,25} = 69,7 \text{ кВт/м}^2.$$

Таким образом, $q_{кр1} > q$, следовательно, имеет место пузырьковый режим кипения.

18.21. Решить предыдущую задачу, если плотность отводимого теплового потока равна 180 кВт/м^2 , а кипящей жидкостью является азот или кислород.

18.22. На наружной поверхности горизонтальной трубы из нержавеющей стали кипит жидкий натрий при давлении $0,22$ МПа. Плотность теплового потока равна 120 кВт/м^2 . Определить коэффициент теплоотдачи и температуру наружной поверхности трубы.

18.23. Решить предыдущую задачу для случая кипения калия при давлении $0,274$ МПа, используя формулу (VIII.205) [19].

ГЛАВА 19

ТЕПЛООБМЕН ИЗЛУЧЕНИЕМ

§ 19.1. Радиационный теплообмен между твердыми телами, разделенными диатермичной средой

19.1. Определить лучистый тепловой поток между двумя круглыми пластинами, центры которых находятся на общей нормали, если меньшая пластина имеет диаметр $d_1 = 0,25$ м, степень черноты $0,15$ и температуру $t_1 = 727^\circ\text{C}$, а большая — диаметр $d_2 = 0,5$ м, степень черноты $0,65$ и температуру $t_2 = 227^\circ\text{C}$. Расстояние между пластинами $h = 2$ м.

Решение. Приведенная степень черноты системы тел

$$\varepsilon_{др} = \varepsilon_1 \varepsilon_2 = 0,15 \cdot 0,65 = 0,0975.$$

Поверхность излучателя (меньший диск)

$$F_1 = \pi d^2/4 = 0,785 \cdot 0,25^2 = 0,049 \text{ м}^2$$

Угловой коэффициент определяется из соотношения

$$\begin{aligned} \varphi_{12} &= \left[\sqrt{\frac{1}{4} \left(\frac{d_2}{d_1} + 1 \right)^2 + \left(\frac{h}{d_1} \right)^2} - \right. \\ &\quad \left. - \sqrt{\frac{1}{4} \left(\frac{d_2}{d_1} - 1 \right)^2 + \left(\frac{h}{d_1} \right)^2} \right] = \\ &= \left[\sqrt{\frac{1}{4} \left(\frac{0,5}{0,25} + 1 \right)^2 + \left(\frac{2}{0,25} \right)^2} - \right. \\ &\quad \left. - \sqrt{\frac{1}{4} \left(\frac{0,5}{0,25} - 1 \right)^2 + \left(\frac{2}{0,25} \right)^2} \right] = 0,0697. \end{aligned}$$

Лучистый тепловой поток между пластинами

$$Q = \epsilon_{\text{пр}} C_0 [(T_1/100)^4 - (T_2/100)^4] \varphi_{12} F_1 = 0,0975 \cdot 5,67 \times \\ \times [(1000/100)^4 - (500/100)^4] 0,0697 \cdot 0,049 = 17,72 \text{ Вт.}$$

19.2. Вычислить средние угловые коэффициенты $\varphi_{1,2}$ и $\varphi_{2,1}$ для системы тел, состоящей из неограниченной плоской стенки и расположенных вдоль нее длинных труб диаметром $d = 100 \text{ мм}$ с шагом $s = 120 \text{ мм}$.

19.3. Определить средние угловые коэффициенты для условий задачи 19.2, если расстояние между осями труб $s = 360 \text{ мм}$. Построить зависимости $\varphi_{1,2} = f(s)$ и $\varphi_{2,1} = f(s)$.

19.4. Используя условия задачи 19.2, вычислить взаимные поверхности лучистого теплообмена системы тел для расстояний между осями труб $s = 120, 240$ и 360 мм .

19.5. Жидкость при температуре 370 К налита в сосуд Дюара. Стенки сосуда, отражение между которыми можно считать зеркальным, покрыты алюминием ($\epsilon = 0,04$). Температура внутренней стенки равна температуре жидкости, наружной — 290 К . Найти толщину изоляционного слоя, которым можно было бы заменить излучающие стенки, чтобы теплоизоляционные свойства сосуда остались без изменений для трех случаев: а) изоляционный материал — войлок [$\lambda_1 = 0,0377 \text{ Вт/(м·К)}$]; б) изоляционный материал — пробка прессованная [$\lambda_2 = 0,066 \text{ Вт/(м·К)}$]; в) изоляционный материал — асбестовая ткань [$\lambda_3 = 0,126 \text{ Вт/(м·К)}$].

19.6. Температура горизонтального неизолированного нихромового провода диаметром 1 мм не должна превышать

500°С . Найти максимально допустимую силу тока, если температура окружающего воздуха 27°С , $\rho = 1,2 \text{ Ом·мм}^2/\text{м}$ и $\epsilon = 0,5$.

Решение. Лучистый тепловой поток от провода в окружающую среду

$$Q_{\text{л}} = \epsilon C_0 (T/100)^4 \pi d L = 0,95 \cdot 5,67 (773/100)^4 \pi 10^{-3} \cdot 1,0 = 60,39 \text{ Вт.}$$

Тепловой поток, переносимый путем свободной конвекции,

$$Q_{\text{к}} = \alpha (t_{\text{ст}} - t_{\text{ж}}) \pi d L, \quad (19.1)$$

где коэффициент теплоотдачи α определяется по следующей критериальной формуле:

$$Nu = CRa^n. \quad (19.2)$$

Физические свойства воздуха при температуре $0,5 (t_{\text{ст}} + t_{\text{ж}}) = 0,5 (500 + 27) = 264^\circ \text{С}$; $\lambda = 41,4 \cdot 10^{-3} \text{ Вт/(м·К)}$; $\nu = 42,8 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$; $\alpha = 63,1 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$; $\beta = 18,6 \cdot 10^{-4} \text{ 1/К}$. Число Рэлея

$$Ra = g d^3 \beta (t_{\text{ст}} - t_{\text{ж}}) / (\nu \alpha) = 19,81 (10^{-3})^3 18,6 \cdot 10^{-4} \times \\ \times (500 - 27) / (42,8 \cdot 10^{-6} \cdot 63,1 \cdot 10^{-6}) = 3,19.$$

При $10^{-3} < Ra < 5 \cdot 10^2$ $C = 1,18$, $n = 0,125$. В соответствии с формулой (19.2) и законом теплоотдачи (19.1):

$$\alpha = 1,18 (\lambda/d) Ra^{0,125} = 1,18 (41,4 \cdot 10^{-3} / 10^{-3}) 3,19^{0,125} = 56,5 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)};$$

$$Q_{\text{к}} = \alpha (t_{\text{ст}} - t_{\text{ж}}) \pi d L = 56,5 (500 - 27) \pi 10^{-3} \cdot 1,0 = 83,9 \text{ Вт.}$$

Электрическое сопротивление проводника длиной 1 м

$$R = \frac{\rho L}{\pi d^2/4} = \frac{1,2 \cdot 10^{-6} \cdot 1,0}{\pi (10^{-3})^2/4} = 1,53 \text{ Ом};$$

$$Q_{\text{выд}}^{\text{max}} = I_{\text{max}}^2 R = 1,53 I_{\text{max}}^2 \leq Q_{\text{отв}};$$

$$Q_{\text{отв}} = Q_{\text{л}} + Q_{\text{к}} = 60,4 + 83,9 = 144,3 \text{ Вт.}$$

Следовательно,

$$I_{\text{max}} = \sqrt{Q_{\text{отв}}/1,53} = \sqrt{144,3/1,53} = 9,71 \text{ А.}$$

Если провод охлаждается только за счет излучения, то $I_{\max} = 6,28 \text{ А}$; если только за счет конвекции, то $I_{\max} = 7,41 \text{ А}$.

§ 19.2. Радиационный теплообмен в излучающих и поглощающих средах

19.7. После прохождения излучения абсолютно черного тела, имеющего температуру 3000 К, через слой углекислого газа толщиной 2 см, находящегося под давлением 0,1 МПа, интенсивность излучения на длине волны 4,2 мкм составляет $1,34 \cdot 10^{10} \text{ Вт/м}^2$. Определить эффективный коэффициент ослабления на данной длине волны. Собственным излучением газа пренебречь.

Решение. Интенсивность падающего излучения на длине волны 4,2 мкм определяется по закону Планка:

$$J_{\text{пад}} = J_{0\lambda} = C_1 \lambda^{-5} \{ \exp [C_2/(\lambda T)] - 1 \}^{-1} = 3,742 \cdot 10^{-16} \times \\ \times (4,2 \cdot 10^{-6})^{-5} \{ \exp [0,01439/(4,2 \cdot 10^{-6} \cdot 3000)] - 1 \}^{-1} = \\ = 13,35 \cdot 10^{10} \text{ Вт/м}^2.$$

По закону Бугера отношение интенсивностей падающего и пропущенного излучений выражается как $J_{\text{проп}}/J_{\text{пад}} = \exp (K_{\lambda} l)$. Отсюда

$$K_{\lambda} = - \ln (J_{\lambda \text{ проп}}/J_{\lambda \text{ пад}})/l = - \ln [1,34 \cdot 10^{10}/(13,35 \times \\ \times 10^{10})]/0,02 = 115 \text{ м}^{-1}.$$

19.8. Какова интенсивность излучения, испускаемого абсолютно черным телом при температуре 1600 К на длине волны 4,2 мкм после прохождения слоя углекислого газа толщиной 10 см при давлении 0,01 МПа? Использовать результат решения задачи 19.7.

19.9. Излучение абсолютно черного тела с температурой 2000 К при длине волны 1,5 мкм проходит через слой низкотемпературной воздушной плазмы, имеющей температуру 12 000 К и давление 0,1 МПа. Определить интенсивность выходящего пучка излучения: а) без учета собственного излучения плазмы; б) суммарную интенсивность с учетом собственного излучения. Толщина слоя плазмы 10 см, коэффициент поглощения при указанных условиях принять равным 40 1/м.

Решение. Интенсивность падающего излучения на волне длиной 1,5 мкм по закону Планка равна

$$J_{\text{пад}} = J_{0\lambda} = C_1 \lambda^{-5} \{ \exp [C_2/(\lambda T)] - 1 \}^{-1} = 3,742 \cdot 10^{-16} \times \\ \times (1,5 \cdot 10^{-6})^{-5} \{ \exp [0,01439/(1,5 \cdot 10^{-6} \cdot 2000)] - 1 \}^{-1} = \\ = 4,09 \cdot 10^{11} \text{ Вт/м}^2.$$

Интенсивность прошедшего пучка по закону Бугера (без учета собственного излучения)

$$J_{\lambda \text{ проп}} = J_{\lambda \text{ пад}} \exp (-K_{\lambda} l) = 4,09 \cdot 10^{11} \exp (-40 \cdot 0,045) = \\ = 6,76 \cdot 10^{11} \text{ Вт/м}^2.$$

Интенсивность выходящего пучка с учетом собственного излучения ([19], формула (IX. 52))

$$J_{\lambda \text{ вых}} = J_{\lambda \text{ пад}} \exp (-K_{\lambda} l) + J_{0\lambda} [1 - \exp (-K_{\lambda} l)] = \\ = 4,09 \cdot 10^{11} \exp (-40 \cdot 0,045) + 4,04 \cdot 10^{13} [1 - \exp (-40 \times \\ \times 0,045)] = 3,43 \cdot 10^{13} \text{ Вт/м}^2.$$

$$\text{Здесь } J_{0\lambda} = C_1 \lambda^{-5} \{ \exp [C_2/(\lambda T)] - 1 \}^{-1} = 3,742 \cdot 10^{-16} \times \\ \times (1,5 \cdot 10^{-6})^{-5} \{ \exp [0,01439/(1,5 \cdot 10^{-6} \cdot 12\,000)] - 1 \}^{-1} = \\ = 4,04 \cdot 10^{13} \text{ Вт/м}^2$$

— излучение абсолютно черного тела на волне длиной 1,5 мкм при температуре плазмы.

19.10. Найти длину пути, на котором поглощается 90% ультрафиолетового излучения с длиной волны 0,15 мкм, падающего на слой воздушной плазмы, имеющей температуру 12 000 К при давлении 0,1 МПа. Коэффициент ослабления составляет 7,5 1/м.

19.11. Водяной пар, имеющий температуру 450 К и давление 0,3 МПа, заполняет сосуд в форме параллелепипеда с размерами 200 × 300 × 400 мм, температура стенок которого составляет 1100 К. Определить степень черноты собственного излучения пара и его поглотительную способность для падающего излучения. Поправку на уширение полос (влияние давления) не учитывать.

Решение. Необходимые для решения промежуточные значения: эффективная длина луча $l_{\text{эф}} = 3,6 \sqrt{V/F} = 0,166 \text{ м}$, произведение давления на длину луча $p n_{\text{H}_2\text{O}} l_{\text{эф}} = 0,3 \cdot 10^6 \cdot 0,166 = 0,43 \cdot 10^5 \text{ м} \cdot \text{Па}$.

Степень черноты собственного излучения определяется по графику (рис. 19.1) для температуры газа 450 К: $\epsilon_{\text{H}_2\text{O}} = 0,34$.

Поглощательная способность определяется по тому же графику для температуры падающего излучения 1100 К: $A_{H_2O} = 0,25$.

19.12. Цилиндрическая камера диаметром 0,3 м и длиной 0,5 м заполнена углекислым газом при давлении 0,05 МПа и температуре 800 К. Определить степень черноты газа,

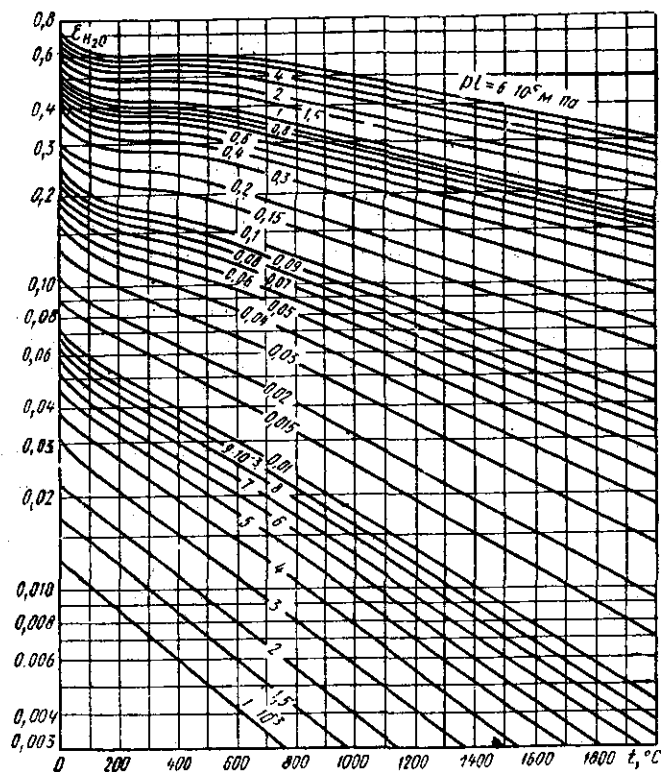


Рис 19.1

19.13. Продукты сгорания органического топлива заполняют камеру нагревательной печи, имеющую размеры $2 \times 3, 5 \times 5$ м. Определить поток собственного излучения газов на стенки печи, если в составе газов 16 % CO_2 и 9 % H_2O (по объему), полное давление газов 0,102 МПа, температура 1500 К.

Решение. Собственное излучение газа выражается формулой (IX.62), [19]:

$$E_r = \epsilon_r \sigma_0 T_r^4,$$

где степень черноты газа ([19], формула (IX.63))

$$\epsilon_r = \epsilon_{CO_2} + \beta \epsilon_{H_2O} - \Delta \epsilon.$$

Эффективная длина луча $l_{эф} = 3,6V/F = 3,6 \cdot 2 \cdot 3,5 \cdot 5 / [2(2+3,5) \cdot 5 + 2 \cdot 2 \cdot 3,5] = 1,82$ м.

Парциальное давление CO_2

$$p_{CO_2} = pr_{CO_2} = 0,102 \cdot 10^6 \cdot 0,16 = 0,0163 \cdot 10^6 \text{ Па};$$

парциальное давление H_2O

$$p_{H_2O} = pr_{H_2O} = 0,102 \cdot 10^6 \cdot 0,09 = 0,0092 \cdot 10^6 \text{ Па}.$$

Соответственно произведения парциальных давлений на длину луча:

$$p_{CO_2} l_{эф} = 0,0163 \cdot 10^6 \cdot 1,82 = 0,296 \cdot 10^6 \text{ м} \cdot \text{Па};$$

$$p_{H_2O} l_{эф} = 0,0092 \cdot 10^6 \cdot 1,82 = 0,168 \cdot 10^6 \text{ м} \cdot \text{Па}.$$

Определяя вклады газов в степень черноты по рис. 19.1, 19.2, 19.3 и пренебрегая поправкой $\Delta \epsilon$, получаем $\epsilon_{CO_2} = 0,14$;

$$\epsilon_{H_2O} = 0,17; \beta = 1,37;$$

$$\epsilon_r = \epsilon_{CO_2} + \beta \epsilon_{H_2O} = 0,14 + 1,37 \cdot 0,17 = 0,373;$$

$$E_r = \epsilon_r \sigma_0 T_r^4 = 0,373 \cdot 5,67 \cdot 10^{-8} \cdot 1500^4 = 107,3 \text{ кВт/м}^2.$$

19.14. По условиям задачи 19.13 определить результирующую плотность потока излучения между газами и стенками печи, если температура стенок равна 1100 К, а степень черноты поверхности 0,8.

19.15. Водяной пар с температурой 500 К при давлении 0,102 МПа проходит по трубопроводу диаметром 100 м с полированными металлическими стенками, имеющими температуру 300 К. Определить плотность теплового потока, отводимого от пара за счет излучения на стенки, если степень их черноты равна 0,1. Сравнить результаты расчета при использовании точной и приближенной формул для эффективной степени черноты стенки.

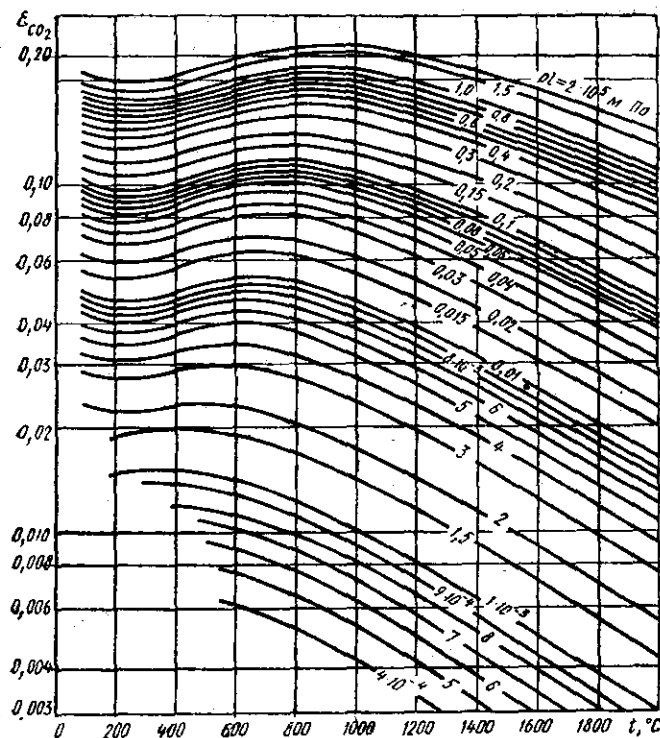


Рис. 19.2

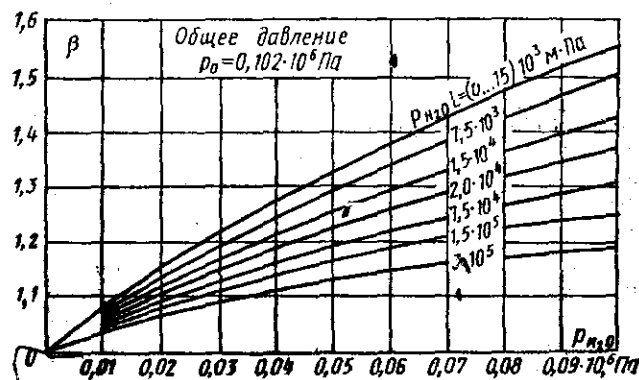


Рис. 19.3

Решение. Эффективную длину луча в трубопроводе определяем как для цилиндра с длиной, равной 10 диаметрам:

$$l_{эф} = \frac{3,6V}{F} = \left(3,6 \frac{\pi d^2}{4} L \right) / \left(\pi dL + 2 \frac{\pi d^2}{4} \right) =$$

$$= \left(3,6 \frac{3,14 \cdot 0,1^2}{4} 10 \cdot 0,1 \right) / \left(3,14 \cdot 0,1 \cdot 10 \cdot 0,1 + \right.$$

$$\left. + 2 \frac{3,14 \cdot 0,1^2}{4} \right) = 0,0857 \text{ м.}$$

Тогда

$$p_{H_2O} l_{эф} = 0,102 \cdot 10^6 \cdot 0,0857 = 0,87 \cdot 10^4 \text{ м} \cdot \text{Па};$$

$$\varepsilon_{H_2O} = 0,18; \beta = 1,1 \text{ (см. рис. 19.1, 19.3); } A_{H_2O} = 0,22;$$

$$\varepsilon_r = 1,1 \cdot 0,18 = 0,198; A_r = 1,1 \cdot 0,22 = 0,242.$$

По точной формуле (IX.68) [19]

$$\varepsilon'_{ст} = \varepsilon_{ст} / [1 - (1 - \varepsilon_{ст})(1 - A_r)] =$$

$$= 0,1 / [1 - (1 - 0,1)(1 - 0,242)] = 0,314;$$

$$q_{г-ст} = \varepsilon'_{ст} \sigma_0 (\varepsilon_r T_r^4 - A_r T_{ст}^4) = 0,314 \cdot 5,67 \cdot 10^{-8} \times$$

$$\times (0,198 \cdot 500^4 - 0,242 \cdot 300^4) = 186 \text{ Вт/м}^2.$$

По приближенной формуле (X.70) [19]:

$$\varepsilon'_{ст} = (\varepsilon_{ст} + 1) / 2 = (0,1 + 1) / 2 = 0,55;$$

$$q_{г-ст} = 186 \cdot 0,55 / 0,314 = 325 \text{ Вт/м}^2,$$

т. е. оказывается завышенной на 75%.

19.16. Цилиндрическая камера сгорания диаметром 1,2 м и длиной 3 м заполнена светящимся пламенем жидкого топлива со средней температурой газов 1513 К. Считая излучение пламени серым со степенью черноты 0,4, определить тепловой поток, воспринимаемый боковой поверхностью камеры сгорания. Металлическая стенка камеры сгорания охлаждается водой и имеет температуру поверхности $T_{ст} = 410 \text{ К}$; $\varepsilon_{ст} = 0,85$.

19.17. В межтрубном пространстве шахматного трубного пучка теплообменника, работающего при избыточном давлении газов 0,28 МПа, движутся продукты сгорания природного газа, содержащие 8,7 % CO_2 и 18 % H_2O (по объему). Средняя температура газов в пучке 1173 К. Определить коэффициент теплоотдачи излучением от газа к стенкам труб, имеющим степень черноты $\varepsilon_{ст} = 0,9$ и температу-

ру $T_{ст} = 673$ К. Наружный диаметр труб $d = 38$ мм, поперечный шаг $s_1 = 78$ мм, продольный шаг $s_2 = 64$ мм.

Указание. Длина луча в трубных пучках рассчитывается по формуле

$$l_{эф} = 0,9d \left(\frac{4}{\pi} \frac{s_1 s_2}{d^2} - 1 \right).$$

Решение. Эффективная длина луча

$$l_{эф} = 0,9d \left(\frac{4}{\pi} \frac{s_1 s_2}{d^2} - 1 \right) = 0,9 \cdot 0,038 \times$$

$$\times \left(\frac{4}{3,14} \frac{0,078 \cdot 0,064}{0,038^2} - 1 \right) = 0,117 \text{ м.}$$

Произведение парциальных давлений газов на длину луча при полном давлении газов, равном $p_r = p_{изб} + p_{баром} = 0,28 + 0,102 = 0,382$ МПа:

$$p_{CO_2} l_{эф} = 0,382 \cdot 10^6 \cdot 0,087 \cdot 0,117 = 0,429 \cdot 10^4 \text{ м} \cdot \text{Па};$$

$$p_{H_2O} l_{эф} = 0,382 \cdot 10^6 \cdot 0,18 \cdot 0,117 = 0,887 \cdot 10^4 \text{ м} \cdot \text{Па}.$$

Степени черноты, поглощательные способности и поправочный коэффициент для каждого из излучающих газов находим из графиков (см. рис. 19.1, 19.2, 19.3): $\epsilon_{CO_2} = 0,084$; $\epsilon_{H_2O} = 0,111$; $A_{CO_2} = 0,079$; $A_{H_2O} = 0,160$; $\beta = 1,35$.

Степень черноты и поглощательная способность смеси газов:

$$\epsilon_r = \epsilon_{CO_2} + \beta \epsilon_{H_2O} = 0,084 + 1,35 \cdot 0,111 = 0,233;$$

$$A_r = A_{CO_2} + \beta A_{H_2O} = 0,079 + 1,35 \cdot 0,160 = 0,295.$$

Тепловосприятие труб за счет лучистого теплообмена

$$q_{л} = \frac{\epsilon_{ст} + 1}{2} \sigma_0 (\epsilon_r T_r^4 - A_r T_{ст}^4) =$$

$$= \frac{0,9 + 1}{2} 5,6 \cdot 10^{-8} (0,233 \cdot 1173^4 - 0,295 \cdot 673^4) =$$

$$= 20400 \text{ Вт/м}^2.$$

Условный коэффициент теплоотдачи излучением

$$\alpha_{л} = q_{л} / (T_r - T_{ст}) = 20400 / (1173 - 673) = 41 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}.$$

19.18. Как изменится коэффициент теплоотдачи излучением в условиях задачи 19.17, если в результате перехода на сжигание угля вместо газа содержащего углекислого газа в продуктах сгорания увеличится до 12,6 %, водяного пара

уменьшится до 7,7 %, а средняя температура газов понизится до 1023 К?

19.19. Определить количество теплоты, которое воспринимает воздух, охлаждающий стенку камеры сгорания газовой турбины, если считать, что теплота передается стенке конвекцией от газов, заполняющих камеру сгорания, и излучением от пламени, действительная форма и размеры которого заменяются условным цилиндром с размерами, показанными на рис. 19.4, где изображена условная расчетная схема камеры сгорания. Температура пламени 2073 К, температура газов, омывающих

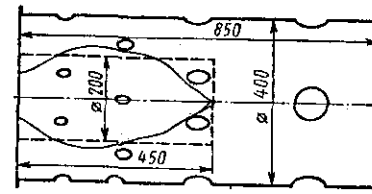


Рис. 19.4

стенку, 1300 К, температура стенки 973 К, степень черноты $\epsilon_{ст} = 0,85$. Состав газов в пламени в объемных долях: 13,7 % CO_2 , 12,6 % H_2O , остальное — неизлучающие газы. Полное давление 0,8 МПа, коэффициент ослабления

лучей сажиными частицами в полусветящемся пламени принять равным $K_c = 3,41 / (\text{м} \cdot \text{МПа})$. Коэффициент теплоотдачи конвекцией принять равным 120 Вт/(м²·К). Найти также коэффициент теплоотдачи излучением и суммарный коэффициент теплоотдачи к стенкам камеры от газов.

Решение. Представляя задачу как задачу лучистого теплообмена между выпуклым телом (пламя) и окружающей его оболочкой (стенка и торцы камеры сгорания), количество теплоты, воспринимаемой стенкой за счет излучения, выразим как

$$Q_{л} = F_{пл} \epsilon_{пр} \sigma_0 (T_{пл}^4 - T_{ст}^4) F_{ст} / F_{полн}, \quad (19.3)$$

где $F_{пл} = \pi \cdot 0,2 \cdot 0,45 + \pi \cdot 0,2^2 / 4 = 0,314 \text{ м}^2$ — поверхность пламени; $F_{ст} = \pi \cdot 0,4 \cdot 0,85 = 1,07 \text{ м}^2$ — боковая поверхность стенки камеры сгорания; $F_{полн} = 1,07 + 2\pi \cdot 0,4^2 / 4 = 1,321 \text{ м}^2$; — полная поверхность камеры сгорания;

$$\epsilon_{пр} = \frac{1}{\frac{1}{\epsilon_{пл}} + \frac{F_{пл}}{F_{полн}} \left(\frac{1}{\epsilon_{ст}} - 1 \right)} \quad (19.4)$$

— приведенная степень черноты системы пламя—стенка.

В свою очередь, степень черноты пламени выражается как

$$\epsilon_{пл} = 1 - \exp(-Kpl), \quad (19.5)$$

где $l = 3,6V_{пл}/F_{пл} = 3,6 \cdot 0,785 \cdot 0,2^2 \cdot 0,45 / [\pi \cdot 0,2 \cdot 0,45 + 2 \cdot 0,785 \cdot 0,2^2] = 0,162$ м — эффективная длина луча в пламени; $K = K_r + K_c$ — суммарный коэффициент ослабления лучей трехатомными газами K_r и сажистыми частицами K_c в пламени. Для нахождения коэффициента ослабления лучей трехатомными газами представим степень черноты трехатомных газов в виде

$$\varepsilon_r = 1 - \exp(-K_r p l), \quad (19.6)$$

откуда

$$K_r = -\ln(1 - \varepsilon_r)/(p l). \quad (19.7)$$

Степень черноты газов находим с помощью графиков (см. рис. 19.1, 19.2, 19.3), предварительно вычислив необходимые величины:

$$p_{CO} l = 0,8 \cdot 10^4 \cdot 0,137 \cdot 0,162 = 0,178 \cdot 10^5 \text{ м} \cdot \text{Па};$$

$$p_{H_2O} l = 0,8 \cdot 10^4 \cdot 0,126 \cdot 0,162 = 0,163 \cdot 10^5 \text{ м} \cdot \text{Па};$$

$$\varepsilon_{CO} = 0,058; \varepsilon_{H_2O} = 0,062; \beta = 1,27.$$

По формулам (19.6), (19.7) вычисляем ε_r и K_r :

$$\varepsilon_r = 0,058 + 1,27 \cdot 0,062 = 0,137;$$

$$K_r = -\ln(1 - 0,137)/0,8 \cdot 0,162 = 1,14 \text{ (м} \cdot \text{Па)}^{-1};$$

$$K = K_r + K_c = 1,14 + 3,4 = 4,44 \text{ (м} \cdot \text{Па)}^{-1}.$$

По формулам (19.5), (19.4) и (19.3) находим $\varepsilon_{пл}$, $\varepsilon_{пр}$ и $Q_{пл}$:

$$\varepsilon_{пл} = 1 - \exp(-4,44 \cdot 0,8 \cdot 0,162) = 0,435;$$

$$\varepsilon_{пр} = 1/[1/0,435 + 0,314/1,325 (1/0,85 - 1)] = 0,426;$$

$$Q_{пл} = 0,314 \cdot 0,426 \cdot 5,67 \cdot 10^{-8} (2073^4 - 973^4) = 107,4 \text{ кВт}.$$

Количество теплоты, переданное конвекцией,

$$Q_k = F_{ст} \alpha_k (T_r - T_{ст}) = 1,07 \cdot 120 (1300 - 973) = 41,9 \text{ кВт}.$$

Суммарное количество теплоты

$$Q = Q_{пл} + Q_k = 107,4 + 41,9 = 149,3 \text{ кВт}.$$

Коэффициент теплоотдачи излучением

$$\alpha_{пл} = Q_{пл}/[F_{ст} (T_r - T_{ст})] = 107,4 / [1,07 (1300 - 973)] = 307 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)};$$

суммарный —

$$\alpha = \alpha_k + \alpha_{пл} = 120 + 307 = 427 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}.$$

20.1. В трубчатом двухходовом воздухоподогревателе парового котла (рис. 20.1) воздух с расходом $M_2 = 21,5$ кг/с должен нагреваться от температуры $T_{ж2} = 303$ К до $T_{ж2}' = 533$ К. Определить необходимую поверхность нагрева, высоту труб в одном ходе l_1 и число труб, расположенных поперек и вдоль потока воздуха. Дымовые газы (состав в объемных долях: 13 % CO_2 , 11 % H_2O ; расход $M_1 = 19,6$ кг/с) движутся в стальных трубах [$\lambda = 46,5$ Вт/(м·К)] диаметром $d_2/d_1 = 53/50$ мм со средней скоростью $w_1 = 14$ м/с. Температура газов на входе в воздухоподогреватель $T_{ж1}' = 653$ К. Воздух движется поперек трубного пучка со средней скоростью в узком сечении пучка $w_2 = 8$ м/с. Трубы расположены в шахматном порядке с шагом $s_1 = s_2 = 1,3 d_2$.

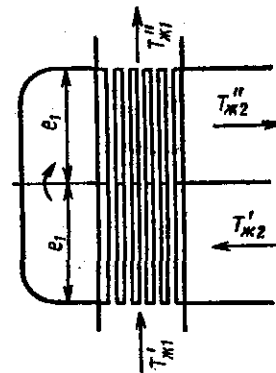


Рис. 20.1

Решение. $T_{ж2} = 0,5 (T_{ж2}' + T_{ж2}'') = 0,5 (303 + 533) = 418$ К.

При этой температуре физические параметры воздуха: $\rho = 0,844$ кг/м³; $c_p = 1,01$ кДж/(кг·К); $\lambda = 3,52 \cdot 10^{-3}$ Вт/(м·К); $\nu = 28,3 \cdot 10^{-6}$ м²/с; $Pr = 0,684$.

Количество переносимой теплоты

$$Q = M_2 c_p (T_{ж2}' - T_{ж2}) = 21,5 \cdot 1,01 (533 - 303) = 5 \cdot 10^3 \text{ кВт}.$$

Принимаем среднюю температуру газов в воздухоподогревателе $T_{ж1} = 573$ К. При этой температуре $c_p = 1,12$ кДж/(кг·К);

$$T_{ж1}'' = T_{ж1}' - Q/(M_1 c_p) = 653 - 5 \cdot 10^3 / (19,6 \cdot 1,12) = 425 \text{ К};$$

$$T_{ж1} = 0,5 (T_{ж1}' + T_{ж1}'') = 0,5 (653 + 425) = 539 \text{ К};$$

$$\rho = 0,622 \text{ кг/м}^3; c_p = 1,11 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{К)};$$

$$\lambda = 45,4 \cdot 10^{-3} \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}; \nu = 41,2 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}; Pr = 0,66;$$

$$Re_{ж1} = w_1 d_1 / \nu = \frac{14 \cdot 5 \cdot 10^{-2}}{41,2 \cdot 10^{-6}} = 17 \cdot 10^3 > 10^4.$$

$$Nu_{ж1} = 21 \cdot 10^{-3} \cdot Re^{0.8} \cdot Pr^{0.43} =$$

$$= 21 \cdot 10^{-3} (1,7 \cdot 10^4)^{0.8} (0,66)^{0.43} = 43,5.$$

$$\alpha_1 = Nu \lambda / d = 43,5 \cdot 45,4 \cdot 10^{-3} / (5 \cdot 10^{-2}) = 39,5 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}.$$

Для потока воздуха

$$Re_{ж2} = w_2 d_2 / \nu = 8 \cdot 53 \cdot 10^{-3} / (28,3 \cdot 10^{-6}) = 15 \cdot 10^3.$$

Число Нуссельта при поперечном потоке

$$Nu_{ж2} = 0,41 \cdot Re^{0.6} Pr^{0.33} = 0,41 (1,5 \cdot 10^4)^{0.6} \times \\ \times (0,684)^{0.33} = 115;$$

$$\alpha_2 = Nu \lambda / d = 115 \cdot 35,2 \cdot 10^{-3} / (53 \cdot 10^{-3}) = 76,2 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}.$$

Коэффициент теплопередачи

$$k = 1 / (1/\alpha_1 + \delta_c / \lambda_c + 1/\alpha_2) = 1 / (1/39,5 + (1,5 \cdot 10^{-3}) / 46,5 + 1/76,2) = 26 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}.$$

Средний температурный напор $\Delta T_{\text{прот}} = \Delta T_{\text{ар}} = 538 - 418 = 120 \text{ К};$

$$P = (T''_{ж2} - T'_{ж2}) / (T'_{ж1} - T'_{ж2}) = (533 - 303) / (653 - 303) = 0,658;$$

$$R = (T'_{ж1} - T''_{ж1}) / (T''_{ж2} - T'_{ж2}) = (653 - 425) / (533 - 303) = 1.$$

По графикам (рис. 20.2) для рассматриваемой схемы теплоносителя:

$$\varepsilon = 0,88; \Delta T = \varepsilon \Delta T_{\text{прот}} = 0,88 \cdot 120 = 105,5 \text{ К}.$$

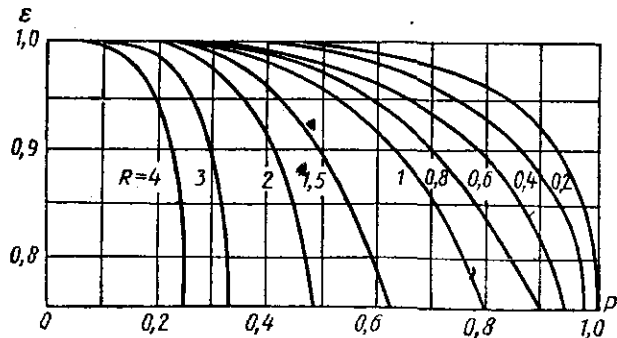


Рис. 20.2

Поверхность нагрева воздухоподогревателя

$$F = Q / (k \Delta T) = 5 \cdot 10^6 / (26 \cdot 105,5) = 1830 \text{ м}^2.$$

Общее число труб

$$n = 4M_1 / (\rho_1 \pi d_1^2 w_1) = 4 \cdot 19,6 / [0,662 \cdot 3,14 (5 \cdot 10^{-3}) \cdot 14] = 1080.$$

Высота труб в одном ходе

$$l_1 = F / (2 \pi d_1 n) = 1830 / (2 \cdot 3,14 \cdot 5 \cdot 10^{-2} \cdot 1080) = 5,4 \text{ м}.$$

Сечение для прохода воздуха

$$f = M_2 / (\rho w) = 21,5 / (0,844 \cdot 8) = 3,2 \text{ м}^2.$$

Число труб, расположенных поперек потока

$$n_1 = f / l_1 (s_1 - d_2) = 3,2 / [5,4 (1,3 \cdot 0,053 - 0,053)] \approx 38.$$

Число труб, расположенных вдоль потока,

$$n_2 = n / n_1 = 1080 / 38 \approx 29.$$

20.2. Определить поверхность излучателя, необходимую для отвода отбросной теплоты от ядерной энергетической установки мощностью $N = 35 \text{ кВт}$, размещенной на искусственном спутнике Земли. К.п.д. установки $\eta = 8,8\%$, через излучатель циркулирует эвтектический сплав $\text{Na} - \text{K}$ с расходом $M = 14 \text{ 600 кг/ч}$, имеющий температуру на входе в излучатель $T' = 624 \text{ К}$. Эффективная температура космического пространства вблизи Земли может быть принята равной 300 К .

20.3. В парогенераторе атомной электростанции вырабатывается 57 т/ч водяного пара при давлении $1,37 \text{ МПа}$ и температуре 586 К . Первичным теплоносителем служит углекислый газ, поступающий в парогенератор с расходом 750 т/ч при температуре 613 К . Определить температуру углекислого газа на выходе из парогенератора, если температура питательной воды, поступающей в парогенератор, составляет 381 К .

20.4. Определить объемный расход водорода, поступающего при давлении $3,0 \text{ МПа}$ в камеру сгорания водородно-кислородного ЖРД после того, как он используется для охлаждения стенок сопла двигателя. Массовый расход водорода 2 кг/с , температура водорода на входе 20 К , его средняя теплоемкость $13,2 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{К)}$.

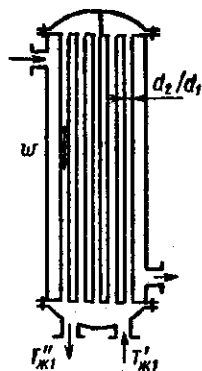


Рис. 20.3

20.5. Определить основные размеры вертикального четырехходового пароводяного трубчатого теплообменника (рис. 20.3), предназначенного для нагрева $M_1 = 8,34$ кг/с воды от температуры $T'_{ж1} = 293$ К до $T''_{ж1} = 368$ К. Вода движется внутри латунных трубок [$\lambda = 104$ Вт/(м·К)] диаметром $d_2/d_1 = 14/12$ мм со скоростью $w = 1,5$ м/с. Греющим теплоносителем служит насыщающийся водяной пар с давлением $p_n = 127,5$ кПа, который конденсируется на внешней поверхности трубок. Тепловые потери в окружающую среду составляют 2 % от подводимого количества теплоты.

Решение. Тепловой поток

$$Q = M_1 c_p (T''_{ж1} - T'_{ж1}) = 8,34 \cdot 4,187 (368 - 293) = 2620 \text{ кВт.}$$

При $p_n = 127,5$ кПа: $T_n = 380$ К; $i'' = 2685$ кДж/кг; $i' = 447$ кДж/кг;

$$M_2 = Q / [\eta (i'' - i')] = 2620 / [(2685 - 447) 0,98] = 1,2 \text{ кг/с;}$$

$$\Delta T_n = (T''_{ж1} - T'_{ж1}) / \left(\ln \frac{T_n - T'_{ж1}}{T_n - T''_{ж1}} \right) = (368 - 293) / \ln \left(\frac{86,6}{11,6} \right) = 37,4 \text{ К;}$$

$$T_{ст2} \simeq T_n - \Delta T_n / 2 = 380 - 37,4 / 2 = 361,3 \text{ К.}$$

В первом приближении задаем высоту трубок $H = 2$ м. Физические свойства воды при $T_n = 380$ К:

$$\lambda_{ж} = 0,684 \text{ Вт/(м·К); } \nu_{ж} = 0,28 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с;}$$

$$\rho_{ж} = 953 \text{ кг/м}^3; \quad r = 2242 \text{ кДж/кг;}$$

$$A = \left(\frac{g}{\nu_{ж}^2} \right)^{1/3} \frac{\lambda_{ж}}{\rho_{ж} \nu_{ж}} = \left[\frac{9,81}{(0,28 \cdot 10^{-6})^2} \right]^{1/3} \times \frac{0,684}{2242 \cdot 10^3 \cdot 953 \cdot 0,28 \cdot 10^{-6}} = 57,6 \text{ (м·К)}^{-1};$$

$$B = \frac{1}{\rho_{ж} \nu_{ж}} = \frac{1}{2242 \cdot 10^3 \cdot 953 \cdot 0,28 \cdot 10^{-6}} = 1,672 \cdot 10^{-2} \text{ м/Вт.}$$

Для расчета теплоотдачи при конденсации пара вычисляем безразмерный комплекс Z и число Re ([19], формула (VIII.24)):

$$Z = (T_n - T_{ст2}) H A = (380 - 361) 2 \cdot 57,6 = 2189;$$

$$Re = 0,95 Z^{0,78} \varepsilon_i = 0,95 (2189)^{0,78} 1,01 = 386,8.$$

Поправочный коэффициент ε_i принимаем равным 1,01 ([19], табл. VIII.1);

$$\alpha_2 = \frac{Re}{\Delta T_{нв}} = \frac{386,8}{(380 - 361) 2 \cdot 1,672 \cdot 10^{-2}} = 6080 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К).}$$

$$\text{При } T_{ж1} = 0,5 (T'_{ж1} + T''_{ж1}) = 0,5 (293 + 368) = 330,5 \text{ К}$$

$$\nu_{ж} = 0,498 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с; } \lambda_{ж} = 0,665 \text{ Вт/(м·К); } \rho_{ж} = 984 \text{ кг/м}^3;$$

$$Pr_{ж} = 3,12; \quad Re_{ж} = w d_1 / \nu_{ж} = 1,5 \cdot 1,2 \cdot 10^{-2} / (0,498 \cdot 10^{-6}) = 3,62 \cdot 10^4 > 10^4 \text{ и режим течения — турбулентный.}$$

Перепад температур по толщине стенки оцениваем в 1 К, тогда

$$T_{ст1} \simeq T_{ст2} - 1 = 361 - 1 = 360 \text{ К; } Pr_{ст} = 2,03;$$

$$Nu = 21 \cdot 10^{-3} Re_{ж}^{0,8} Pr_{ж}^{0,43} (Pr_{ж} / Pr_{ст})^{0,25} = 21 \cdot 10^{-3} (3,62 \cdot 10^4)^{0,8} (3,12)^{0,43} (3,12 / 2,03)^{0,25} = 165;$$

$$\alpha_1 = Nu_{ж} \lambda_{ж} / d_1 = 165 \cdot 0,655 / (1,2 \cdot 10^{-2}) = 9 \cdot 10^3 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К).}$$

Коэффициент теплопередачи

$$k = 1 / (1/\alpha_1 + \delta/\lambda + 1/\alpha_2) = 1 / [1/(9 \cdot 10^3) + 1 \cdot 10^{-12} / 104,5 + 1/(6,08 \cdot 10^3)] = 3,63 \text{ кВт/(м}^2 \cdot \text{К);}$$

$$q = k \Delta T_n = 3,63 \cdot 10^3 \cdot 37,4 \cdot 10^{-3} = 135,8 \text{ кВт/м}^2.$$

Поверхность нагрева

$$F = Q/q = 2,62 \cdot 10^3 / 135,8 = 19,3 \text{ м}^2.$$

Число трубок в одном ходе

$$\frac{4M_1}{\rho_{пл} \nu_{пл}} = \frac{4 \cdot 8,34}{984 \cdot 1,5 \cdot 3,14 (1,2 \cdot 10^{-2})^2} = 50.$$

Всего трубок $n = 50 \cdot 4 = 200$.

$$\text{Высота трубок } H = F / (\pi d_{ср} n) = 19,3 / (3,14 \cdot 1,3 \cdot 10^{-2} \times 200) = 2,37 \text{ м.}$$

Температуры поверхностей стенок трубки

$$T_{\text{ст}2} = T_{\text{н}} - q/\alpha_2 = 379,6 - 135,8 \cdot 10^3 / (6,08 \cdot 10^3) = 357,3 \text{ К};$$

$$T_{\text{ст}1} = T_{\text{ст}2} - q\delta/\lambda = 357,3 - 135,8 \cdot 10^3 \cdot 10^{-3} / 104,5 = 356 \text{ К}.$$

Полученные значения H , $T_{\text{ст}2}$, $T_{\text{ст}1}$ не совпадают с принятыми, поэтому выполняют второе приближение, принимая $H = 2,4$ м. Окончательный размер трубок $H = 2,5$ м.

20.6. Автомобильный радиатор (рис. 20.4), состоящий из оребренных трубок сечением $13,5 \times 2,4$ мм, отводит 33,52 кДж теплоты в секунду. Определить число водяных трубок при

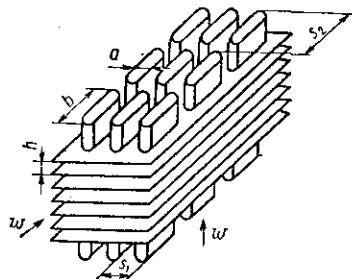


Рис. 20.4

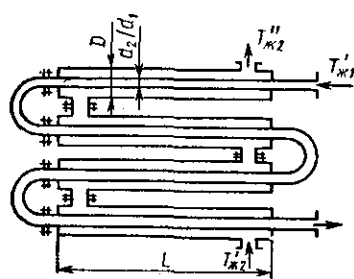


Рис. 20.5

их длине $l = 0,45$ м, если коэффициент оребрения $\phi = F_2/F_1 = 2,18$; коэффициент теплоотдачи от воды к стенке $\alpha_1 = 2330 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}$, толщина стенки $\delta = 3 \cdot 10^{-4}$ м, материал стенки медь [$\lambda = 384 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$] и коэффициент теплоотдачи от стенки к воздуху $\alpha_2 = 186 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}$. Средняя температура воды $T_1 = 360,5 \text{ К}$, воздуха $T_2 = 310,5 \text{ К}$.

20.7. Определить поверхность нагрева и число секций водоводяного теплообменника (рис. 20.5) типа «труба в трубе». Греющая вода движется во внутренней стальной трубе [$\lambda_{\text{ст}} = 45,4 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$] диаметром $d_2/d_1 = 35/32$ мм и имеет температуру на входе $T_{\text{ж}1}' = 368 \text{ К}$. Расход греющей воды $M_1 = 2130 \text{ кг/ч}$. Нагреваемая вода движется противотоком по кольцевому каналу между трубами и нагревается от $T_{\text{ж}2}' = 288 \text{ К}$ до $T_{\text{ж}2}'' = 318 \text{ К}$. Внутренний диаметр внешней трубы $D = 48$ мм. Расход нагреваемой воды $M_2 = 3200 \text{ кг/ч}$. Длина одной секции теплообменника $l = 1,75$ м. Потерями теплоты через внешнюю поверхность теплообменника пренебречь.

20.8. Определить коэффициент теплоотдачи от жидкости к стенке змеевика при нитровании толуола в цилиндрическом реакторе (рис. 20.6) диаметром $D = 900$ мм. Температура в реакторе не должна превышать $T = 308 \text{ К}$. Содержимое емкости перемешивается пропеллерной мешалкой диаметром $d = 300$ мм с частотой вращения 150 об/мин. Теплофизические параметры жидкости (75% H_2SO_4), заполняющей реактор при $T = 308 \text{ К}$: $\lambda_{\text{ж}} = 0,399 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$;

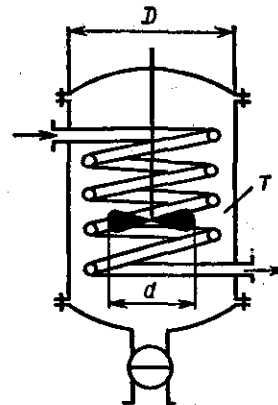


Рис. 20.6

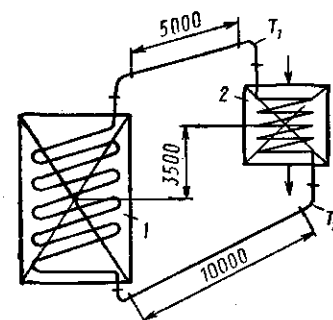


Рис. 20.7

$\mu_{\text{ж}} = 63,8 \cdot 10^{-4} \text{ Н} \cdot \text{с/м}^2$; $c_p = 1,886 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{К)}$, $\rho_{\text{ж}} = 1665 \text{ кг/м}^3$. При $T_{\text{ст}} = 297 \text{ К}$; $\mu_{\text{ст}} = 84,4 \cdot 10^{-4} \text{ Н} \cdot \text{с/м}^2$.

Указание. Для расчета теплоотдачи, в случае механического перемешивания жидкости в цилиндрическом сосуде, справедлива следующая зависимость:

$$\text{Nu}_{\text{ж}} = 1,01 \text{Re}_{\text{ж}}^{0,62} \text{Pr}_{\text{ж}}^{0,33} (\mu/\mu_{\text{ст}})^{0,14},$$

где

$$\text{Nu}_{\text{ж}} = (\alpha D / \lambda_{\text{ж}}); \text{Re}_{\text{ж}} = D n \rho_{\text{ж}} / (60 \mu_{\text{ж}}).$$

20.9. Рассчитать теплоснабжение горячей водой дистилляционного аппарата (рис. 20.7), для работы которого необходима тепловая мощность в 29,08 кВт. Температура воды в подводящем трубопроводе $T_1 = 623 \text{ К}$, в отводящем — $T_2 = 573 \text{ К}$. Коэффициент теплопередачи трубчатки аппарата $k = 814 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}$ при разности температур $\Delta T = 65 \text{ К}$. Разность уровней центра котла 1 и центра обогреваемого аппарата 2 — 3,5 м, длина соединительного тру-

бопровода с четырьмя коленами 15 м, $d_2/d_1 = 35/25$ мм. Плотность теплового потока, вырабатываемого генератором, 11,05 кВт/м².

Решение. Расход воды, протекающей через систему,

$$M = \frac{3600N}{c_p(T_1 - T_2)} = \frac{29,08 \cdot 3600}{4,187(623 - 573)} = 500 \text{ кг/ч.}$$

По таблицам Приложения при $T_{ж} = 623 \text{ К}$ находим $v' = 1,74 \text{ дм}^3/\text{кг}$. При $T_{ж} = 573 \text{ К}$ $v' = 1,40 \text{ дм}^3/\text{кг}$. Средний удельный объем равен $1,57 \text{ дм}^3/\text{кг}$. Объемный расход циркулирующей воды равен $Mv = 500 \cdot 1,57 = 790 \text{ дм}^3/\text{ч} = 0,22 \text{ дм}^3/\text{с}$.

При диаметре 25 мм внутреннее сечение трубопровода $f = 0,049 \text{ дм}^2$ и скорость воды $w = Mv/f = 0,22/0,049 = 4,5 \text{ дм/с}$. При 573 К $\rho_2 = 713 \text{ кг/м}^3$, при 623 К $\rho_1 = 575 \text{ кг/м}^3$, следовательно, $p = Hg(\rho_2 - \rho_1) = 3,5 \cdot 9,81(713 - 575) = 4738 \text{ Па}$.

Условие циркуляции будет выполняться при $p \geq \Delta p$. Поверхность нагрева генератора теплоты может быть

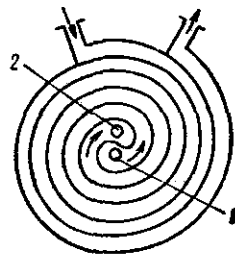


Рис. 20.8

определена по плотности теплового потока: $N/q = 29,08/11,05 = 2,65 \text{ м}^2$, тогда при диаметре трубки 35/25 мм длина трубок $l_1 = 28 \text{ м}$. Поверхность нагрева в дистилляторе при $k = 814 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}$ и разности температур $\Delta T = 65 \text{ К}$ равна $0,55 \text{ м}^2$ или $l_2 = 5,85 \text{ м}$ трубки. Длина соединительных трубок $l_3 = 15 \text{ м}$;

$$l = (l_1 + l_2 + l_3) = (28 + 5,85 + 15) = 48,85 \text{ м};$$

$$\rho = 0,5(\rho_1 + \rho_2) = 0,5(575 + 713) = 644 \text{ кг/м}^3;$$

$$Re = (\omega p d)/\mu = (0,45 \cdot 644 \cdot 0,025)/(85,35 \cdot 10^{-6}) = 84,89 \times 10^3;$$

$$\Delta p = \frac{0,3164 \cdot l \rho w^3}{Re^{0,25} d^2} = \frac{0,3164 \cdot 48,85 \cdot 644 \cdot 0,45^3}{(84,89 \cdot 10^3)^{0,25} 25 \cdot 10^{-3} \cdot 2} = 2362 \text{ Па.}$$

Местные сопротивления четырех колен диаметром 25 мм:

$$\zeta = 1,5 \cdot 4 = 6; \Delta p'' = \zeta \frac{\rho w^3}{2} = 6 \frac{644 \cdot 0,45^3}{2} = 391,2 \text{ Па};$$

$$\Delta p = (\Delta p' + \Delta p'') = (2362 + 391,2) = 2753 \text{ Па}; p > \Delta p,$$

следовательно, условие циркуляции выполнено.

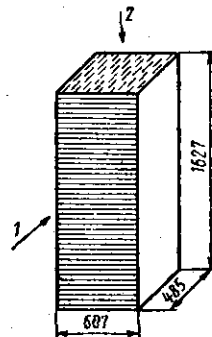


Рис. 20.9

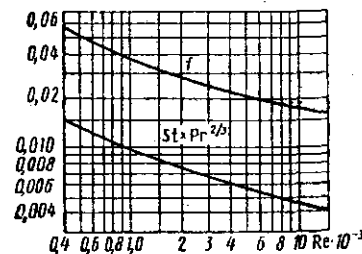


Рис. 20.10

20.10. Определить коэффициенты теплоотдачи в спиральном водоводяном теплообменнике (рис. 20.8) тепловой мощностью 130,4 кВт, площадью теплопередающей поверхности $F = 9 \text{ м}^2$ при среднелогарифмической разности температур $\Delta T_{л} = 5,2 \text{ К}$, толщине стенок 5 мм [$\lambda = 46,52 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$], скорости холодной воды 1 — 2,2 м/с и горячей 2 — 1,8 м/с.

20.11. Рассчитать промежуточный холодильный ГТУ (рис. 20.9), если расход влажного воздуха 1 составляет 90 720 кг/ч, влагосодержание 0,015 кг/кг. Температура воздуха на входе 400 К, давление воздуха на входе 273,2 кПа, расход воды 2 — 181 300 кг/ч, температура воды на входе 288,6 К. Поверхность холодильника — плоские трубы, сплошные ребра. Со стороны воздуха гидравлический радиус канала $r_{возд} = 0,877 \text{ мм}$, отношение поверхности теплообмена к полному объему $\psi_{возд} = 887 \text{ м}^2/\text{м}^3$. Отношение

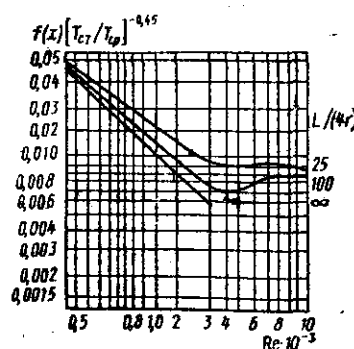


Рис. 20.11

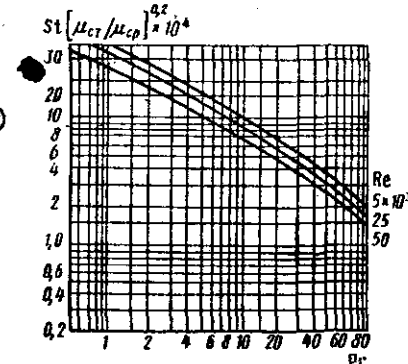


Рис. 20.12

поверхности ребер к полной поверхности $F_p/F = 0,845$. Отношение свободного сечения к полному (фронтальному) сечению $\sigma_1 = 0,780$; толщина металлического ребра $\delta = 0,1016$ мм; материал ребра — алюминиевый сплав с $\lambda = 173$ Вт/(м·К). Длина ребра, равная половине расстояния между трубами, $l = 5,72$ мм. Со стороны воды: внешние размеры сечения трубы $18,7 \times 2,5$ мм; внутренние размеры $18,2 \times 2,03$ мм. Поверхность ребра, приходящаяся на одну трубу (фронтальное сечение) $f_1 = 28 \cdot 10^{-5}$ м². Свободное сечение одной трубы $f_{c1} = 3,619 \cdot 10^{-5}$ м²; внутренний периметр трубы 38,7 мм. Отношение свободного сечения к фронтальному $\sigma_2 = 0,129$. Отношение поверхности теплообмена со стороны воды к полному объему $\psi_{\text{вод}} = 138,2$ м²/м³. Гидравлический радиус канала для прохода воды $r_{\text{вод}} = 0,932$ мм. Площадь фронтального сечения на стороне воздуха $f_{\text{фр.возд}} = 0,991$ м². Площадь фронтального сечения на стороне воды $f_{\text{фр.вод}} = 0,295$ м². Общий объем теплообменника $V = 0,479$ м³.

Указание. Для решения задачи воспользоваться графиками, приведенными на рис. 20.10, 20.11, 20.12 (на рисунках обозначено: f — коэффициент трения; L — полная длина поверхности теплообмена; r — гидравлический радиус канала, характерный размер канала, входящий в число Re, принят равным $4r$; $T_{\text{ср}}$ — средняя температура теплоносителя; $T_{\text{ст}}$ — температура внутренней поверхности канала). Методику расчета теплообменника см. в книге В. М. Кэйса и А. Л. Лондона «Компактные теплообменники» (М.—Л., 1962).

20.12. Определить, на сколько изменится коэффициент теплопередачи в теплообменнике, у которого стенка из стали заменена стеклянной при $\alpha_1 = 3489$ Вт/(м²·К), $\alpha_2 = 2326$ Вт/(м²·К). Толщина металлической стенки $\delta_m = 5$ мм [$\lambda_m = 27,91$ Вт/(м·К)], стеклянной $\delta_c = 7$ мм [$\lambda_c = 0,744$ Вт/(м·К)].

ЧАСТЬ ТРЕТЬЯ

ДОМАШНИЕ ЗАДАНИЯ

Задание 1. ГАЗОВЫЕ СМЕСИ

Условия задания. Сосуд разделен адиабатной перегородкой на четыре части, в каждой из которых содержатся различные газы. После того как перегородка убрана, происходит так называемое «смешение в объеме» без теплообмена с окружающей средой. Состояния газов до смешения характеризуются следующими параметрами: массой m_i , кг; объемом V_{i0} , м³; температурой t_{i0} , °C ($i = 1, 2, 3, 4$), которые приведены в табл. 21.1 в соответствии с номером варианта.

Необходимо определить:

- 1) температуру смеси после завершения процесса смешения — $t_{\text{см}}$, °C;
- 2) давление смеси — $p_{\text{см}}$, МПа;
- 3) газовую постоянную смеси — $R_{\text{см}}$, кДж/(кг·К);
- 4) среднюю молярную массу смеси — $\mu_{\text{см}}$, кг/кмоль;
- 5) состав смеси в объемных долях — r_i ;
- 6) состав смеси в молярных долях — x_i ;
- 7) парциальные давления компонентов смеси — p_i , МПа;
- 8) парциальные объемы компонентов смеси — V_i , м³;
- 9) истинную молярную теплоемкость смеси при $p = \text{const}$ для температуры смеси, которая устанавливается после окончания процесса смешения, μc_p , кДж/(кмоль·К);
- 10) истинную объемную теплоемкость смеси при $p = \text{const}$ и нормальных условиях для температуры смеси — c'_p , кДж/(м³·К);
- 11) истинную массовую теплоемкость смеси при $p = \text{const}$ для температуры смеси — c_p , кДж/(кг·К);
- 12) количество теплоты, которое необходимо отвести от 3 кмоль смеси для охлаждения ее при $p = \text{const}$ от температуры смеси до температуры 300 К;
- 13) количество теплоты, которое необходимо отвести от 4 м³ (н. у.) смеси при $p = \text{const}$ для охлаждения от температуры смеси до 300 К;

Таблица 21.1

№ вари- анта	Газ	m_L , кг	V_{L0} , м³	t_{L0} , °C	№ вари- анта	Газ	m_L , кг	V_{L0} , м³	t_{L0} , °C
1	O ₂	10	1,5	100	2	N ₂	10	1,5	100
	N ₂	5	1,0	200		H ₂	5	1,0	200
	H ₂	30	2,5	800		CO	30	2,5	800
	CO	15	3,0	1000		CO ₂	15	3,0	1000
3	H ₂	10	1,5	100	4	CO	10	1,5	100
	CO	5	1,0	200		CO ₂	5	1,0	200
	CO ₂	30	2,5	800		SO ₂	30	2,5	800
	SO ₂	15	3,0	1000		H ₂ O	15	3,0	1000
5	O ₂	16	3,2	1020	6	O ₂	31	2,7	820
	CO ₂	11	1,7	120		N ₂	16	3,2	1020
	SO ₂	6	1,2	220		SO ₂	11	1,7	120
	H ₂ O	31	2,7	820		H ₂ O	6	1,2	220
7	O ₂	6	1,2	220	8	O ₂	11	1,7	120
	N ₂	31	2,7	820		N ₂	6	1,2	220
	H ₂	16	3,2	1020		H ₂	31	2,7	820
	H ₂ O	11	1,7	120		CO	16	3,2	1020
9	N ₂	12	1,9	140	10	H ₂	12	1,9	140
	H ₂	7	1,4	240		CO	7	1,4	240
	CO	32	2,9	840		CO ₂	32	2,9	840
	CO ₂	17	3,4	1040		SO ₂	17	3,4	1040
11	CO	12	1,9	140	12	O ₂	17	3,4	1040
	CO ₂	7	1,4	240		CO ₂	12	1,9	140
	SO ₂	32	2,9	840		SO ₂	7	1,4	240
	H ₂ O	17	3,4	1040		H ₂ O	32	2,9	840
13	O ₂	33	3,1	860	14	O ₂	8	1,6	260
	N ₂	18	3,6	1060		N ₂	33	3,1	860
	SO ₂	13	2,1	160		H ₂	18	3,6	1060
	H ₂ O	8	1,6	260		H ₂ O	13	2,1	160
16	O ₂	13	2,1	160	16	N ₂	13	2,1	160
	N ₂	8	1,6	260		H ₂	8	1,6	260
	H ₂	33	3,1	860		CO	33	3,1	860
	CO	18	3,6	1060		CO ₂	18	3,6	1060

Продолжение табл. 21.1

№ вари- анта	Газ	m_L , кг	V_{L0} , м³	t_{L0} , °C	№ вари- анта	Газ	m_L , кг	V_{L0} , м³	t_{L0} , °C
17	H ₂	14	2,3	180	18	CO	14	2,3	180
	CO	9	1,8	280		CO ₂	9	1,8	280
	CO ₂	34	3,3	880		SO ₂	34	3,3	880
	SO ₂	19	3,8	1080		H ₂ O	19	3,8	1080
19	O ₂	19	3,3	1080	20	O ₂	34	3,3	880
	CO ₂	14	2,3	180		N ₂	19	3,8	1080
	SO ₂	9	1,8	280		SO ₂	14	2,3	180
	H ₂ O	34	3,3	880		H ₂ O	9	1,8	280
21	O ₂	10	2,0	300	22	O ₂	15	2,5	200
	N ₂	35	3,5	900		N ₂	10	2,0	300
	H ₂	20	4,0	1100		H ₂	35	3,5	900
	H ₂ O	15	2,5	200		CO	20	4,0	1100
23	N ₂	15	2,5	200	24	H ₂	15	2,5	200
	H ₂	10	2,0	300		CO	10	2,0	300
	CO	35	3,5	900		CO ₂	35	3,5	900
	CO ₂	20	4,0	1100		SO ₂	20	4,0	1100
25	CO	16	2,7	220	26	O ₂	21	4,2	1120
	CO ₂	11	2,2	320		CO ₂	16	2,7	220
	SO ₂	36	3,7	920		SO ₂	11	2,2	320
	H ₂ O	21	4,2	1120		H ₂ O	36	3,7	920

14) количество теплоты, которое необходимо отвести от 5 кг смеси при $p = \text{const}$ для охлаждения от температуры смеси до 300 К.

Методические указания. Считать компоненты смеси идеальными газами.

При определении истинной или средней теплоемкостей по таблицам Приложения пользоваться линейной интерполяцией.

Температуру смеси после окончания процесса смешения можно определить методом последовательных приближений.

Начальное приближение для температуры смеси можно вычислить, полагая теплоемкости компонентов смеси рав-

ными друг другу, по следующей формуле:

$$t_{см}^0 = \frac{\sum_{i=1}^4 m_i t_{i0}}{\sum_{i=1}^4 m_i}$$

Точность вычисления температуры смеси должна быть не менее 1 К.

При выполнении каждого пункта задания сохранить приведенную выше нумерацию.

Использовать только Международную систему единиц (СИ).

Задание 2. ГАЗОВЫЙ ЦИКЛ

Условия задания. Сухой воздух массой 1 кг совершает прямой термодинамический цикл, состоящий из четырех последовательных термодинамических процессов. Данные, необходимые для расчета в зависимости от варианта, приведены в табл. 21.2.

Требуется:

1) рассчитать давление p , удельный объем v , температуру T воздуха для основных точек цикла;

2) для каждого из процессов определить значения показателей политропы n , теплоемкости c , вычислить изменение внутренней энергии Δu , энтальпии Δi , энтропии Δs , теплоту процесса q , работу процесса l , располагаемую работу l_0 ;

3) определить суммарные количества теплоты подведенной q' и отведенной q'' , работу цикла $l_{ц}$, располагаемую работу цикла $l_{0ц}$, термический к.п.д. цикла η_t , среднее индикаторное давление p_i ;

4) построить цикл в координатах: а) $\lg v - \lg p$; б) $v - p$, используя предыдущее построение для нахождения координат трех-четырех промежуточных точек на каждом из процессов; в) $s - T$, нанеся основные точки цикла и составляющие его процессы;

5) используя u -и sT -диаграммы, графически определить величины, указанные в п. 2 и 3, и сопоставить результаты графического и аналитического расчетов;

6) для одного из процессов цикла привести схему его графического расчета по sT -диаграмме, изобразив на схеме линию процесса, вспомогательные линии изохорного и изобарного процессов, значения температур в начале и в конце процесса, отрезки, соответствующие изменению энтропии в основном и вспомогательных процессах, площади, соответствующие теплоте процесса, изменению внутренней энер-

Таблица 21.2

№ варианта	Заданные параметры* в основных точках				Тип процесса и показатель политропы**			
					1-2	2-3	3-4	4-1
1	$p_1 = 0,8$	$v_1 = 0,12$	$p_2 = 2,0$	$p_3 = 1,2$	$s = c$	$T = c$	$s = c$	$v = c$
2	$p_1 = 1,3$	$T_1 = 573$	$p_2 = 0,5$	$T_3 = 290$	$T = c$	$s = c$	$T = c$	$s = c$
3	$p_1 = 0,2$	$v_1 = 0,45$	$p_2 = 1,2$	$T_3 = 573$	$s = c$	$v = c$	$s = c$	$p = c$
4	$p_1 = 3,5$	$T_1 = 483$	$T_2 = 573$	$p_3 = 2,5$	$p = c$	$n = 1,2$	$p = c$	$v = c$
5	$p_1 = 0,1$	$T_1 = 273$	$p_2 = 0,5$	$T_3 = 473$	$n = 1,3$	$p = c$	$n = 1,3$	$p = c$
6	$p_1 = 0,09$	$T_1 = 303$	$p_2 = 0,4$	$T_3 = 473$	$n = 1,2$	$p = c$	$n = 1,2$	$v = c$
7	$p_1 = 0,16$	$v_1 = 0,5$	$T_2 = 423$	$p_3 = 2,5$	$n = 1,2$	$v = c$	$n = 1,2$	$p = c$
8	$p_1 = 0,18$	$T_1 = 303$	$v_2 = 0,1$	$p_3 = 0,3$	$n = 1,1$	$T = c$	$n = 1,1$	$v = c$
9	$p_1 = 0,3$	$v_1 = 0,3$	$p_2 = 2,0$	$T_3 = 573$	$n = 1,3$	$p = c$	$n = 1,3$	$p = c$
10	$p_1 = 2,0$	$T_1 = 473$	$T_2 = 623$	$v_3 = 0,12$	$p = c$	$s = c$	$v = c$	$s = c$
11	$p_1 = 0,2$	$T_1 = 323$	$p_2 = 2,0$	$T_3 = 473$	$T = c$	$p = c$	$T = c$	$p = c$
12	$p_1 = 0,4$	$T_1 = 373$	$p_2 = 1,6$	$p_3 = 0,6$	$s = c$	$T = c$	$s = c$	$p = c$
13	$p_1 = 0,3$	$T_1 = 300$	$p_2 = 0,8$	$T_3 = 473$	$T = c$	$v = c$	$T = c$	$v = c$
14	$p_1 = 1,2$	$T_1 = 373$	$p_2 = 3,0$	$T_3 = 473$	$T = c$	$p = c$	$T = c$	$p = c$
15	$p_1 = 5,0$	$T_1 = 573$	$p_2 = 1,8$	$v_3 = 0,2$	$T = c$	$s = c$	$v = c$	$s = c$
16	$p_1 = 0,7$	$v_1 = 0,12$	$p_2 = 2,0$	$T_3 = 473$	$s = c$	$p = c$	$s = c$	$T = c$
17	$p_1 = 0,3$	$T_1 = 303$	$p_2 = 0,6$	$T_3 = 523$	$s = c$	$v = c$	$s = c$	$T = c$
18	$p_1 = 0,12$	$v_1 = 0,7$	$v_2 = 0,2$	$T_3 = 423$	$T = c$	$p = c$	$T = c$	$p = c$

№ варианта	Задание параметра* в основных точках	Тип процесса и показатель политропы**			
		1-2	2-3	3-4	4-1
19	$p_1=0,4;$ $v_1=0,3;$ $T_1=573$	$T=c$	$p=c$	$s=c$	$p=c$
20	$p_1=0,7;$ $T_1=473;$ $v_1=0,4$	$p=c$	$T=c$	$v=c$	$s=c$
21	$p_1=0,3;$ $T_1=298;$ $v_1=1,0;$	$s=c$	$p=c$	$T=c$	$p=c$
22	$p_1=0,3;$ $v_1=0,3;$ $T_1=473$	$s=c$	$v=c$	$T=c$	$p=c$
23	$p_1=1,0;$ $T_1=523;$ $v_1=0,6$	$p=c$	$s=c$	$p=c$	$v=c$
24	$p_1=1,2;$ $T_1=423;$ $v_1=0,08;$	$v=c$	$p=c$	$v=c$	$p=c$
25	$v_1=0,12;$ $T_1=323;$ $p_1=2,5;$	$s=c$	$p=c$	$T=c$	$p=c$
26	$p_1=0,12;$ $T_1=283;$ $v_1=0,8;$	$s=c$	$p=c$	$s=c$	$p=c$
27	$p_1=0,08;$ $T_1=293;$ $v_1=0,4;$	$T=c$	$v=c$	$s=c$	$v=c$
28	$p_1=1,2;$ $T_1=323;$ $v_1=6,0;$	$s=c$	$p=c$	$s=c$	$v=c$
29	$p_1=0,1;$ $T_1=338;$ $v_1=273;$	$p=c$	$s=c$	$v=c$	$n=1,3$
30	$p_1=0,3;$ $T_1=293;$ $v_1=1,8;$	$s=c$	$v=c$	$s=c$	$v=c$

* Единица давления — МПа, температуры — К, удельного объема $\text{м}^3/\text{кг}$.

** Типы процессов: $p=c$ — изобарный; $v=c$ — изохорный; $T=c$ — изотермический; $s=c$ — адиабатный (изэнтропный). Для политропных процессов задано значение показателя политропы n .

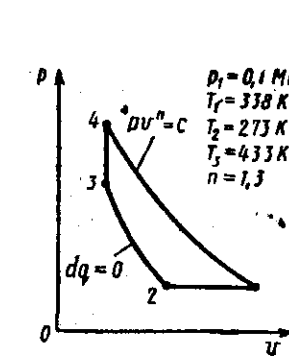


Рис. 21.1

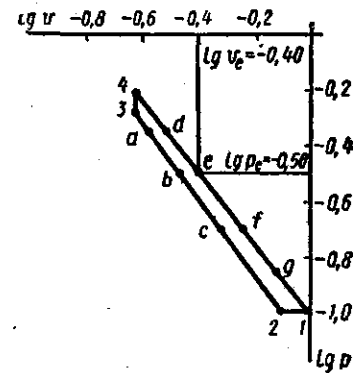


Рис. 21.2

Таблица 21.3

Точка	p , МПа	v , $\text{м}^3/\text{кг}$	T , К
1	0,100	0,970	338
	0,100	0,97	338
2	0,100	0,784	273
	0,100	0,78	273
3	0,519	0,239	433
	0,52	0,24	433
4	0,617	0,239	514
	0,62	0,24	514

гии и энтальпии, и указать числовые значения величин, взяв их с sT -диаграммы.

Методические указания. При расчетах считать воздух идеальным газом, а его свойства не зависящими от температуры.

Принять газовую постоянную равной $0,287 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$, теплоемкость при постоянном давлении равной $1,025 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$, что соответствует свойствам сухого воздуха при 473 К .

Результаты расчета представить в виде таблиц, указав в числителе значения, полученные аналитически, а в знаменателе — графически.

В качестве примера в табл. 21.3, 21.4, 21.5 приведены результаты расчета варианта № 29.

Таблица 21.4

Процессы	n	c_p , кДж/(кг·К)	Δu , кДж/кг	Δi , кДж/кг	Δs , кДж/(кг·К)	q , кДж/кг	l , кДж/кг	l_0 , кДж/кг
1-2	0	1,025	$\frac{-48,0}{-48}$	$\frac{-66,6}{-67}$	$\frac{-0,219}{-0,22}$	$\frac{-66,6}{-67}$	$\frac{-18,6}{-19}$	$\frac{0}{0}$
2-3	1,39	0	$\frac{118,1}{119}$	$\frac{164,0}{166}$	$\frac{0}{0}$	$\frac{0}{0}$	$\frac{-118,1}{-118}$	$\frac{-164}{-166}$
3-4	—	0,738	$\frac{60,0}{61}$	$\frac{83,4}{84}$	$\frac{0,127}{0,128}$	$\frac{60,0}{61}$	$\frac{0}{0}$	$\frac{-23,4}{-24}$
4-1	1,3	-0,219	$\frac{-130}{-132}$	$\frac{-180,8}{-183}$	$\frac{0,092}{0,092}$	$\frac{38,6}{39}$	$\frac{168,7}{172}$	$\frac{219}{224}$
Сумма			$\frac{0}{0}$	$\frac{0}{0}$	$\frac{0}{0}$	$\frac{32,0}{33}$	$\frac{32,0}{35}$	$\frac{32,0}{34}$

Примеры оформления графиков для варианта № 29:
 схема цикла в координатах v, p с указанием заданных значений параметров представлена на рис. 21.1;
 диаграмма цикла в координатах $\lg v, \lg p$ — на рис. 21.2;

Таблица 21.5

Наименование величины	Обозначение	Единица	Значение
Подведенное количество теплоты	q'	кДж/кг	$\frac{98,6}{100}$
Отведенное количество теплоты	q''	кДж/кг	$\frac{66,6}{67}$
Работа цикла	$l_{ц}$	кДж/кг	$\frac{32,0}{33}$
Термический к. п. д.	η_t	—	$\frac{0,324}{0,32}$
Среднее индикаторное давление	p_i	МПа	$\frac{0,0438}{0,045}$

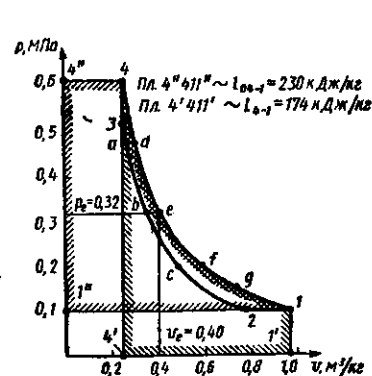


Рис. 21.3

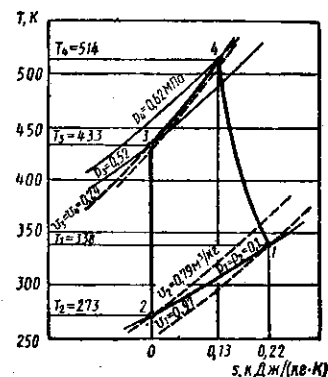


Рис. 21.4

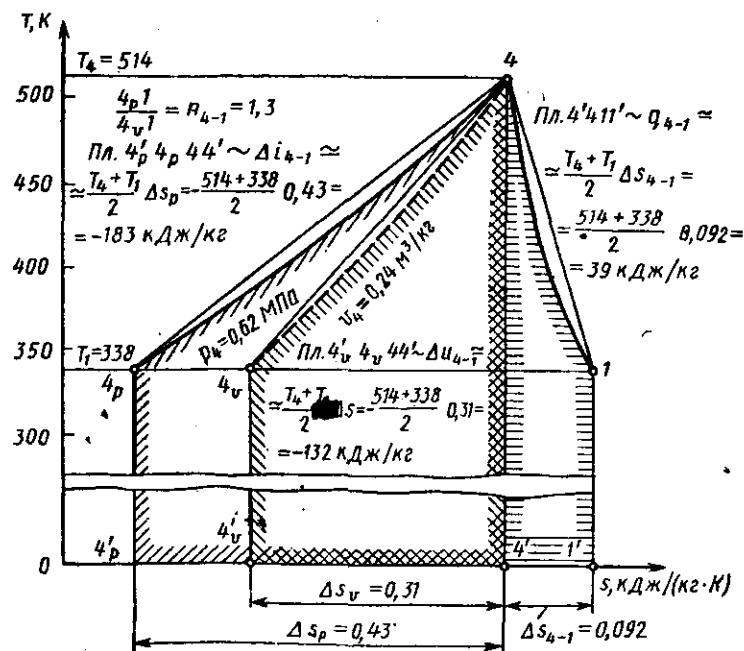


Рис. 21.5

диаграмма цикла в координатах v, p и графическое определение работы и располагаемой работы процесса 4-1 — на рис. 21.3;

диаграмма цикла в координатах sT — на рис. 21.4; схема графического расчета процесса 4-1 по sT -диаграмме — на рис. 21.5.

Задание 3. РАВНОВЕСНЫЙ СОСТАВ ХИМИЧЕСКИ РЕАГИРУЮЩЕЙ ГАЗОВОЙ СМЕСИ

Условия задания. При давлении p (МПа) и температуре T (К), которые для различных вариантов указаны в табл. 21.6, рассматривается газовая смесь, в которой в указанном стрелкой направлении (см. примечание к табл. 21.6) возможна химическая реакция (номер реакции указан в табл. 21.6). Исходный состав смеси в объемных долях указан в столбцах 1...3 табл. 21.6; нумерация столбцов соответствует расположению химических символов в уравнении реакции. Молярные теплоемкости газов удовлетворяют выражениям типа

$$c_p = (\alpha + \beta T + \gamma T^2 + \delta T^{-2}), \text{ кДж/(кмоль} \cdot \text{К)}; T, \text{ К};$$

значения $\alpha, \beta, \gamma, \delta$ и необходимые стандартные величины представлены в табл. 21.7 и табл. 8 Приложения.

Требуется определить:

1) стандартное изменение энтальпии (тепловой эффект, ΔH_{298}°) и свободной энтальпии (химическое сродство, ΔG_{298}°) для заданной реакции;

2) изменение тех же величин и значение константы равновесия K_p для указанных температуры и давления;

3) состав равновесной смеси в массовых и объемных долях; в качестве характеристики степени завершенности реакции использовать величину Z (см. табл. 21.6);

4) газовую постоянную и плотность равновесной смеси;

5) оценить возможность протекания реакции в указанном направлении при стандартных и при указанных условиях;

6) указать направление изменения T и p с целью увеличения степени завершенности реакции.

Методические указания. При выполнении задания рекомендуется использовать учебное пособие [6], а также формулы, представленные в гл. XIV и XVIII [21]. Состав равновесной смеси целесообразно определять на основе соотношения $K_p = (p/\sum n_i)^{\sum \nu_i} \prod n_i^{\nu_i}$, где K_p — константа равнове-

Таблица 21.6

№ варианта	p , МПа	T , К	№ реакции*	Состав			Z^{**}
				1	2	3	
1	40	3000	2	100	—	—	ΔG_{298}°
2	9,1 · 10 ⁻³	2000	3	44	56	—	x_2
3	45	665	4	25	75	—	x_2
4	100	800	5	25	75	—	x_2
5	0,01	1023	6	50	50	—	x_2
6	0,1	700	7	50	50	—	x_2
7	0,1	4990	8	79	21	—	x_2
8	10	1270	9	50	50	—	x_2
9	10	625	10	50	50	—	x_2
10	0,2	3500	11	50	50	—	x_2
11	0,1	1100	12	50	50	—	x_2
12	!	800	13	100	—	—	ΔG_{298}°
13	0,14	870	14	100	—	—	ΔG_{298}°
14	0,014	770	15	100	—	—	ΔG_{298}°
15	0,5	5000	1	20	80	—	ΔG_{298}°
16	0,1	1500	2	100	—	—	x_1
17	3,6 · 10 ⁻³	2500	3	35,2	44,8	8	x_1
18	2000	760	4	50	50	—	x_1
19	50	900	5	25	75	—	x_1
20	10	1667	6	67	33	—	x_1
21	0,1	800	7	6	12	82	x_1
22	50	3490	8	50	50	—	ΔG_{298}°
23	0,1	800	9	50	50	—	ΔG_{298}°
24	3,8 · 10 ⁻³	1500	3	26,7	33,3	16	ΔG_{298}°
25	0,15	4500	16	60	40	—	ΔG_{298}°
26	1	2300	11	75	25	—	ΔG_{298}°
27	0,01	670	13	100	—	—	x_1
28	0,1	670	14	100	—	—	x_1
29	0,1	620	15	100	—	—	x_1
30	0,02	4250	1	50	50	—	x_1

* Перечень химических реакций:

1. $O_2 + mN_2 \rightarrow 2O + mN_2$
2. $2CH_4 \rightarrow C_2H_2 + 3H_2$
3. $4NH_3 + 5O_2 \rightarrow 4NO + 6H_2O$
4. $CO + 2H_2 \rightarrow CH_3OH$
5. $N_2 + 3H_2 \rightarrow 2NH_3$
6. $H_2 + 0,5S_2 \rightarrow H_2S$
7. $SO_2 + 0,5O_2 + mN_2 \rightarrow SO_3 + mN_2$
8. $N_2 + O_2 \rightarrow 2NO$
9. $C_2H_6 + H_2 \rightarrow C_2H_4$
10. $C_2H_6 + H_2O \rightarrow C_2H_5OH$
11. $0,5N_2 + 0,5H_2 + C \rightarrow HCN$
12. $CH_4 + H_2O \rightarrow CO + 3H_2$
13. $2HJ \rightarrow J_2 + H_2$
14. $COCl_2 \rightarrow CO + Cl_2$
15. $2NO_2 \rightarrow 2NO + O_2$
16. $H_2 + mN_2 \rightarrow 2H + mN_2$

** ΔG_{298}° — мера реакции; x_i — степень превращения i -го (по расположению в уравнении реакции) реагента.

Таблица 21.7

Формула	Состояние	α , кДж / (кмоль · К)	$\beta \cdot 10^3$, кДж · К ⁻¹ / кмоль	$\gamma \cdot 10^3$, кДж / (кмоль · К ²)	$\delta \cdot 10^{-2}$, кДж · К / кмоль
CH ₃ OH	г	18,413	101,63	-28,700	0
C ₂ H ₅ OH	г	29,265	166,38	-49,931	0
C ₂ H ₄	г	11,848	119,74	-36,634	0
C ₃ H ₆	г	13,619	188,89	-57,526	0
C ₃ H ₈	г	10,090	239,46	-7,3407	0
CO	г	29,879	6,9710	-0,82061	0
Cl ₂	г	31,717	10,150	-4,04020	0
SO ₂	г	29,793	39,824	-14,699	0
SO ₃	г	25,443	98,544	-40,557	0
C	т	16,874	4,7732	0	-8,541
HCN	г	42,414	8,709	0	-10,426
CO ₂	г	44,257	8,7927	0	-8,6252
COCl ₂	г	59,204	32,365	-13,23	-9,923
J ₂	г	37,432	0,58618	0	-0,71179
HJ	г	14,019	29,774	-10,899	7,0970
H ₂ S	г	32,701	12,394	0	-1,9260
H ₂ O	г	30,565	10,300	0	0
NH ₃	г	29,770	25,120	0	-1,549
H ₂	г	27,299	3,2659	0	0,5024
CH ₄	г	23,657	47,899	0	-1,9260
C ₂ H ₂	г	50,788	16,078	0	-10,3000
NO ₂	г	26,508	45,180	-17,996	-1,419
NO	г	33,898	1,7434	-0,1826	-9,1080
N ₂	г	28,597	5,7683	0	-0,50244
O ₂	г	27,979	4,187	0	1,6748
O	г	21,167	-0,3943	0,1059	0,7961
H	г	20,809	0	0	0
S ₂	г	36,5106	0,66992	0	-3,7683

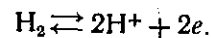
сия; n_i — количество вещества i -го газа в равновесной смеси, кмоль, ν_i — соответствующий стехиометрический коэффициент.

Направление изменения T и p с целью увеличения степени завершенности реакции следует определять с учетом уравнения изобары-изохоры реакции и с учетом знака величины $\sum \nu_i$.

Задание 4. ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ ТОПЛИВНОГО ЭЛЕМЕНТА

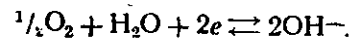
Условия задания. Корпус водородно-кислородного топливного элемента (см. рис. 13.2) разделен двумя пористыми электродами (токосъемниками) на три части. В левую и правую полости поступают под давлением соответственно H_2 и

O_2 . Водород проходит через поры анода и на поверхности соприкосновения анода с раствором электролита ионизируется:

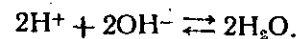


Электроны присоединяются к аноду, а положительные ионы водорода уходят в раствор.

Кислород, проходя через поры катода, захватывает из него электроны и присоединяет к себе из воды раствора атом водорода:



Отрицательные ионы гидроксидов переходят в раствор и соединяются там с положительными ионами водорода, образуя воду:



В результате одновременного протекания реакций на электродах в топливном элементе создается электростатическая разность потенциалов. Если замкнуть электроды проводником, по нему от анода к катоду потечет электрический ток.

Токообразующая реакция может быть записана следующим образом:



Для водородно-кислородного топливного элемента, расходующего при давлении p (МПа) и температуре T (К) 5 кг водорода в сутки, определить:

- 1) электродвижущую силу — E , В;
- 2) мощность — N , кВт;
- 3) термический к.п.д. — η_t ;
- 4) зависимость э. д. с. элемента от температуры $E = E(T)$;
- 5) температурный коэффициент dE/dT , В/К.

Тепловой эффект образования водяного пара при $T = 298$ К принять равным 242 МДж/кмоль. Исходные данные для расчета приведены в табл. 21.8.

Методические указания. Средние молярные теплоемкости H_2 , O_2 и H_2O взять из таблиц Приложения.

Расчет выполняется в следующем порядке:

- 1) по уравнению изотермы реакции определяется максимальная работа токообразующей реакции;
- 2) вычисляется э. д. с. топливного элемента;

Таблица 21.8

№ вари- анта	P , МПа	T , К	K_p^*	№ вари- анта	P , МПа	T , К	K_p^*
1	0,1	400	$1821 \cdot 10^{-23}$	16	0,4	800	$1631 \cdot 10^{-17}$
2	0,1	500	$4118 \cdot 10^{-27}$	17	0,5	500	$4118 \cdot 10^{-27}$
3	0,1	600	$7378 \cdot 10^{-23}$	18	0,5	600	$7378 \cdot 10^{-23}$
4	0,1	700	$8267 \cdot 10^{-20}$	19	0,5	700	$8267 \cdot 10^{-20}$
5	0,2	400	$1821 \cdot 10^{-23}$	20	0,5	800	$1631 \cdot 10^{-17}$
6	0,2	500	$4118 \cdot 10^{-27}$	21	0,6	500	$4118 \cdot 10^{-27}$
7	0,2	600	$7378 \cdot 10^{-23}$	22	0,6	600	$7378 \cdot 10^{-23}$
8	0,2	700	$8267 \cdot 10^{-20}$	23	0,6	700	$8267 \cdot 10^{-20}$
9	0,3	500	$4118 \cdot 10^{-27}$	24	0,6	800	$1631 \cdot 10^{-17}$
10	0,3	600	$7378 \cdot 10^{-23}$	25	0,7	500	$4118 \cdot 10^{-27}$
11	0,3	700	$8267 \cdot 10^{-20}$	26	0,7	600	$7378 \cdot 10^{-23}$
12	0,3	800	$1631 \cdot 10^{-17}$	27	0,7	700	$8267 \cdot 10^{-20}$
13	0,4	500	$4118 \cdot 10^{-27}$	28	0,7	800	$1631 \cdot 10^{-17}$
14	0,4	600	$7378 \cdot 10^{-23}$	29	0,8	500	$4118 \cdot 10^{-27}$
15	0,4	700	$8267 \cdot 10^{-20}$	30	0,8	600	$7378 \cdot 10^{-23}$

$$*K_p = p_{H_2}^{1/2} / p_{H_2O}^{1/2}, \text{ МПа}^{1/2}.$$

3) исходя из заданного значения константы равновесия K_p , определяется количество водорода, прореагировавшее к моменту равновесия;

(4) определяется мощность топливного элемента;

5) вычисляется тепловой эффект реакции при заданной температуре;

6) при заданном значении давления на миллиметровке строится график $E = E(T)$ по четырем точкам. Точки выбрать в диапазоне, составляющем $\pm 25\%$ от заданного значения температуры;

7) для заданного значения температуры вычисляется аналитическим путем температурный коэффициент.

Задание 5. ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ ПРИ СТАЦИОНАРНОМ РЕЖИМЕ

Условия задания. В задании необходимо рассчитать стационарное температурное поле осесимметричной многослойной цилиндрической стенки, в одном или двух слоях которой равномерно распределены внутренние источники теплоты удельной мощностью q_v (рис. 21.6), определить тепловые

потоки при $r = r_2$ и $r = r_3$, а также построить график изменения температуры по толщине стенки.

Геометрические размеры r_1, r_2, r_3, r_4 , теплопроводности материалов $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$, расположение тепловыделяющего слоя, а также параметры, соответствующие граничным условиям: температуры стенок $T_{ст}$, температуры теплоносителей $T_{ж}$, плотности тепловых потоков $q_{ст}$, мощности внутренних источников теплоты q_v , коэффициенты теплоотдачи α приведены в таблицах исходных данных (см. табл. 21.9, 21.10). Индексы «1», «2», «3» при λ и q_v относятся соответственно к 1, 2 и 3-му цилиндрическим слоям.

Методические указания. Для определения температурного поля необходимо составить исходную систему алгебраических уравнений типа

$$t = -\frac{q_v r^2}{4\lambda} + C_1 \ln r + C_2.$$

При этом следует иметь в виду, что это уравнение применимо и в случае отсутствия теплового источника в слое ($q_v = 0$). Полученная система дополняется двумя граничными условиями четвертого рода, предполагающими отсутствие термического сопротивления в месте контакта соприкасающихся слоев при $r = r_2$ и $r = r_3$.

При расчете максимального значения температуры необходимо учесть, что когда теплота отдается окружающей среде как с внутренней, так и с наружной стороны, должен существовать максимум температуры внутри стенки. Изотермическая поверхность, соответствующая максимальной температуре, разделяет многослойную цилиндрическую стенку на две области и максимальное значение температуры соответствует условию $dt/dr = 0$, т. е. $q = 0$.

При графическом построении зависимости $t = f(r)$ рекомендуется проверить наличие этого максимума температуры, а в случае его отсутствия дать объяснение полученному результату. Результаты расчета представить в следующем виде:

Координата, м . . . r_1 $(r_1 + r_2)/2$ r_2 $(r_2 + r_3)/2$ r_3 $(r_3 + r_4)/2$ r_4
 t , °С

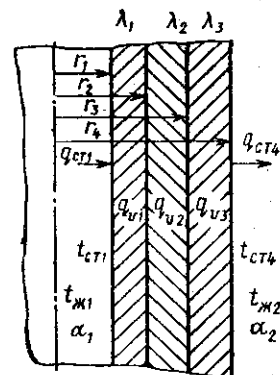


Рис. 21.6

Таблица 21.9

№ вари- анта	$t_{ст1}, ^\circ\text{C}$	$q_{ст1},$ Вт/м	$\alpha_1,$ Вт/(м ² ·К)	$t_{ж1}, ^\circ\text{C}$	$t_{ст4}, ^\circ\text{C}$	$q_{ст4},$ Вт/м	$\alpha_2,$ Вт/(м ² ·К)	$t_{ж2}, ^\circ\text{C}$
1	200	—	—	—	50	—	—	—
2	—	—	50	80	—	—	120	20
3	—	$5 \cdot 10^4$	—	—	50	$5 \cdot 10^3$	—	—
4	200	—	—	—	—	—	—	—
5	200	—	—	—	—	—	50	20
6	—	—	100	80	50	—	—	—
7	—	$5 \cdot 10^4$	—	—	—	—	100	20
8	—	—	100	80	—	$5 \cdot 10^3$	—	—
9	600	—	—	—	200	—	—	—
10	—	—	2000	350	—	—	100	80
11	—	$5 \cdot 10^4$	—	—	200	—	—	—
12	600	—	—	—	—	$5 \cdot 10^4$	—	—
13	600	—	—	—	—	—	127	80
14	—	—	415	250	200	—	—	—
15	—	$36 \cdot 10^4$	—	—	—	—	100	80
16	—	—	2280	20	—	$3 \cdot 10^3$	—	—
17	50	—	—	—	170	—	—	—
18	—	—	100	20	—	—	117	150
19	—	$1,8 \cdot 10^3$	—	—	600	—	—	—
20	50	—	—	—	—	$53,7 \cdot 10^3$	—	—
21	50	—	—	—	—	—	530	100
22	—	—	1000	20	290	—	—	—
23	—	$5 \cdot 10^3$	—	—	—	—	630	50
24	—	—	1000	20	—	$27,5 \cdot 10^3$	—	—
25	200	—	—	—	50	—	—	—
26	—	—	50	80	—	—	120	20
27	—	$5 \cdot 10^4$	—	—	50	—	—	—
28	200	—	—	—	—	$5 \cdot 10^4$	—	—
29	200	—	—	—	—	—	50	20
30	—	—	100	80	50	—	—	—

Таблица 21.10

№ вари- антов	q_{v1}	q_{v2}	q_{v3}	r_1	r_2	r_3	r_4	λ_1	λ_2	λ_3
	МВт/м ³			мм				Вт/(м·К)		
1...8	10	0	0	28	28	38	40	15	3	80
9...16	0	10	0	20	22	30	40	80	15	3
17...24	0	0	10	20	30	32	40	3	80	15
25...30	10	0	10	25	35	40	50	15	3	15

Задание 6. ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ ПРИ НЕСТАЦИОНАРНОМ РЕЖИМЕ (РЕШЕНИЕ ЗАДАЧ АНАЛИТИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ)

Условия задания. Тепловой режим работы конструкции упрощенно рассматривается как односторонний нагрев пластины газом с параметрами теплообмена α и T_c (табл. 21.11) в течение времени τ_k . Начальная температура пластины T_n .

Пластина составлена из двух идеально теплоконтактирующих слоев. Материалы слоев в соответствии с присвоенными им в табл. 21.11 номерами указаны в табл. 21.12. Теплофизические свойства материалов: теплопроводность λ , теплоемкость c и плотность ρ , указаны в Приложении.

Таблица 21.11

№ варианта	№ пунктов в табл. 21.12		$\tau_k, \text{с}$	$\alpha, \text{Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}$	$T_c, \text{К}$	$T_n, \text{К}$	$d, 10^3, \text{м}$
	1-й слой	2-й слой					
1	5	1	830	40	940	220	5
2	6	2	1 600	55	905	230	8
3	3	1	12 800	9,5	820	240	12
4	10	4	9 100	5,0	2070	250	15
5	10	2	11 100	15,4	1710	280	18
6	9	3	1 150	45	785	290	2,5
7	3	2	1 300	12,5	900	300	5
8	9	4	9 800	11,5	820	310	8
9	8	2	3 220	6,2	950	320	12
10	10	3	34 600	22	1600	330	20
11	6	4	23 800	24	890	225	15
12	8	1	19 800	14,2	810	235	25
13	9	2	14 900	4,2	960	245	18
14	5	3	3 980	7,0	940	255	10
15	7	4	710	72	735	265	25
16	9	1	710	13,5	1070	285	5
17	10	2	7 750	28	1660	295	15
18	6	3	21 000	2,5	1010	305	20
19	8	4	5 350	14,5	810	315	8
20	10	1	15 800	12,8	1760	325	18
21	5	2	2 770	28	915	335	12
22	9	3	10 000	4,5	840	345	10
23	3	2	23 000	20	745	330	15
24	3	1	57 600	32	735	315	20
25	7	2	880	18	810	300	5
26	6	3	5 470	12	900	285	12
27	10	4	3 580	80	1620	265	8
28	6	1	4 700	8,5	980	250	18
29	8	2	260	175	790	235	2,5
30	5	3	3 140	4,0	1060	220	10

Таблица 21.12

№ п. п.	Материал	T_{\max}, K
1	Текстолит	520
2	Стеклотекстолит	570
3	Асбестовый картон	720
4	Фторопласт	670
5	Асбест распушенный	870
6	Минеральная вата	870
7	Стекловолокно	720
8	Пеностекло	770
9	Шлак котельный	770
10	Пеношамот	1570

Толщина внутреннего слоя d_2 (из более плотного материала) задается из прочностных и технологических соображений (см. табл. 21.11). Толщина d_1 внешнего обогреваемого газом слоя должна быть выбрана с учетом соответствующего значения $T_{2\max}$ (см. табл. 21.12), т. е. предельно допустимой температуры при длительном воздействии на более плотный материал.

Поля температур в конструкции с требуемой точностью могут быть рассчитаны по формулам*:

$$\theta_i(x, \tau) = [T_i(x, \tau) - T_c] / (T_n - T_c) = \sum_{n=1}^N A_n U_n(x) \exp(-v_n^2 \tau); \quad (21.1)$$

$$i=1 (-d_1 \leq x \leq 0); i=2 (0 \leq x \leq d_2);$$

$$N \in \{1, 2\}, |v_1| < |v_2|;$$

$$Y_n = Y|_{y=v_n}; Y \in \{A, U, \mu_i, \Lambda_i\}; \Lambda_i = v d_i / k_i;$$

$$k_i = \sqrt{(\lambda / c \rho)_i}; \mu_i = \sigma^{i-2} \operatorname{tg} \Lambda_2; \sigma = \sqrt{(\lambda \rho c)_1 / (\lambda \rho c)_2};$$

$$U(x) = \cos(vx/k_i) + \mu_i \sin(vx/k_i);$$

$$A = 2(\sigma E_1 + E_2) / (\sigma D_1 + D_2); \quad (21.2)$$

$$E_i = \sin \Lambda_i - (-1)^i \mu_i (\cos \Lambda_i - 1);$$

$$D_i = (1 + \mu_i^2) \Lambda_i + \sin \Lambda_i [(1 + \mu_i^2) \times \\ \times \cos \Lambda_i + 2\mu_i (-1)^i \sin \Lambda_i].$$

* Петражицкий Г. Б., Миронов Б. М., Пылаев А. М. Методические указания к домашним заданиям по курсу «Теория теплообмена». М., МВТУ, 1981.

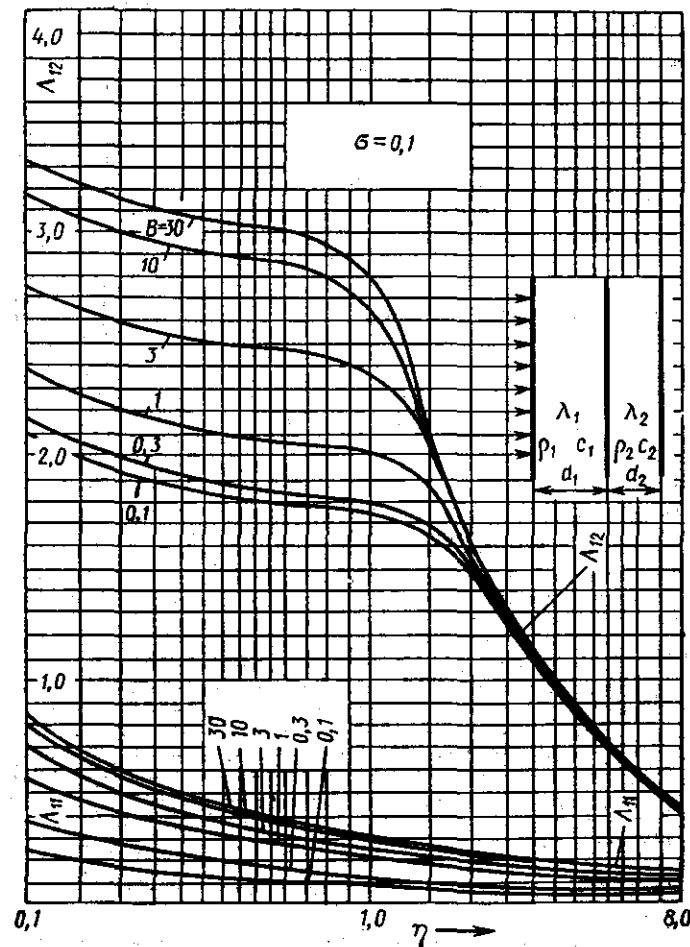


Рис. 21.7

Здесь v_1, v_2 — два первых (по возрастанию модулю) корня уравнения

$$F(\Lambda_1) = \operatorname{tg}(\Lambda_1 \eta) (B \operatorname{tg} \Lambda_1 + \Lambda_1) - \sigma (B - \Lambda_1 \operatorname{tg} \Lambda_1) = 0; \quad (21.3)$$

$$\eta = k_1 d_2 / (k_2 d_1); B = \alpha d_1 / \lambda_1; \Lambda_1 = v d_1 / k_1.$$

Зависимости Λ_{1n} от B, η и σ ($n = 1, 2$) представлены на рис. 21.7... 21.11.

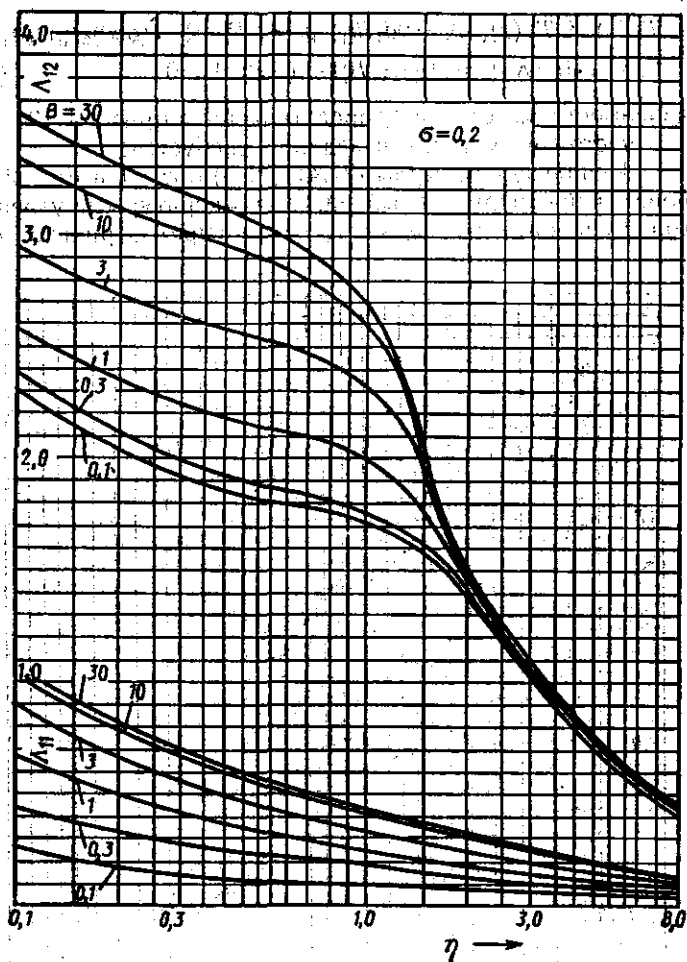


Рис. 21.8

Для ориентировочных расчетов, пренебрегая термосопротивлением внутреннего слоя ($\lambda_2 \rightarrow \infty$), можно использовать формулы:

$$[T_2(\tau) - T_c] / (T_n - T_c) = \sum_{n=1}^N 2 \exp(-v_n^2 \tau) \times \\ \times (\sin \Lambda_n + \mu \cos \Lambda_n) \{ (1 + \mu^2) \Lambda_n + \\ + [(1 - \mu^2) \sin \Lambda_n + 2\mu \cos \Lambda_n] \cos \Lambda_n \}^{-1}; \quad (21.4)$$

$$T_2(\tau) \neq T_2(x); \quad \Lambda = v d_1 / k_1; \quad \mu = \Lambda R; \quad R = (\rho c d)_2 / (\rho c d)_1, \\ f(\Lambda) = \lg [\Lambda + \operatorname{arctg} (\Lambda/B)] - (\Lambda B)^{-1} = 0. \quad (21.5)$$

Зависимости λ_n от B и R представлены на рис. 21.12.

С учетом всех условий задания требуется:

1. Используя формулы (21.4), (21.5) с $N=1$ и рис. 21.12, провести предварительный расчет температуры внутреннего слоя T_2 в момент времени τ_n для четырех вариантов d_1 , в

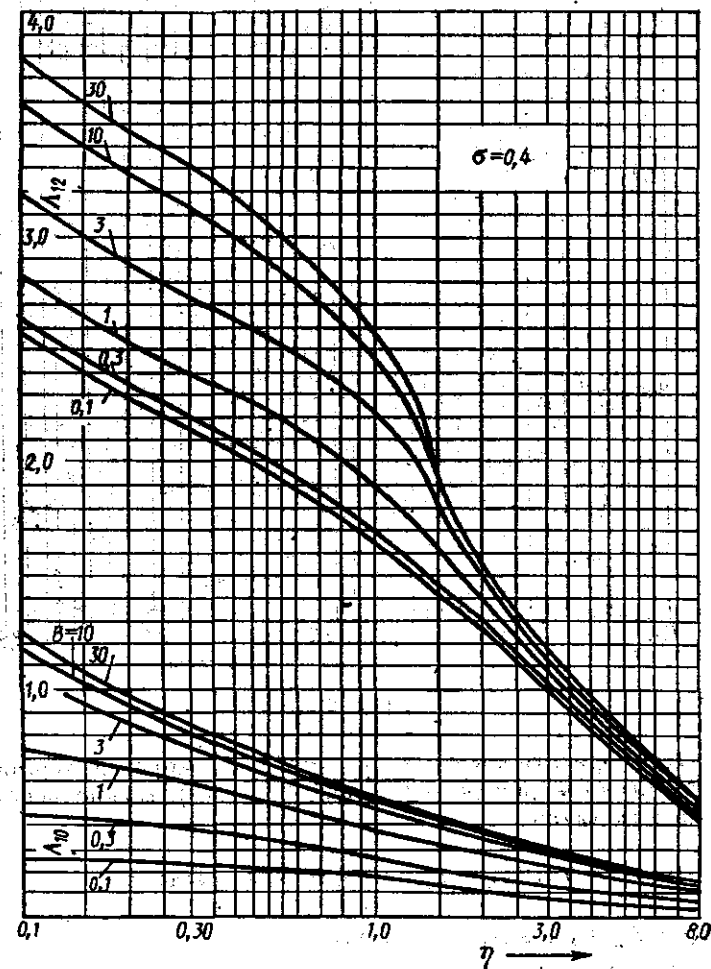


Рис. 21.9

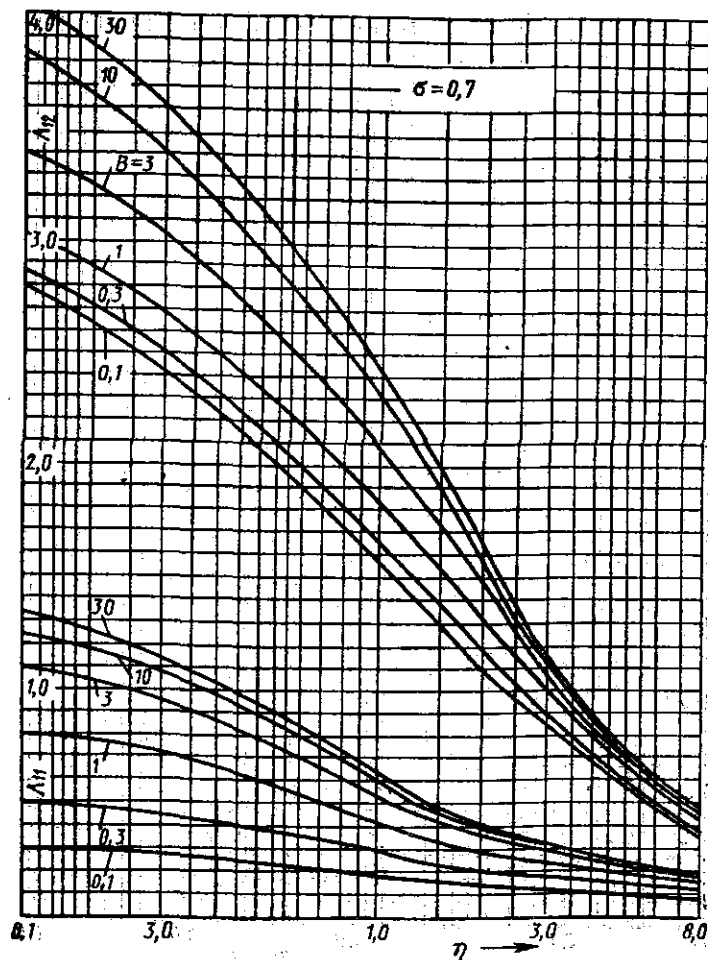


Рис. 21.10

том числе с тремя значениями d_1 , при которых $R = 0,25; 1,0; 10$. Четвертое значение d_1 следует принять таким, чтобы на основе проведенных расчетов указать $d_1^{(1)}$ и $R^{(1)} = (pcd)_\infty / (p_1 c_1 d_1^{(1)})$, обеспечивающие достижение T_{\max} ровно по истечении времени τ_k после начала нагревания. Погрешность $d_1^{(1)}$ — в пределах применимости формул (21.4), (21.5) с $N = 1$ при $\lambda_2 \rightarrow \infty$ и при табличном значении λ_1 — должна быть не более 7%.

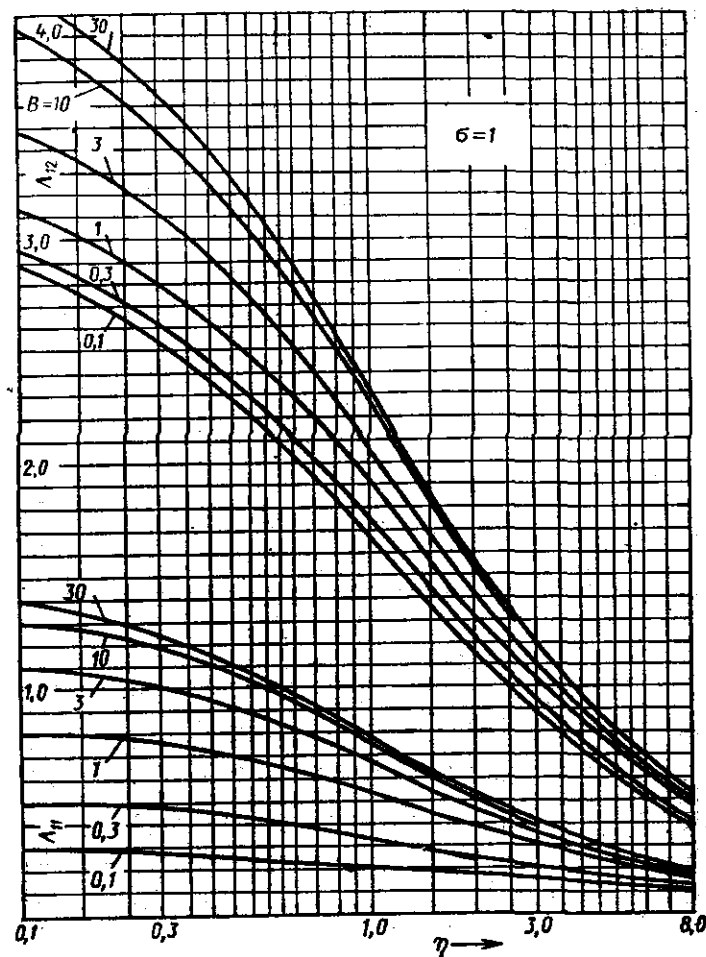


Рис. 21.11

2. Используя формулы (21.1)... (21.3) с $N = 1$ и рис. 21.7... 21.11, вычислить температуру на границах внутреннего слоя (т. е. T_{20} при $x=0$ и T_{2d} при $x=d_2$) в момент времени τ_k для двух вариантов d_1 , а именно при $d_1^{(1)}$ и $d_1^{(2)} = 1,2 d_1^{(1)}$. Применяя интерполяцию и экстраполяцию полученных результатов, определить значение $d_1^{(3)}$, при котором величина $0,5 (T_{20} + T_{2d})$ принимает значение T_{\max} ровно через τ_k после начала процесса.

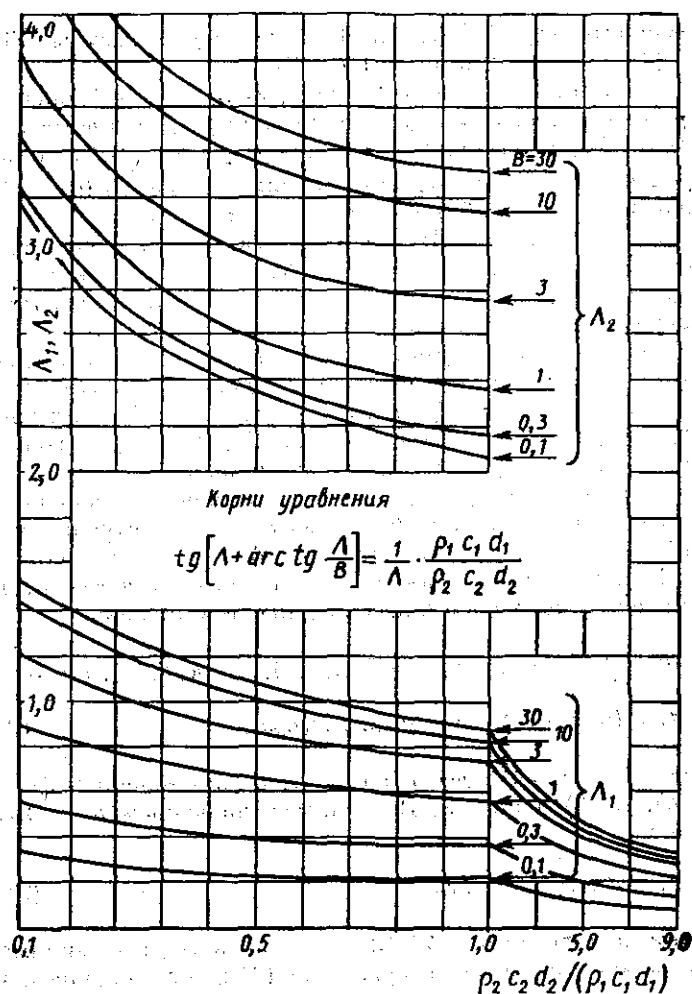


Рис. 21.12

3. По результатам выполнения п. 1, 2 изобразить графически зависимость величин T_2 , T_{20} , T_{2d} от d_1 для момента времени τ_k .

4. Построить в системах координат τ , $\ln \theta$ и τ , T зависимости от времени при $0 \leq \tau \leq \tau_k$ для температуры в сечениях пластины со значениями $x = -d_1$; $-0.7 d_1$; $-0.3 d_1$; 0 ; d_2 . Необходимые при этом расчеты провести с толщиной

внешнего слоя $d_1^{(1)}$ (см. п. 1), используя формулы (21.1)... (21.3) с $N = 2$ и рис. 21.7... 21.11.

5. На основе формул (21.1)... (21.3) с $N = 2$ оценить (в процентах) для момента времени τ_k при $d_1^{(1)}$ отклонение значения T_2 , найденного по формулам (21.4), (21.5), а также среднеобъемных температур обоих слоев \bar{T}_i ($i = 1, 2$) от значений, равных $0.5 (T_{i0} + T_{id})$, где $i = 1, 2$.

Для пластины с $d_1^{(1)}$ оценить также время наступления регулярного теплового режима 1-го рода (τ_p) при заданных условиях теплообмена и при двух значениях допустимой погрешности расчета θ , равных $\varepsilon = 2\%$ и $\varepsilon = 0.1\%$.

Методические указания. 1. В соответствии с номером варианта, выписать все необходимые данные: из табл. 21.11 — значения τ_k , α , T_c , T_n , d_2 , из табл. 21.12 — материалы двухслойной пластины и значение T_{max} , из Приложения — значения λ , c , ρ для заданных материалов.

В дальнейшем все буквенные обозначения величин, относящихся к внешнему (обогреваемому) и внутреннему слоям, отмечаются индексами «1» и «2» соответственно.

2. В первую очередь вычислить значения величин, остающиеся постоянными в рассматриваемых условиях:

$$\Delta = 2(T_n - T_c); k_1 = \sqrt{\lambda_1 / (\rho_1 c_1)}; \kappa = k_1 d_2 / k_2; L = \alpha / \lambda_1;$$

$$C = (\rho c d)_2 / (\rho c)_1; \sigma = \sqrt{(\lambda \rho c)_1 / (\lambda \rho c)_2}. \quad (21.6)$$

3. Приступая далее к расчетам с применением формул (21.4), (21.5) и рис. 21.12, задаться значением $R = 0.25$ и вычислить

$$d_1 = C/R; B = L d_1. \quad (21.7)$$

Затем, используя рис. 21.12, определить Λ_1 , т. е. минимальное по модулю решение уравнения (21.5) при заданном значении R и $B = L d_1$. При этом значение Λ_1 , полученное непосредственно из рис. 21.12 с применением линейной интерполяции по B , естественно рассматривать только в качестве первого приближения к искомому решению уравнения (21.5). Удовлетворительное по точности окончательное решение определяется в соответствии с известным методом Ньютона:

$$\Lambda_1 = \bar{\Lambda}_1 - f(\bar{\Lambda}_1) \{ (1 + \bar{\Lambda}_1^2 / B^2) / B + 1 \} \cos^{-2} [\bar{\Lambda}_1 + \arctg(\bar{\Lambda}_1 / B)] + \bar{\Lambda}_1^{-2} / R \}^{-1}. \quad (21.8)$$

Наконец, найденное по (21.8) значение Λ_1 требуется использовать для расчета температуры T_2 внутреннего слоя пластины (с $R = 0,25$) в момент времени τ_k :

$$T_2(\tau_k) = T_c + \Delta (\operatorname{tg} \Lambda_1 + \mu) \exp(-v_1^2 \tau_k) \times \\ \times [(1 + \mu^2) \Lambda_1 / \cos \Lambda_1 + (1 - \mu^2) \sin \Lambda_1 + 2\mu \cos \Lambda_1]^{-1}. \quad (21.9)$$

4. Действия, предусмотренные в п. 3, необходимо выполнить вновь — сначала при значении $R = 1,0$ а затем и при $R = 10,0$.

5. По результатам расчетов (п. 3, 4) следует построить (сначала по трем точкам) график монотонной зависимости температуры $T_2(\tau_k)$ от толщины d_1 внешнего слоя пластины. Затем с помощью интерполяции или экстраполяции найти ориентировочное значение $\tilde{d}_1^{(1)}$, обеспечивающее равенство $T_2(\tau_k) \approx T_{2\max}$. Далее необходимо еще раз выполнить п.3 — уже при значении $\tilde{R}_1^{(1)}$, соответствующем $\tilde{d}_1^{(1)}$. Результат расчета — точку $\tilde{T}_2(\tau_k)$ следует использовать для уточнения уже построенной графической зависимости. Наконец, при необходимости вновь применяя интерполяцию или экстраполяцию (вблизи значения $\tilde{d}_1^{(1)}$), нужно указать значение $d_1^{(1)}$, выбор которого требуется в п.3 рассматриваемого задания. После этого вычисляются

$$\eta^{(1)} = \kappa / d_1^{(1)}; B^{(1)} = L d_1^{(1)}; d_1^{(2)} = 1,2 d_1^{(1)}; \eta^{(2)} = \kappa / d_1^{(2)}; \\ B^{(2)} = L d_1^{(2)}. \quad (21.10)$$

6. Затем с помощью рис. 21.7... 21.11 нужно найти $v_1^{(2)}$, т. е. минимальное по модулю решение уравнения (21.3) при значениях $\eta^{(2)}$, $B^{(2)}$ по (21.10) и σ по (21.6). При этом сначала с применением линейной интерполяции по η и σ графически определяется значение $\tilde{\Lambda}_1^{(2)}$, рассматриваемое в качестве первого приближения к точному значению $\Lambda_1^{(2)}$, удовлетворяющему (21.3). Требуемое же значение $v_1^{(2)}$ вычисляется по формулам типа:

$$v_1 = \Lambda_{11} d_1 / k_1; \Lambda_{11} = \tilde{\Lambda}_{11} - F(\tilde{\Lambda}_{11}) (\partial F / \partial \Lambda)_{\Lambda = \tilde{\Lambda}_{11}}^{-1}; \\ \partial F / \partial \Lambda = \eta (\Lambda + B \operatorname{tg} \Lambda) \cos^{-2}(\Lambda \eta) + (1 + B \cos^{-2} \Lambda) \times \\ \times \operatorname{tg}(\Lambda \eta) + \sigma (\operatorname{tg} \Lambda + \Lambda \cos^{-2} \Lambda). \quad (21.11)$$

Далее, по полученному значению $v_1^{(2)}$ определяются температуры $T_{20}^{(2)}(\tau_k)$ и $T_{2d}^{(2)}(\tau_k)$ на границах внутреннего слоя пластины, толщина внешнего слоя которой равна $d_1^{(2)}$. При этом необходимо использовать формулы:

$$T_{20}(\tau_k) = T_c + G_1; T_{2d}(\tau_k) = T_c + G_1 (\cos \Lambda_2 + \\ + \mu_2 \sin \Lambda_2) v = v_1; G_n = 0,5 A_n \Delta \exp(-v_n^2 \tau_k); \\ A_n = A|_{v=v_n}; A = 2(\sigma E_1 + E_2) / (\sigma D_1 + D_2); \quad (21.12)$$

$$\Lambda_2 = \Lambda_1 \eta; \mu_i = \sigma^{i-2} \operatorname{tg} \Lambda_2; E_i = \sin \Lambda_i - (-1)^i \mu_i \times \\ \times (\cos \Lambda_i - 1); D_i = (1 + \mu_i^2) \Lambda_i + \sin \Lambda_i [(1 - \mu_i^2) \cos \Lambda_i + \\ + 2\mu_i (-1)^i \sin \Lambda_i]. \quad (21.13)$$

7. Последовательность действий, указанных в п. 6, нужно выполнить также и при значениях $d_1^{(1)}$, $B^{(1)}$, $\eta^{(1)}$. Это приводит к определению $T_{20}^{(1)}(\tau_k)$ и $T_{2d}^{(1)}(\tau_k)$.

8. Полученные в п. 6 и 7 значения $T_{20}^{(l)}$ и $T_{2d}^{(l)}$, ($l = 1, 2$) для момента времени τ_k , а также значения $0,5 (T_{20}^{(l)} + T_{2d}^{(l)})$ для τ_k нужно нанести на ранее построенный график (п.5) и соединить соответствующими прямолинейными отрезками, допуская линейную интерполяцию результатов в интервале $d_1^{(1)} \leq d_1 \leq d_1^{(2)}$.

После этого, заканчивая выполнение п. 2 рассматриваемого задания, несложно графически определить значение $d_1^{(3)}$.

9. При значениях $\eta^{(1)}$, $B^{(1)}$ и σ графически (см. рис. 21.7... 21.11) определить $\Lambda_{1/2}^{(1)}$ и соответствующее значение $v_{1/2}^{(1)}$, т. е. второе по возрастанию модулю решение уравнения (21.3). Полученное значение без его уточнения по формулам типа (21.11) следует использовать для вычисления A_2 по (21.13).

10. При выполнении п. 4 задания рекомендуется использовать зависимость

$$\ln \theta(x, \tau) = -v_1^2 \tau + \ln [A_1 U_1(x)] + W(x, \tau), \quad (21.14)$$

где

$$U_n = \cos(v_n x / k_i) + \mu_i \sin(v_n x / k_i); \\ W(x, \tau) = S(\tau) A_2 U_2(x) / [A_1 U_1(x)]; \\ S(\tau) = \exp[(v_1^2 - v_2^2) \tau].$$

Зависимость (21.14) эквивалентна (21.1) при условии, что $|W(x, \tau)| \ll 1$, и поэтому в рассматриваемых случаях практически справедлива для всех интересующих нас моментов времени.

С учетом (21.14) возможен следующий способ построения зависимости $\ln \theta(x, \tau)$ от τ : выбрав масштаб и начало отсчета для $\ln \theta$, отложить при $\tau=0$ на нормали к оси τ точку, соответствующую $\ln [A_1 U_1(x)]$, и провести через нее прямую, линейный отрезок под углом $\arctg v_1^*$ с отрицательным направлением оси τ ; затем для всех интересующих моментов времени ($\tau_j = j\tau_k/10$; $j = 0, 5, 1; \dots; 10$) из соответствующих точек этого отрезка отложить по нормали к оси τ отрезки, равные соответствующим значениям $W(x, \tau_j)$; соединить полученных точек плавной кривой завершает построение. Такой подход применим для всех сечений, перечисленных в п. 4 задания.

Построение кривых в координатах τ , T следует проводить на основе соотношений типа

$$T(x, \tau_j) = T_c + 0,5\Delta\theta(x, \tau_j) \quad (21.15)$$

с определением величин $\ln \theta(x, \tau_j)$ из уже построенного графика.

11. При выполнении п. 5 данного задания необходимо принять

$$\tau_p = (v_2^2 - v_1^2)^{-1} \max_x |\ln |\varepsilon S(\tau)/[100W(x, \tau)]||;$$

$$\bar{T}_t(\tau) = T_c + \Delta \sum_{n=1}^2 [\sin \Lambda_{in} + \mu_i (-1)^i (1 - \cos \Lambda_{in})] \times \\ \times A_n / (\Lambda_{in}^2). \quad (21.16)$$

Полезно убедиться в том, что формулы (21.16) представляют простые следствия выражений (21.1).

Задание 7. ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ ПРИ НЕСТАЦИОНАРНОМ РЕЖИМЕ (РЕШЕНИЕ ЗАДАЧ ЧИСЛЕННЫМИ МЕТОДАМИ)

Условия задания. На плоскую металлическую стенку толщиной $\delta_m = 1,0$ мм (см. рис. 14.5) нанесен слой теплозащитного покрытия толщиной $\delta = 2,0$ мм. Считая стенку неограниченной, определить распределение температуры по толщине покрытия и температуру металлической стенки на 2, 4, 6, 8 и 10-й секундах после начала нагревания.

Температура стенки и покрытия в начальный момент времени равна 290 К. Температура окружающей среды ($T_{ж1}$) со стороны покрытия изменяется в зависимости от времени по закону $T_{ж1} = (a\tau^n + b)$.

Интенсивность переноса теплоты от окружающей среды к поверхности покрытия определяется коэффициентом теплоотдачи α_1 [Вт/(м²·К)], который линейно изменяется в зависимости от времени $\alpha_1 = (a_1\tau + b_1)$.

Теплоотдачей со стороны стенки пренебречь ($\alpha_2 = 0$). Распределение температур поперек металлической стенки принять однородным ($\alpha_2\delta_m/\lambda_m < 0,1$).

Теплофизические свойства материала стенки: $c_m = 460$ Дж/(кг·К); $\rho_m = 7900$ кг/м³, теплозащитного покрытия: $c = 815$ Дж/(кг·К); $\rho = 770$ кг/м³; $\lambda = 0,116$ Вт/(м·К).

Таблица 21.13

№ варианта	a	b	n	a ₁	b ₁
1	10	525	2,0	48	780
2	15	525	2,0	46	800
3	20	525	2,0	44	820
4	25	525	2,0	42	840
5	30	525	2,0	40	860
6	35	550	2,0	38	880
7	40	550	2,0	36	900
8	45	550	2,0	34	920
9	50	550	2,0	32	940
10	55	550	2,0	30	960
11	30	575	1,0	80	920
12	50	575	1,0	75	900
13	70	575	1,0	70	880
14	100	575	1,0	65	860
15	140	575	1,0	60	840
16	180	600	1,0	55	820
17	220	600	1,0	50	800
18	260	600	1,0	45	780
19	300	600	1,0	40	760
20	350	600	1,0	35	740
21	50	700	0,5	90	800
22	100	700	0,5	80	780
23	150	700	0,5	70	760
24	200	700	0,5	60	740
25	250	650	0,5	50	720
26	300	650	0,5	45	700
27	350	650	0,5	40	680
28	400	600	0,5	35	660
29	450	600	0,5	30	640
30	500	600	0,5	25	620

Необходимые для выполнения задания данные приведены в табл. 21.13.

Методические указания. Для решения задачи методом конечных разностей использовать неявную конечно-разностную схему. Шаг по пространственной координате принять равным $S = \delta/2 = 1,0$ мм, шаг по времени $\Delta t = 1$ с.

Полученное из решения распределение температур в слое теплозащитного покрытия в различные моменты времени представить в виде таблицы:

τ, c	№ узлов		
	1	2	3
2			
4			
6			
8			
10			

По результатам решения в координатах температура — время на миллиметровке построить графики: $T_1 = T_1(\tau)$; $T_2 = T_2(\tau)$; $T_3 = T_3(\tau)$; $T_{ж1} = T_{ж1}(\tau)$; $\alpha_1 = \alpha_1(\tau)$. Пример решения задачи рассмотрен в гл. 14 задачника. Методика решения изложена в учебнике [19].

Задача может быть решена как путем ручного счета, так и на ЭВМ. Программа решения этой задачи на универсальном алгоритмическом языке ФОРТРАН-4 приведена в учебнике [19].

Задание 8. ТЕПЛОПЕРЕДАЧА

Условия задания. По горизонтальному стальному трубопроводу, внутренний и наружный диаметры которого D_1 и D_2 соответственно, движется вода со средней скоростью $w_{ж1}$. Средняя температура воды $t_{ж1}$. Трубопровод изолирован асбестом и охлаждается посредством естественной конвекции сухим воздухом с температурой $t_{ж2}$.

Определить наружный диаметр изоляции, при котором на внешней поверхности изоляции устанавливается температура $t_{ст3}$. Определить линейный коэффициент теплопередачи от воды к воздуху k_l , Вт/(м·К); потери теплоты с 1 м трубопровода q_l , Вт/м, и температуру наружной поверхности стального трубопровода $t_{ст2}$, °С.

Целесообразно ли в рассматриваемом случае применять для тепловой изоляции асбест: т. е. приводит ли асбестовая изоляция к уменьшению теплового потока с поверхности трубопровода?

При решении задачи принять следующие упрощающие предположения:

течение воды в трубопроводе является термически стабилизированным;

между наружной поверхностью стального трубопровода и внутренней поверхностью изоляции существует идеальный тепловой контакт;

считать, что теплопроводность стали $\lambda_1 = 50$ Вт/(м·К) и асбеста $\lambda_2 = 0,106$ Вт/(м·К) не зависит от температуры.

Наружный диаметр изоляции должен быть рассчитан с такой точностью, чтобы температура на наружной поверхности изоляции отличалась от заданной не более чем на 0,1 град.

Необходимые для выполнения задания данные приведены в табл. 21.14.

Методические указания. Средние коэффициенты теплоотдачи от воды к внутренней поверхности трубы можно рассчитывать по следующим формулам:

а) ламинарное течение ($Re_{ж1} \leq 2100$)

$$Nu_{ж1} = 0,15 Re_{ж1}^{1/3} Pr_{ж1}^{0,43} Gr_{ж1}^{0,1} (Pr_{ж1}/Pr_{ст1})^{0,25};$$

б) переходный режим течения ($2100 < Re_{ж1} \leq 10^4$)

$$Nu_{ж1} = 0,116 (Re_{ж1}^{2/3} - 125) Pr_{ж1}^{1/3} (\mu_{ж1}/\mu_{ст1})^{0,14};$$

в) турбулентное течение ($Re_{ж1} > 10^4$)

$$Nu_{ж1} = 0,023 Re_{ж1}^{0,8} Pr_{ж1}^{1/3} (\mu_{ж1}/\mu_{ст1})^{0,14}.$$

Для расчета средних коэффициентов теплоотдачи при свободном движении воздуха около горизонтальных труб может быть использована формула

$$Nu_{ж2} = 0,5 (Gr_{ж2} Pr_{ж2})^{0,25},$$

Для вычисления средних коэффициентов теплоотдачи необходимо знать не известные в начале расчета температуру на внутренней поверхности стального трубопровода и наружный диаметр изоляции.

Целесообразно задачу решать методом последовательных приближений. В качестве начального приближения можно

Таблица 21.14

№ вари- анта	D_1 , мм	D_2 , мм	$\omega_{ж1}$, м/с	$t_{ж1}$, °C	$t_{ж2}$, °C	$t_{ст2}$, °C
1	20	25	0,005	100	20	40
2	20	25	0,010	108	20	40
3	20	25	0,015	116	20	40
4	20	25	0,020	124	20	40
5	25	32	0,025	132	22	44
6	25	32	0,030	140	22	44
7	25	32	0,035	148	22	44
8	25	32	0,040	156	22	44
9	25	32	0,045	164	22	44
10	30	37	0,050	172	24	48
11	30	37	0,055	180	24	48
12	30	37	0,060	188	24	48
13	30	37	0,065	196	24	48
14	30	37	0,070	204	24	48
15	35	42	0,075	212	26	52
16	35	42	0,080	220	26	52
17	35	42	0,085	228	26	52
18	35	42	0,090	220	26	52
19	35	42	0,095	212	26	52
20	40	47	0,100	204	28	48
21	40	47	0,105	196	28	48
22	40	47	0,110	188	28	48
23	40	47	0,115	180	28	48
24	40	47	0,120	172	28	48
25	45	52	0,125	164	30	44
26	45	52	0,130	156	30	44
27	45	52	0,135	148	30	44
28	45	52	0,140	140	30	44
29	45	52	0,145	132	30	44
30	50	57	0,150	124	32	40

принять, что температура на внутренней поверхности стального трубопровода так близка к средней температуре воды, что $t_{ст1} \approx t_{ж1}$, а значение $Gr_{ж1}^{0,5}$, входящее в формулу для вычисления $Nu_{ж1}$ при ламинарном режиме, при такой малой разности $t_{ж1} - t_{ст1}$ можно считать равным единице. Наружный диаметр изоляции в первом приближении можно принять в два раза большим наружного диаметра стального трубопровода.

Итеративный процесс продолжается до тех пор, пока вычисленная температура наружной поверхности изоляции не будет совпадать с требуемой (в пределах заданной точности).

Для определения наружного диаметра изоляции в каждом из последующих приближений можно воспользоваться формулой

$$D_2 = \frac{q_l}{\pi \alpha_2 (t_{ст2} - t_{ж2})}$$

где $t_{ст2}$ — заданная температура наружной поверхности изоляции, °C.

Физические свойства воздуха берутся из таблиц Приложения.

Задание 9. ЛУЧИСТЫЙ ТЕПЛООБМЕН

Условия задания. Шахматный пучок труб теплообменного аппарата находится в среде высокотемпературной газовой смеси.

Известны геометрические характеристики пучка: внешний диаметр труб d и относительные значения шагов по фронту s_1/d и глубине s_2/d расположения труб (рис. 21.13). Длину труб считать неограниченной.

Зная состав смеси в массовых долях g_{CO_2} , g_{H_2O} , ее температуру T_r и давление $p = 0,0881$ МПа, а также среднюю температуру поверхности труб $T_{ст}$ и степень ее черноты $\epsilon_{ст} = 0,82$, определить:

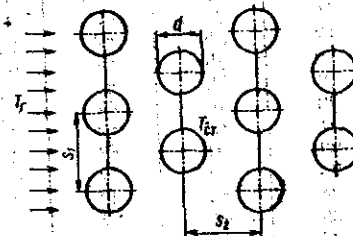


Рис. 21.13

1) лучистый тепловой поток и коэффициент теплоотдачи излучением от газа к поверхности труб;

2) влияние геометрических характеристик s_1/d (для вариантов с 1-го по 15-й) и s_2/d (для вариантов с 16-го по 30-й) на коэффициент теплоотдачи излучением, если их значения изменяются в диапазоне $2,6 \leq s_1/d \leq 2,95$ и $1,7 \leq s_2/d \leq 4,5$.

Необходимые для выполнения задания данные приведены в табл. 21.15.

Методические указания. Задание выполняется по методике, изложенной в учебнике [19]. Для определения эффективной толщины газового слоя l рекомендуется использовать следующую формулу:

$$l = 1,08d \left(\frac{s_1 s_2}{d^2} - 0,785 \right).$$

Таблица 21.15

№ варианта	$T_r, ^\circ\text{C}$	$T_{ст}, ^\circ\text{C}$	$\varepsilon_{\text{CO}_2}, \%$	$\varepsilon_{\text{H}_2\text{O}}, \%$	$d, \text{мм}$	s_1/d	s_2/d
1	1200	1000	6,5	13,5	60	2,85	1,9
2	1190	980	7,0	13,5	62	2,85	1,9
3	1180	960	7,5	13,0	64	2,85	1,9
4	1170	940	8,0	13,0	66	2,8	1,95
5	1160	920	8,5	12,5	68	2,8	1,95
6	1150	900	9,0	12,5	70	2,8	1,95
7	1140	880	9,5	12,0	72	2,95	1,8
8	1130	860	10,0	12,0	74	2,95	1,8
9	1120	840	10,5	11,5	76	2,95	1,8
10	1110	820	11,0	11,5	78	2,9	2,6
11	1000	800	11,5	10,0	80	2,9	2,6
12	990	780	12,0	10,0	82	2,9	2,6
13	980	760	12,5	9,5	84	2,75	3,3
14	970	740	13,0	9,5	86	2,75	3,3
15	960	720	13,5	9,0	88	2,75	3,3
16	950	700	13,0	6,5	82	2,7	4,5
17	940	680	12,5	7,0	80	2,7	4,5
18	930	660	12,0	7,5	78	2,7	4,5
19	920	640	11,5	8,0	76	2,6	3,7
20	910	620	11,0	8,5	74	2,6	3,7
21	800	600	10,5	9,0	72	2,6	3,7
22	790	580	10,0	9,5	70	2,9	2,9
23	780	560	9,5	10,0	68	2,9	2,9
24	760	540	9,0	10,5	66	2,9	2,9
25	750	520	8,5	11,0	64	2,7	4,1
26	740	500	8,0	11,5	62	2,7	4,1
27	730	480	7,5	12,0	60	2,7	4,1
28	720	460	7,0	12,5	58	2,8	1,7
29	710	440	6,5	13,0	56	2,8	1,7
30	700	420	6,0	13,5	54	2,8	1,7

Для оценки влияния геометрических факторов s_1/d или s_2/d на значение коэффициента теплоотдачи излучением расчеты выполняются для четырех различных значений поперечного (s_1) или продольного (s_2) шага, выбранных в указанном диапазоне s_1/d или s_2/d . Результаты проведенного исследования рекомендуется представить в виде графиков $\alpha_n = f(s_1/d)$ или $\alpha_n = f(s_2/d)$.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Таблица 1. Истинная молярная теплоемкость различных газов при $p = \text{const}$ (по данным М. П. Вукаловича, В. А. Кириллина, В. Н. Тимофеева)

$t, ^\circ\text{C}$	$c_p, \text{кДж/(кмоль} \cdot \text{К)}$						
	O_2	N_2 атмосферный	H_2	CO	CO_2	SO_2	H_2O
0	29,278	29,022	28,621	29,127	35,865	38,859	33,503
100	29,881	29,106	29,131	29,265	40,211	42,418	34,060
200	30,819	29,378	29,244	29,650	43,695	45,558	34,968
300	31,836	29,816	29,303	30,258	46,522	48,238	36,040
400	32,762	30,471	29,399	30,978	48,866	50,248	37,196
500	33,553	31,137	29,563	31,711	50,822	51,714	38,411
600	34,206	31,799	29,797	32,406	52,459	52,886	39,667
700	34,751	32,414	30,103	33,030	53,833	53,766	40,956
800	35,207	32,967	30,475	33,578	54,984	54,436	42,255
900	35,588	33,461	30,873	34,060	55,960	55,022	43,519
1000	35,919	33,897	31,288	34,474	56,781	55,441	44,729
1100	36,221	34,278	31,727	34,830	57,480	55,776	45,864
1200	36,493	34,613	32,159	35,144	58,079	56,069	46,919
1300	36,756	34,906	32,594	35,417	58,594	—	47,903
1400	37,004	35,161	33,005	35,651	59,038	—	48,808
1500	37,246	35,387	33,398	35,860	59,499	—	49,645
1600	37,485	35,584	33,767	36,045	59,745	—	50,416
1700	37,720	35,764	34,118	36,208	60,030	—	51,140
1800	37,950	35,923	34,449	36,355	60,277	—	51,789
1900	38,180	36,070	34,767	36,484	60,486	—	52,384
2000	38,411	37,195	35,061	36,602	60,662	—	52,937
2100	38,641	36,313	35,337	36,710	60,935	—	53,456
2200	38,863	36,422	35,609	36,807	60,926	—	53,937
2300	39,085	36,518	35,856	36,899	61,014	—	54,377
2400	39,298	36,631	36,095	36,983	61,069	—	54,787
2500	39,508	36,694	36,321	36,058	61,094	—	55,168

Таблица 2. Средняя молярная теплоемкость различных газов при $p = \text{const}$ (по данным М. П. Вукаловича, В. А. Кириллина, В. Н. Тимофеева)

$t, ^\circ\text{C}$	$c_p, \text{кДж/(кмоль} \cdot \text{К)}$						
	O_2	N_2 атмосферный	H_2	CO	CO_2	SO_2	H_2O
0	29,278	29,022	28,621	29,127	35,865	38,859	33,503
100	29,542	29,052	28,939	29,181	38,117	40,659	33,746
200	29,935	29,135	29,077	29,307	40,065	42,334	34,123
300	30,404	29,290	29,127	29,521	41,760	43,883	34,579
400	30,882	29,504	29,109	29,793	43,255	45,223	35,094

t, °C	иср. кДж/(кмоль·К)							
	O ₂	N ₂ атмос- ферный	H ₂	CO	CO ₂	SO ₂	H ₂ O	Воздух
500	31,338	29,768	29,253	30,103	44,579	46,396	35,634	30,099
600	31,765	30,048	29,320	30,429	45,759	47,359	36,200	30,408
700	32,155	30,346	29,412	30,756	46,819	48,238	36,794	30,727
800	32,506	30,639	29,521	31,074	47,769	48,950	37,397	31,032
900	32,829	30,928	29,650	31,380	48,624	49,620	38,013	31,325
1000	33,122	31,200	29,793	31,669	49,398	50,165	38,624	31,602
1100	33,390	31,459	29,948	31,941	50,106	50,667	39,231	31,866
1200	33,637	31,711	30,111	32,196	50,747	51,086	39,830	32,113
1300	33,867	31,945	30,291	32,431	51,329	—	40,412	32,347
1400	34,081	32,167	30,471	32,657	51,865	—	40,482	32,569
1500	34,286	32,376	30,651	32,862	52,355	—	41,530	32,778
1600	34,479	32,569	30,836	33,055	52,807	—	42,062	32,971
1700	34,663	32,758	31,016	33,235	53,226	—	42,581	33,155
1800	34,839	32,921	31,196	33,407	53,611	—	43,075	33,323
1900	35,010	33,084	31,376	33,566	53,967	—	43,544	33,486
2000	35,174	33,235	31,552	33,712	54,298	—	44,001	33,645
2100	35,333	33,381	31,727	33,855	54,603	—	44,399	33,792
2200	35,488	33,520	31,895	33,984	54,888	—	44,856	33,930
2300	35,638	33,645	32,062	34,110	55,152	—	45,261	34,064
2400	35,789	33,683	32,226	34,227	55,399	—	45,651	34,190
2500	35,932	33,880	32,389	34,340	55,624	—	46,023	34,311

Таблица 3. Термодинамические свойства воздуха
(по данным С. Л. Ривкина)
 $\mu=28,970$

$t, ^\circ\text{C}$	T, K	$\epsilon_{\text{D}},$ $\kappa\text{Дж}/$ $/(\text{кг} \cdot \text{К})$	$\mu_{\text{D}},$ $\kappa\text{Дж}/$ $/(\text{кмоль} \cdot \text{К})$	$\epsilon_{\text{D}},$ $\kappa\text{Дж}/$ $/(\text{кг} \cdot \text{К})$	$\mu_{\text{D}},$ $\kappa\text{Дж}/$ $/(\text{кмоль} \cdot \text{К})$	$k =$ $\epsilon_{\text{D}}/\epsilon_{\text{D}}$
-50	223,15	1,0019	29,023	0,7147	20,708	1,402
0	273,15	1,0032	29,060	0,7159	20,746	1,401
50	323,15	1,0057	29,136	0,7184	20,821	1,399
100	373,15	1,0098	29,257	0,7226	20,942	1,397
200	473,15	1,0241	29,668	0,7369	21,353	1,389
300	573,15	1,0446	30,262	0,7574	21,947	1,379
400	673,15	1,0680	30,940	0,7808	22,625	1,368
500	773,15	1,0919	31,631	0,8047	23,316	1,357
600	873,15	1,1149	32,301	0,8277	23,986	1,347
700	973,15	1,1355	32,908	0,8487	24,593	1,338
800	1073,15	1,1547	33,452	0,8675	25,138	1,331
900	1173,15	1,1706	33,913	0,8834	25,598	1,325
1000	1273,15	1,1844	34,315	0,8972	26,000	1,320
1100	1373,15	1,1970	34,675	0,9098	26,360	1,315
1200	1473,15	1,2079	34,993	0,9207	26,678	1,312
1300	1573,15	1,2179	35,282	0,9307	26,967	1,308
1400	1673,15	1,2267	35,538	0,9395	27,222	1,305
1500	1773,15	1,2347	35,768	0,9475	27,453	1,303

Таблица 4. Термодинамические свойства воздуха (по данным С. Л. Ривкина)

$t, ^\circ\text{C}$	T, K	$f, \text{кДж/кг}$	$u, \text{кДж/кг}$	g_0	v_0	$s, \text{кДж/(кг}\cdot\text{K)}$	$\mu, \text{кДж/кмоль}$	$\mu_0, \text{кДж/кмоль}$	$\mu_0, \text{кДж/кмоль}$
-50	223,15	223,1	159,1	0,4930	13 249	6,4056	6 463	4 608	185,57
0	273,15	273,2	194,8	0,9985	8005	6,6081	7 915	5 644	191,44
50	323,15	323,4	230,7	1,7984	5260	6,7769	9 370	6 682	196,33
100	373,15	373,8	266,7	2,9798	3666	6,9218	10 829	7 726	200,52
150	423,15	424,4	303,0	4,6436	2667	7,0491	12 296	8 778	204,21
200	473,15	475,4	339,6	6,9064	2005	7,1630	13 773	9 839	207,51
250	523,15	526,9	376,7	9,9001	1546,8	7,2664	15 263	10 913	210,51
300	573,15	578,8	414,3	13,778	1217,6	7,3612	16 769	12 003	213,25
350	623,11	631,3	452,5	18,712	974,8	7,4491	18 290	13 109	215,80
400	673,15	684,5	491,2	24,896	791,4	7,5310	19 829	14 232	218,17
450	723,15	738,1	530,6	32,549	650,3	7,6080	21 384	15 371	220,40
500	773,15	792,4	570,5	41,919	539,9	7,6806	22 957	16 529	222,51
600	873,15	902,8	652,2	66,913	382,0	7,8148	26 154	18 895	226,39
650	923,15	958,8	693,9	83,155	325,0	7,8772	27 777	20 101	228,20
700	973,15	1015,3	736,0	102,35	278,30	7,9368	29 414	21 323	229,93
750	1023,15	1072,4	778,7	124,90	239,77	7,9939	31 066	22 559	231,58
800	1073,15	1129,8	821,9	151,21	207,73	8,0488	32 732	23 809	233,17
850	1123,15	1187,8	865,4	181,74	180,89	8,1015	34 410	25 072	234,70
900	1173,15	1246,2	909,5	216,95	158,29	8,1524	36 101	26 347	236,17
925	1198,15	1275,5	931,6	236,46	148,31	8,1771	36 950	26 988	236,89
950	1223,15	1304,9	953,8	257,34	139,12	8,2014	37 802	27 632	237,59

$t, ^\circ\text{C}$	T, K	$\rho, \text{кг/м}^3$	$\mu, \text{кг/м}^2$	$\lambda, \text{кДж/кг}$	$\theta, \text{кДж/кг}$	$S, \text{кДж/(кг}\cdot\text{K)}$	$\mu, \text{кг/м}^2$	$\mu, \text{кДж/кг}$	$\mu, \text{кДж/кг}$
975	1248,15	1334,3	976,1	279,66	130,64	8,2253	38 656	28 278	238,29
1000	1273,15	1363,9	998,5	303,48	122,79	8,2487	39 513	28 927	239,97
1025	1298,15	1393,6	1021,0	328,88	115,53	8,2718	40 372	29 578	239,63
1050	1323,15	1423,3	1043,6	355,93	108,81	8,2945	41 233	30 232	240,29
1075	1348,15	1453,1	1066,2	384,72	102,57	8,3168	42 097	30 888	240,94
1100	1373,15	1483,0	1088,9	415,33	96,77	8,3388	42 963	31 546	241,57
1125	1398,15	1513,0	1111,7	447,83	91,38	8,3604	43 831	32 206	242,20
1150	1423,15	1543,0	1134,6	482,31	86,37	8,3817	44 701	32 868	242,82
1175	1448,15	1573,1	1157,5	518,86	81,69	8,4026	45 573	33 532	243,42
1200	1473,15	1603,3	1180,5	557,58	77,33	8,4233	46 447	34 199	244,02
1225	1498,15	1633,5	1203,5	598,54	73,26	8,4436	47 322	34 866	244,61
1250	1523,15	1663,8	1226,6	641,86	69,46	8,4637	48 200	35 536	245,19
1275	1548,15	1694,1	1249,8	687,63	65,90	8,4835	49 079	36 208	245,76
1300	1573,15	1724,6	1273,1	735,94	62,57	8,5030	49 961	36 881	246,33
1325	1598,15	1755,1	1296,4	786,92	59,44	8,5222	50 844	37 556	246,89
1350	1623,15	1785,6	1319,7	840,65	56,52	8,5412	51 728	38 233	247,43
1375	1648,15	1816,2	1343,2	897,25	53,77	8,5598	52 615	38 911	247,98
1400	1673,15	1846,8	1366,6	956,84	51,18	8,5783	53 503	39 591	248,51
1425	1698,15	1877,5	1390,1	1019,50	48,754	8,5965	54 391	40 272	249,04
1450	1723,15	1908,2	1413,7	1085,4	46,468	8,6145	55 282	40 955	249,56
1475	1748,15	1939,1	1437,3	1154,6	44,315	8,6322	56 175	41 639	250,08
1500	1773,15	1969,9	1461,0	1227,3	42,288	8,6497	57 068	42 325	250,58

Таблица 5. Термодинамические свойства воды и водяного пара. Состояние насыщения (по температурам)

$t, ^\circ\text{C}$	T, K	$p \cdot 10^{-4}, \text{гПа}$	$v' \cdot 10^{-3}, \text{м}^3/\text{кг}$	$v'', \text{м}^3/\text{кг}$	$\rho'', \text{кг/м}^3$	$i', \text{кДж/кг}$	$i'', \text{кДж/кг}$	$h', \text{кДж/кг}$	$h'', \text{кДж/кг}$	$s'', \text{кДж/(кг}\cdot\text{K)}$
0,01	273,16	0,006108	1,0002	206,3	0,004847	0	2501	2501	0	9,1544
5	278,15	0,008190	1,0001	147,2	0,006793	21,05	2510	2489	0,0762	9,0241
10	283,15	0,012777	1,0004	106,42	0,009398	42,04	2519	2477	0,1510	8,8994
15	288,15	0,017041	1,0010	77,97	0,01282	62,97	2528	2465	0,2244	8,7806
20	293,15	0,02337	1,0018	57,84	0,01729	83,90	2537	2454	0,2964	8,6665
25	298,15	0,03166	1,0030	43,40	0,02304	104,81	2547	2442	0,3672	8,5570
30	303,15	0,04241	1,0044	32,93	0,03037	125,71	2556	2430	0,4366	8,4523
35	308,15	0,05622	1,0061	25,24	0,03962	146,60	2565	2418	0,5049	8,3519
40	313,15	0,07375	1,0079	19,55	0,05115	167,50	2574	2406	0,5723	8,2559
45	318,15	0,09584	1,0099	15,28	0,06544	188,40	2582	2394	0,6384	8,1638
50	323,15	0,12335	1,0121	12,04	0,08306	209,3	2592	2383	0,7038	8,0753
55	328,15	0,15740	1,0145	9,578	0,1044	230,2	2600	2370	0,7679	7,9901
60	333,15	0,19917	1,0171	7,678	0,1302	251,1	2609	2358	0,8311	7,9084
65	338,15	0,2501	1,0199	6,201	0,1613	272,1	2617	2345	0,8934	7,8297
70	343,15	0,3117	1,0228	5,045	0,1982	293,0	2626	2333	0,9549	7,7544
75	348,15	0,3855	1,0258	4,133	0,2420	314,0	2635	2321	1,0157	7,6815
80	353,15	0,4736	1,0290	3,408	0,2934	334,9	2643	2308	1,0753	7,6116
85	358,15	0,5781	1,0324	2,828	0,3536	355,9	2651	2295	1,1342	7,5438
90	363,15	0,7011	1,0369	2,361	0,4235	377,0	2659	2282	1,1925	7,4787
95	368,15	0,8451	1,0396	1,982	0,5045	398,0	2668	2270	1,2502	7,4155
100	373,15	1,0132	1,0435	1,673	0,5977	419,1	2676	2257	1,3071	7,3547
105	378,15	1,2079	1,0474	1,419	0,7047	440,2	2683	2243	1,3632	7,2959
110	383,15	1,4326	1,0515	1,210	0,8264	461,3	2691	2230	1,4183	7,2387
115	388,15	1,6905	1,0559	1,036	0,9652	482,5	2698	2216	1,4733	7,1832
120	393,15	1,9854	1,0603	0,8917	1,121	503,7	2706	2202	1,5277	7,1298

$t, ^\circ\text{C}$	T, K	$p \cdot 10^3, \text{ГПа}$	$\nu \cdot 10^8, \text{м}^2/\text{кг}$	$\nu'', \text{м}^2/\text{кг}$	$\rho'', \text{кг}/\text{м}^3$	$i', \text{кДж}/\text{кг}$	$i'', \text{кДж}/\text{кг}$	$\gamma', \text{кДж}/\text{кг}$	$\gamma'', \text{кДж}/^\circ\text{К}$	$\epsilon', \text{кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$	$\epsilon'', \text{кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$
125	398,15	2,3208	1,0649	0,7704	1,298	525,0	2713	2188	1,5814	7,0777	
130	403,15	2,7011	1,0697	0,6683	1,496	546,3	2721	2174	1,6345	7,0272	
135	408,15	3,130	1,0747	0,5820	1,718	507,5	2727	2159	1,6869	6,9781	
140	413,15	3,614	1,0798	0,5087	1,966	589,0	2734	2145	1,7592	6,9304	
145	418,15	4,155	1,0851	0,4461	2,242	610,5	2740	2130	1,7907	6,8839	
150	423,15	4,760	1,0906	0,3926	2,547	632,2	2746	2114	1,8418	6,8383	
155	428,15	5,433	1,0962	0,3466	2,885	653,9	2753	2099	1,8924	6,7940	
160	433,15	6,180	1,1021	0,3068	3,268	675,5	2758	2082	1,9427	6,7508	
165	438,15	7,008	1,1081	0,2725	3,670	697,3	2763	2066	1,9924	6,7081	
170	443,15	7,920	1,1144	0,2426	4,122	719,2	2769	2050	2,0417	6,6666	
175	448,15	8,925	1,1208	0,2166	4,617	741,1	2773	2032	2,0909	6,6256	
180	453,15	10,027	1,1275	0,1939	5,157	763,1	2778	2015	2,1395	6,5858	
185	458,15	11,234	1,1344	0,1739	5,750	785,2	2782	1997	2,1876	6,5465	
190	463,15	12,553	1,1415	0,1564	6,394	807,5	2786	1979	2,2357	6,5074	
195	468,15	13,989	1,1489	0,1409	7,097	829,9	2790	1960	2,2834	6,4694	
200	473,15	15,551	1,1565	0,1272	7,862	852,4	2793	1941	2,3308	6,4318	
205	478,15	17,245	1,1644	0,1151	8,688	875,0	2796	1921	2,3777	6,3945	
210	483,15	19,080	1,1726	0,1043	9,588	897,7	2798	1900	2,4246	6,3577	
215	488,15	21,062	1,1812	0,09465	10,56	920,7	2800	1879	2,4715	6,3212	
220	493,15	23,201	1,1900	0,08606	11,62	943,7	2802	1858	2,5179	6,2849	
225	498,15	25,504	1,1992	0,07837	12,76	966,9	2802	1835	2,5640	6,2488	
230	503,15	27,979	1,2087	0,07147	13,99	990,4	2803	1813	2,6101	6,2133	
235	508,15	30,635	1,2187	0,06527	15,32	1013,9	2804	1790	2,6561	6,1780	
240	513,15	33,480	1,2291	0,05967	16,76	1037,5	2803	1766	2,7021	6,1425	
245	518,15	36,524	1,2399	0,05462	18,30	1061,6	2803	1741	2,7478	6,1073	

$t, ^\circ\text{C}$	T, K	$p \cdot 10^3, \text{ГПа}$	$\nu \cdot 10^8, \text{м}^2/\text{кг}$	$\nu'', \text{м}^2/\text{кг}$	$\rho'', \text{кг}/\text{м}^3$	$i', \text{кДж}/\text{кг}$	$i'', \text{кДж}/\text{кг}$	$\gamma', \text{кДж}/\text{кг}$	$\gamma'', \text{кДж}/(\text{кг} \cdot \text{K})$	$\epsilon', \text{кДж}/(\text{кг} \cdot \text{K})$	$\epsilon'', \text{кДж}/(\text{кг} \cdot \text{K})$
250	523,15	39,776	1,2512	0,05006	19,98	1085,7	2801	1715	2,7934	6,0721	
255	528,15	43,25	1,2631	0,04591	21,78	1110,2	2799	1689	2,8394	6,0366	
260	533,15	46,94	1,2755	0,04215	23,72	1135,1	2796	1661	2,8851	6,0013	
265	538,15	50,87	1,2886	0,03872	25,83	1160,2	2794	1634	2,9307	5,9657	
270	543,15	55,05	1,3023	0,03560	28,09	1185,3	2790	1605	2,9764	5,9297	
275	548,15	59,49	1,3168	0,03274	30,53	1210,7	2785	1574,2	3,0223	5,8938	
280	553,15	64,19	1,3321	0,03013	33,19	1236,9	2780	1542,9	3,0681	5,8573	
285	557,15	69,18	1,3483	0,02774	36,05	1263,1	2773	1510,2	3,1146	5,8205	
290	563,15	74,45	1,3655	0,02554	39,15	1290,0	2766	1476,3	3,1611	5,7827	
295	568,15	80,02	1,3839	0,02351	42,53	1317,2	2758	1441,0	3,2079	5,7443	
300	573,15	85,92	1,4036	0,02164	46,21	1344,9	2749	1404,2	3,2548	5,7049	
305	578,15	92,14	1,425	0,01992	50,20	1373,1	2739	1365,6	3,3026	5,6647	
310	583,15	98,70	1,447	0,01832	54,58	1402,1	2727	1325,2	3,3508	5,6233	
315	588,15	105,61	1,472	0,01683	59,42	1431,7	2714	1282,3	3,3986	5,5802	
320	593,15	112,90	1,499	0,01545	64,72	1462,1	2700	1237,8	3,4495	5,5353	
325	598,15	120,67	1,529	0,01417	70,57	1493,6	2684	1190,3	3,5002	5,4891	
330	603,15	128,65	1,562	0,01297	77,10	1526,1	2666	1139,6	3,5522	5,4412	
335	608,15	137,14	1,599	0,01184	84,46	1559,8	2646	1085,7	3,6056	5,3905	
340	613,15	146,08	1,639	0,01078	92,76	1594,7	2622	1027,0	3,6605	5,3361	
345	618,15	155,48	1,686	0,009771	102,34	1632	2595	963,5	3,7184	5,2769	
350	623,15	165,37	1,741	0,008803	113,6	1671	2565	893,5	3,7786	5,2117	
355	628,15	175,77	1,807	0,007869	127,1	1714	2527	813,0	3,8439	5,1385	
360	633,15	186,74	1,894	0,006943	144,0	1762	2481	719,3	3,9162	5,0530	
365	638,15	198,30	2,020	0,00599	166,8	1817	2421	603,5	4,0009	4,9463	
370	643,15	210,53	2,220	0,00493	203	1893	2331	438,4	4,1137	4,7951	
375	647,15	220,87	2,800	0,00347	288	2032	2147	114,7	4,3258	4,5029	

Таблица 6. Термодинамические свойства воды и водяного пара. Состояние насыщения (по давлениям)

$p \cdot 10^{-3}$, гПа	t , °C	v' , 10^{-3} , м ³ /кг	v'' , м ³ /кг	ρ'' , кг/м ³	r , кДж/кг	r' , кДж/кг	r'' , кДж/кг	r'' , кДж/кг	s' , кДж/(кг·К)	s'' , кДж/(кг·К)
0,010	6,92	1,0001	129,9	0,00770	29,32	2513	2484	0,1054	8,975	8,975
0,025	21,094	1,0021	54,24	0,01843	88,50	2639	2451	0,3124	8,642	8,642
0,050	32,88	1,0053	28,19	0,03547	137,83	2561	2423	0,4761	8,393	8,393
0,075	40,32	1,0080	19,23	0,05198	168,8	2544	2405	0,5754	8,250	8,250
0,10	45,84	1,0103	14,68	0,06812	191,9	2544	2392	0,6492	8,149	8,149
0,15	54,00	1,0140	10,02	0,09980	226,1	2599	2373	0,7550	8,007	8,007
0,20	60,08	1,0171	7,647	0,1308	251,4	2609	2358	0,8321	7,907	7,907
0,25	64,99	1,0199	6,202	0,1612	272,0	2618	2346	0,8934	7,830	7,830
0,30	69,12	1,0222	5,226	0,1913	289,3	2625	2336	0,9441	7,769	7,769
0,40	75,88	1,0264	3,994	0,2504	317,7	2636	2318	1,0261	7,670	7,670
0,60	85,95	1,0330	2,732	0,3661	360,0	2653	2293	1,1433	7,531	7,531
0,80	93,52	1,0385	2,087	0,4792	391,8	2665	2273	1,2330	7,434	7,434
1,00	99,64	1,0432	1,694	0,5903	417,4	2675	2258	1,3026	7,360	7,360
1,5	111,38	1,0527	1,159	0,8627	467,2	2693	2226	1,4336	7,223	7,223
2,0	120,23	1,0605	0,8854	1,129	504,8	2707	2202	1,5302	7,127	7,127
2,5	127,43	1,0672	0,7185	1,392	535,4	2717	2182	1,6071	7,053	7,053
3,0	133,54	1,0733	0,6057	1,651	561,4	2725	2164	1,672	6,992	6,992
3,5	138,88	1,0786	0,5241	1,908	584,5	2732	2148	1,728	6,941	6,941
4,0	143,62	1,0836	0,4624	2,163	604,7	2738	2133	1,777	6,897	6,897
4,5	147,92	1,0883	0,4139	2,416	623,4	2744	2122	1,821	6,857	6,857
5,0	151,84	1,0927	0,3747	2,660	640,1	2749	2109	1,860	6,822	6,822
6,0	158,84	1,1007	0,3156	3,169	670,5	2757	2086	1,931	6,761	6,761
7,0	164,96	1,1081	0,2728	3,666	697,2	2764	2067	1,992	6,709	6,709
8,0	170,42	1,1149	0,2403	4,161	720,9	2769	2048	2,046	6,663	6,663
9,0	175,35	1,1213	0,2149	4,654	742,8	2774	2031	2,094	6,623	6,623

Продолжение табл. 6

$p \cdot 10^{-3}$, гПа	t , °C	v' , 10^{-3} , м ³ /кг	v'' , м ³ /кг	ρ'' , кг/м ³	r , кДж/кг	r' , кДж/кг	r'' , кДж/кг	r'' , кДж/кг	s' , кДж/(кг·К)	s'' , кДж/(кг·К)
10,0	179,88	1,1273	0,1946	5,139	762,7	2778	2015	2,138	6,587	6,587
11,0	184,05	1,1331	0,1775	5,634	781,1	2781	2000	2,179	6,554	6,554
12,0	187,95	1,1385	0,1633	6,124	798,3	2785	1987	2,216	6,523	6,523
13,0	191,60	1,1438	0,1512	6,614	814,5	2787	1973	2,251	6,495	6,495
14,0	195,04	1,1490	0,1408	7,103	830,0	2790	1960	2,284	6,469	6,469
15,0	198,28	1,1539	0,1317	7,593	844,6	2792	1947	2,314	6,445	6,445
16,0	201,36	1,1586	0,1238	8,080	858,3	2793	1935	2,344	6,422	6,422
17,0	204,30	1,1632	0,1167	8,569	871,6	2795	1923	2,371	6,400	6,400
18,0	207,10	1,1678	0,1104	9,058	884,4	2796	1912	2,397	6,379	6,379
19,0	209,78	1,1722	0,1047	9,549	896,6	2798	1901	2,422	6,359	6,359
20,0	212,37	1,1766	0,09958	10,041	908,5	2799	1891	2,447	6,340	6,340
22,0	217,24	1,1851	0,09068	11,03	930,9	2801	1870	2,492	6,305	6,305
24,0	221,77	1,1932	0,08324	12,01	951,8	2802	1850	2,534	6,272	6,272
26,0	226,03	1,2012	0,07688	13,01	971,7	2803	1831	2,573	6,242	6,242
28,0	230,04	1,2088	0,07141	14,00	990,4	2803	1813	2,611	6,213	6,213
30,0	233,83	1,2163	0,06665	15,00	1008,3	2804	1796	2,646	6,186	6,186
32,0	237,44	1,2238	0,06246	16,01	1025,3	2803	1778	2,679	6,161	6,161
34,0	240,88	1,2310	0,05875	17,02	1041,9	2803	1761	2,710	6,137	6,137
36,0	244,16	1,2380	0,05543	18,04	1057,5	2802	1745	2,740	6,113	6,113
38,0	247,31	1,2450	0,05246	19,06	1072,7	2802	1729	2,769	6,091	6,091
40	250,33	1,2520	0,04977	20,09	1087,5	2801	1713	2,796	6,070	6,070
42	253,24	1,2588	0,04732	21,13	1101,7	2800	1698	2,823	6,049	6,049
44	256,05	1,2656	0,04508	22,22	1115,3	2798	1683	2,849	6,029	6,029
46	258,75	1,2724	0,04305	23,33	1128,8	2797	1668	2,874	6,010	6,010
48	261,35	1,2793	0,04118	24,45	1141,8	2796	1654	2,898	5,991	5,991

$p \cdot 10^{-3}$, гПа	t , °C	$v \cdot 10^4$, м³/кг	v'' , м³/кг	ρ'' , кг/м³	i' , кДж/кг	i'' , кДж/кг	i' , кДж/кг	s' , кДж/(кг·К)	s'' , кДж/(кг·К)
50	263,91	1,2857	0,03944	25,35	1154,4	2794	1640	2,921	5,973
55	269,94	1,3021	0,03564	28,06	1184,9	2790	1604,6	2,976	5,930
60	275,56	1,3185	0,03243	30,84	1213,9	2785	1570,8	3,027	5,890
65	280,83	1,3347	0,02973	33,64	1241,3	2779	1537,5	3,076	5,851
70	285,80	1,3510	0,02737	36,54	1267,4	2772	1504,9	3,122	5,814
75	290,50	1,3673	0,02532	39,49	1292,7	2766	1472,8	3,166	5,779
80	294,98	1,3838	0,02352	42,52	1317,0	2758	1441,1	3,208	5,745
85	299,24	1,4005	0,02192	45,62	1340,8	2751	1409,8	3,248	5,711
90	303,32	1,4174	0,02048	48,83	1363,7	2743	1379,3	3,287	5,678
95	307,22	1,4345	0,01919	52,11	1385,9	2734	1348,4	3,324	5,646
100	310,96	1,4521	0,01803	55,46	1407,7	2725	1317,0	3,360	5,615
110	318,04	1,489	0,01598	65,58	1450,2	2705	1255,4	3,430	5,553
120	324,63	1,527	0,01426	70,13	1491,1	2685	1193,5	3,498	5,492
130	330,81	1,567	0,01277	78,30	1531,5	2662	1130,8	3,561	5,432
140	336,63	1,611	0,01149	87,03	1570,8	2638	1066,9	3,623	5,372
150	342,11	1,658	0,01035	96,62	1610	2611	1001,1	3,684	5,310
160	347,32	1,710	0,009318	107,3	1650	2582	932,0	3,746	5,247
170	352,26	1,768	0,008382	119,3	1690	2548	858,3	3,807	5,177
180	356,96	1,837	0,007504	133,2	1732	2510	778,2	3,871	5,107
190	361,44	1,921	0,00668	149,7	1776	2466	690	3,938	5,027
200	365,71	2,040	0,00585	170,9	1827	2410	583	4,015	4,928
210	369,79	2,210	0,00498	200,7	1888	2336	448	4,108	4,803
220	373,7	2,730	0,00357	272,5	2016	2168	152	4,303	4,591

Таблица 7. Вода и перегретый водяной пар

[Единицы физических величин: p , гПа; t , °C; v , м³/кг; i , кДж/кг; s , кДж/(кг·К)]

t	v	i	s	v	i	s	v	i	s
0	0,0010002	0	0,0000	0,0010002	0,0	0,0000	0,0010002	0,0	0,0000
50	150,0	2594	9,238	29,80	2593	8,492	15,00	2592	8,170
100	173,3	2688	9,510	34,43	2688	8,764	17,20	2688	8,442
150	196,5	2783	9,748	39,05	2783	9,002	19,52	2783	8,682
200	219,8	2880	9,963	43,68	2880	9,219	21,83	2879	8,897
250	243,0	2977	10,159	48,30	2977	9,414	24,14	2977	9,094
300	266,2	3077	10,340	52,92	3077	9,595	26,46	3077	9,274
350	289,5	3177	10,507	57,54	3177	9,763	28,76	3177	9,443
400	312,6	3280	10,665	62,16	3280	9,921	31,08	3280	9,601
450	335,8	3384	10,815	66,77	3384	10,071	33,39	3384	9,751
500	359,0	3490	10,958	71,39	3490	10,214	35,70	3490	9,895
550	382,2	3598	11,095	76,01	3598	10,351	38,01	3598	10,031
600	405,6	3707	11,226	80,64	3707	10,482	40,32	3707	10,162
650	428,7	3818	11,349	85,27	3818	10,605	42,63	3818	10,286
700	451,9	3931	11,468	89,88	3931	10,725	44,94	3931	10,405

$p \cdot 10^{-3}$		0,20				0,50				1,0			
		$t_s = 60,08; t'' = 2609;$ $v'' = 7,647; s'' = 7,907$				$t_s = 81,35; t'' = 2645;$ $v'' = 3,239; s'' = 7,593$				$t_s = 99,64; t'' = 2675;$ $v'' = 1,694; s'' = 7,360$			
t	v	i	i	s	v	i	i	s	v	i	i	s	s
0	0,0010002	0	209,3	0,0000	0,0010002	0,1	209,3	0,0000	0,0010001	0,1	209,3	0,0000	
50	0,0010121	209,3	2687	0,7030	0,0010121	209,3	2683	0,7031	0,0010121	209,3	2676	0,7031	
100	8,584	2687	2782	8,120	3,420	2683	2780	7,693	1,695	2676	2776	7,361	
150	9,745	2782	2879	8,361	3,889	2780	2877	7,936	1,937	2776	2875	7,608	
200	10,905	2879	2976	8,576	4,355	2877	2975	8,152	2,172	2875	2974	7,828	
250	12,064	2976	3077	8,773	4,819	2975	3076	8,349	2,405	2974	3074	8,026	
300	13,220	3077	3177	8,954	5,284	3076	3176	8,531	2,638	3074	3175	8,211	
350	14,376	3177	3280	9,123	5,749	3176	3279	8,699	2,871	3175	3278	8,381	
400	15,530	3280	3384	9,281	6,212	3279	3383	8,858	3,102	3278	3382	8,541	
450	16,68	3384	3490	9,431	6,674	3383	3489	9,008	3,334	3382	3488	8,690	
500	17,82	3490	3598	9,575	7,136	3489	3597	9,152	3,565	3488	3596	8,839	
550	18,99	3598	3707	9,713	7,598	3597	3707	9,290	3,797	3596	3706	8,989	
600	20,15	3707	3818	9,842	8,058	3707	3818	9,419	4,028	3706	3817	9,139	
650	21,30	3818	3931	9,966	8,520	3818	3930	9,543	4,270	3817	3929	9,289	
700	22,45	3931		10,085	8,982	3930		9,662	4,491	3929		9,438	

Продолжение табл. 7

$p \cdot 10^{-3}$		2,0				5,0				10,0			
		$t_s = 120,23; t'' = 2707;$ $v'' = 0,8854; s'' = 7,127$				$t_s = 151,84; t'' = 2749;$ $v'' = 0,3747; s'' = 6,822$				$t_s = 179,88; t'' = 2778;$ $v'' = 0,1946; s'' = 6,587$			
t	v	i	i	s	v	i	i	s	v	i	i	s	s
0	0,0010000	0,2	209,4	0,0000	0,0010000	0,6	209,6	0,0000	0,0009996	1,1	210,1	0,0000	
50	0,0010120	209,4	2769	0,7033	0,0010119	209,6	2769	0,7029	0,0010117	210,1	2769	0,7024	
100	0,0010434	419,0	2769	1,3067	0,0010433	419,1	2769	1,3063	0,0010430	419,3	2769	1,3058	
150	0,9603	2769	2870	7,276	0,0010906	632,1	2854	1,840	0,0010902	632,1	2827	1,840	
200	1,080	2870	2970	7,501	0,4249	2854	2958	7,056	0,2060	2827	2940	6,692	
250	1,198	2970	3071	7,702	0,4742	2958	3062	7,264	0,2326	2940	3048	6,920	
300	1,316	3071	3173	7,887	0,5224	3062	3167	7,454	0,2578	3048	3156	7,116	
350	1,433	3173	3276	8,059	0,5700	3167	3272	7,629	0,2822	3156	3263	7,296	
400	1,549	3276	3381	8,219	0,6173	3272	3377	7,791	0,3065	3263	3370	7,461	
450	1,664	3381	3487	8,369	0,6642	3377	3484	7,943	0,3303	3370	3479	7,615	
500	1,781	3487	3595	8,512	0,7109	3484	3592	8,086	0,3539	3479	3588	7,761	
550	1,897	3595	3705	8,648	0,7576	3592	3702	8,223	0,3776	3588	3698	7,898	
600	2,013	3705	3816	8,776	0,8041	3702	3813	8,351	0,4010	3698	3809	8,027	
650	2,130	3816	3928	8,898	0,8507	3813	3925	8,474	0,4246	3809	3923	8,152	
700	2,245	3928		9,018	0,8969	3925		8,594	0,4477	3923		8,272	

$p \cdot 10^{-3}$			20,0			30,0			50,0		
			$t_s = 212,37; t'' = 2799;$ $v'' = 0,09958; s'' = 6,340$			$t_s = 233,83; t'' = 2804;$ $v'' = 0,06665; s'' = 6,186$			$t_s = 263,91; t'' = 2794;$ $v'' = 0,03944; s'' = 5,973$		
t	v	i	i	s	v	i	i	s	v	i	s
0	0,0009991	2,1	0,0000	0,0000	0,0009986	3,1	0,0000	0,0000	0,009976	5,2	0,0004
50	0,0010112	210,9	0,7020	0,7020	0,0010107	211,8	0,7018	0,7018	0,0010098	213,6	0,7005
100	0,0010424	420,1	1,3048	1,3048	0,0010419	420,9	1,3038	1,3038	0,00104108	422,5	1,3020
150	0,0010895	632,8	1,838	1,838	0,0010889	633,4	1,837	1,837	0,0010875	634,7	1,835
200	0,0011561	852,4	2,328	2,328	0,0011551	852,6	2,326	2,326	0,0011530	853,6	2,322
250	0,01114	2900	6,539	6,539	0,07067	2853	6,283	6,283	0,0012492	1085,7	2,789
300	0,1255	3019	6,757	6,757	0,08119	2988	6,530	6,530	0,04539	2920	6,200
350	0,1384	3134	6,949	6,949	0,09051	3111	6,735	6,735	0,05195	3063	6,440
400	0,1511	3246	7,122	7,122	0,09929	3229	6,916	6,916	0,05781	3193	6,640
450	0,1634	3357	7,282	7,282	0,1078	3343	7,080	7,080	0,06332	3315	6,815
500	0,1755	3468	7,429	7,429	0,1161	3456	7,231	7,231	0,06858	3433	6,974
550	0,1875	3578	7,569	7,569	0,1243	3569	7,373	7,373	0,07370	3550	7,120
600	0,1995	3690	7,701	7,701	0,1325	3682	7,506	7,506	0,07870	3666	7,257
650	0,2114	3802	7,827	7,827	0,1405	3796	7,633	7,633	0,08357	3782	7,387
700	0,2232	3917	7,947	7,947	0,1484	3911	7,755	7,755	0,08842	3899	7,510

$p \cdot 10^{-3}$			80,0			100			150		
			$t_s = 294,98; t'' = 2758;$ $v'' = 0,02352; s'' = 5,745$			$t_s = 310,96; t'' = 2725;$ $v'' = 0,01803; s'' = 5,615$			$t_s = 342,11; t'' = 2611;$ $v'' = 0,01035; s'' = 5,310$		
t	v	i	i	s	v	i	i	s	v	i	s
0	0,0009961	8,2	0,004	0,004	0,0009951	10,2	0,0004	0,0004	0,0009927	15,2	0,0008
50	0,0010085	216,2	0,6992	0,6992	0,0010075	218,0	0,6980	0,6980	0,0010054	222,3	0,6955
100	0,0010398	424,9	1,2996	1,2996	0,0010386	426,5	1,2982	1,2982	0,0010363	430,4	1,2944
150	0,0010859	636,6	1,832	1,832	0,0010845	638,0	1,830	1,830	0,0010815	641,3	1,824
200	0,0011504	855,0	2,317	2,317	0,0011482	856,0	2,314	2,314	0,0011439	858,3	2,306
250	0,0012443	1085,7	2,781	2,781	0,0012402	1085,7	2,776	2,776	0,0012330	1086,0	2,765
300	0,02429	2784	5,788	5,788	0,0013970	1342,2	3,244	3,244	0,0013771	1337,0	3,222
350	0,03003	2985	6,126	6,126	0,02247	2920	5,940	5,940	0,01150	2690	5,442
400	0,03438	3135	6,358	6,358	0,02646	3093	6,207	6,207	0,01568	2973	5,878
450	0,03821	3270	6,552	6,552	0,02979	3239	6,416	6,416	0,01947	3155	6,139
500	0,04171	3397	6,722	6,722	0,03281	3372	6,596	6,596	0,02080	3308	6,346
550	0,04516	3520	6,876	6,876	0,03566	3499	6,756	6,756	0,02291	3445	6,521
600	0,04844	3640	7,019	7,019	0,03837	3621	6,901	6,901	0,02490	3576	6,677
650	0,05161	3760	7,152	7,152	0,04097	3744	7,038	7,038	0,02677	3706	6,822
700	0,05475	3881	7,280	7,280	0,04354	3867	7,167	7,167	0,02857	3835	6,956

Таблица 8. Термодинамические свойства некоторых чистых веществ

Соединение	Состояние	s_{298}° , кДж/(кмоль·К)	$\Delta G_{298}^{\circ} \cdot 10^{-3}$, кДж/кмоль	$\Delta H_{298}^{\circ} \cdot 10^{-3}$, кДж/кмоль
CH ₃ OH	г	237,81	-162,02	-201,63
C ₂ H ₅ OH	г	282,19	-168,72	-235,46
C ₂ H ₄	г	219,59	68,169	52,318
C ₃ H ₈	г	267,11	20,427	62,760
C ₃ H ₆	г	270,09	-23,509	-103,91
CO	г	198,03	-137,36	-110,59
Cl ₂	г	223,09	0	0
SO ₂	г	248,69	-300,57	-297,09
SO ₃	г	256,39	-371,61	-395,44
C	т	5,6978	0	0
HCN	г	201,92	120,16	130,62
CO ₂	г	213,78	-394,64	-393,80
COCl ₂	г	289,43	-210,63	-223,15
J ₂	г	260,75	19,384	62,282
HJ	г	206,46	1,2979	25,958
H ₂ S	г	205,78	-32,874	-20,159
H ₂ O	г	188,85	-288,74	-242,02
NH ₃	г	192,63	-16,646	-46,222
H ₂	г	130,67	0	0
CH ₄	г	186,31	-50,827	-74,897
C ₂ H ₂	г	200,95	209,34	226,86
NO ₂	г	240,61	51,874	33,875
NO	г	210,75	86,746	90,434
N ₂	г	191,62	0	0
O ₂	г	205,16	0	0
O	г	160,697	37,704	249,327
H	г	114,693	203,384	218,097
S ₂	г	227,660	0	0

Таблица 9. Значения $\lg K_p$ и константы равновесия K_p для некоторых реакций

T, K	$CH_4 + \frac{1}{2}O_2 \rightleftharpoons CO + 2H_2$		$CH_4 + CO_2 \rightleftharpoons 2CO + 2H_2$		$CH_4 + H_2O \rightleftharpoons CO + 3H_2$		$CH_4 + 2H_2O \rightleftharpoons CO + 4H_2$	
	$\lg K_p$	K_p	$\lg K_p$	K_p	$\lg K_p$	K_p	$\lg K_p$	K_p
298,15	15,149	$1,411 \cdot 10^{15}$	-29,893	$1,278 \cdot 10^{-30}$	-24,897	$1,266 \cdot 10^{-25}$	-19,900	$1,257 \cdot 10^{-20}$
300	15,110	$1,290 \cdot 10^{15}$	-29,629	$2,348 \cdot 10^{-30}$	-24,676	$2,107 \cdot 10^{-25}$	-19,723	$1,891 \cdot 10^{-20}$
400	13,628	$4,253 \cdot 10^{13}$	-18,782	$1,652 \cdot 10^{-19}$	-15,611	$2,447 \cdot 10^{-16}$	-12,440	$3,623 \cdot 10^{-13}$
500	12,826	$6,710 \cdot 10^{12}$	-12,178	$6,823 \cdot 10^{-13}$	-10,058	$8,732 \cdot 10^{-11}$	-7,9390	$1,151 \cdot 10^4$
600	13,336	$2,169 \cdot 10^{12}$	-7,7286	$1,868 \cdot 10^{-8}$	-6,2960	$5,058 \cdot 10^{-7}$	-4,8634	$1,369 \cdot 10^{-5}$
700	12,012	$1,028 \cdot 10^{12}$	-4,5261	$2,978 \cdot 10^{-5}$	-3,5708	$2,687 \cdot 10^{-4}$	-2,6157	$2,423 \cdot 10^{-2}$
800	11,782	$6,660 \cdot 10^{11}$	-2,1123	$7,772 \cdot 10^{-3}$	-1,5058	$3,120 \cdot 10^{-2}$	-0,8996	0,126
900	11,613	$4,108 \cdot 10^{11}$	-0,2271	0,5929	0,1161	1,307	0,4592	2,879
1000	11,485	$3,056 \cdot 10^{11}$	1,2859	19,32	1,4243	26,56	1,5622	36,49
1100	11,378	$2,392 \cdot 10^{11}$	2,5207	$3,316 \cdot 10^2$	2,4960	$3,133 \cdot 10^3$	2,4712	$2,959 \cdot 10^3$
1200	11,291	$1,957 \cdot 10^{11}$	3,5500	$3,548 \cdot 10^3$	3,3931	$2,473 \cdot 10^3$	3,2362	$1,723 \cdot 10^3$
1300	11,218	$1,652 \cdot 10^{11}$	4,4192	$2,626 \cdot 10^4$	4,1546	$1,428 \cdot 10^4$	3,8898	$7,759 \cdot 10^3$
1400	11,153	$1,425 \cdot 10^{11}$	5,1621	$1,452 \cdot 10^5$	4,8063	$6,402 \cdot 10^4$	4,4504	$2,821 \cdot 10^4$
1500	11,097	$1,251 \cdot 10^{11}$	5,8029	$6,352 \cdot 10^5$	5,3718	$2,354 \cdot 10^5$	4,9405	$8,720 \cdot 10^4$

Таблица 10. Физические свойства сухого воздуха
при $p = 1013$ гПа

$t, ^\circ\text{C}$	$\rho \cdot 10^{-3}$ кг/м ³	$c_p \cdot 10^3$ кДж/(кг·К)	$\lambda \cdot 10^3$ Вт/(м·К)	$\mu \cdot 10^4$ Н·с/м ²	$\nu \cdot 10^4$ м ² /с	$\alpha \cdot 10^4$ м ² /с	Pr
-50	1,584	1,013	2,04	14,6	9,23	12,7	0,728
-40	1,515	1,013	2,12	15,2	10,04	13,8	0,728
-30	1,453	1,013	2,20	15,7	10,80	14,9	0,723
-20	1,395	1,009	2,28	16,2	12,79	16,2	0,716
-10	1,342	1,009	2,36	16,7	12,43	17,4	0,712
0	1,293	1,005	2,44	17,2	13,28	18,8	0,707
10	1,247	1,005	2,51	17,6	14,16	20,0	0,705
20	1,205	1,005	2,59	18,1	15,06	21,4	0,703
30	1,165	1,005	2,67	18,6	16,00	22,9	0,701
40	1,128	1,005	2,76	19,1	16,96	24,3	0,699
50	1,093	1,005	2,83	19,6	17,95	25,7	0,698
60	1,060	1,005	2,90	20,1	18,97	27,2	0,696
70	1,029	1,009	2,96	20,6	20,02	28,6	0,694
80	1,000	1,009	3,05	21,1	21,09	30,2	0,692
90	0,972	1,009	3,13	21,5	22,10	31,9	0,690
100	0,946	1,009	3,21	21,9	23,13	33,6	0,688
120	0,898	1,009	3,34	22,8	25,45	36,8	0,686
140	0,854	1,013	3,49	23,7	27,80	40,3	0,684
160	0,815	1,017	3,64	24,5	30,09	43,9	0,682
180	0,779	1,022	3,78	25,3	32,49	47,5	0,681
200	0,746	1,026	3,93	26,0	34,85	51,4	0,680
250	0,674	1,038	4,27	27,4	40,61	61,0	0,677
300	0,615	1,047	4,60	29,7	48,33	71,6	0,674
350	0,566	1,059	4,91	31,4	55,46	81,9	0,676
400	0,524	1,068	5,21	33,0	63,09	93,1	0,678
500	0,456	1,093	5,74	36,2	79,38	115,3	0,687
600	0,404	1,114	6,22	39,1	96,89	138,3	0,699
700	0,362	1,135	6,71	41,8	115,4	163,4	0,706
800	0,329	1,156	7,18	44,3	134,8	188,8	0,713
900	0,301	1,172	7,63	46,7	155,1	216,2	0,717
1000	0,277	1,185	8,07	49,0	177,1	245,9	0,719
1100	0,257	1,197	8,50	51,2	199,3	276,2	0,722
1200	0,239	1,210	9,15	53,5	233,7	316,5	0,724

Таблица 11. Физические свойства водяного пара
на линии насыщения

$t, ^\circ\text{C}$	$p \cdot 10^{-3}$ гПа	$\lambda \cdot 10^3$ Вт/(м·К)	$\mu \cdot 10^4$ Н·с/м ²	$\nu \cdot 10^4$ м ² /с	$\alpha \cdot 10^4$ м ² /с	Pr
100	1,013	2,372	11,97	20,02	18,58	1,08
110	1,43	2,489	12,46	15,07	13,83	1,09
120	1,98	2,593	12,85	11,46	10,50	1,09
130	2,70	2,686	13,24	8,85	7,972	1,11
140	3,61	2,791	13,54	6,89	6,130	1,12
150	4,76	2,884	13,93	5,47	4,728	1,16
160	6,18	3,012	14,32	4,39	3,722	1,18
170	7,92	3,128	14,72	3,57	2,939	1,21

Продолжение табл. 11

$t, ^\circ\text{C}$	$p \cdot 10^{-3}$ гПа	$\lambda \cdot 10^3$ Вт/(м·К)	$\mu \cdot 10^4$ Н·с/м ²	$\nu \cdot 10^4$ м ² /с	$\alpha \cdot 10^4$ м ² /с	Pr
180	10,03	3,268	15,11	2,93	2,339	1,25
190	12,55	3,419	15,60	2,44	1,872	1,30
200	15,55	3,547	15,99	2,03	1,492	1,36
210	19,08	3,722	16,38	1,71	1,214	1,41
220	23,20	3,896	16,87	1,45	0,983	1,47
230	27,98	4,094	17,36	1,24	0,806	1,54
240	33,48	4,291	17,76	1,06	0,658	1,61
250	39,78	4,512	18,25	0,913	0,544	1,68
260	46,94	4,803	18,84	0,794	0,453	1,75
270	55,05	5,106	19,32	0,688	0,378	1,82
280	64,19	5,489	19,91	0,600	0,317	1,90
290	74,45	5,827	20,60	0,526	0,261	2,01
300	85,92	6,268	21,29	0,461	0,216	2,13
310	98,70	6,838	21,98	0,403	0,176	2,29
320	112,90	7,513	22,86	0,353	0,141	2,50
330	128,65	8,257	23,94	0,310	0,108	2,86
340	146,08	9,304	25,21	0,272	0,0811	3,35
350	165,37	10,70	26,58	0,234	0,0580	4,03
360	186,74	12,79	29,14	0,202	0,0396	5,23
370	210,53	17,10	33,75	0,166	0,0150	11,10

Таблица 12. Физические свойства воды на линии насыщения

$t, ^\circ\text{C}$	$p \cdot 10^{-3}$ гПа	$\beta \cdot 10^4$ 1/К	$c_p \cdot 10^3$ кДж/(кг·К)	$\lambda \cdot 10^3$ Вт/(м·К)	$\mu \cdot 10^4$ Н·с/м ²	Pr	$\nu \cdot 10^4$ м ² /кг
0,01	0,0061	—	4,218	55,13	1785,5	13,87	1,0002
10	0,0123	0,7	4,193	57,45	1304,4	9,52	1,0004
20	0,0234	1,82	4,182	59,9	1003,5	7,02	1,0018
30	0,0424	3,21	4,178	61,8	800,7	5,42	1,0044
40	0,0738	3,87	4,179	63,4	652,7	4,31	1,0079
50	0,1234	4,49	4,181	64,8	548,8	3,54	1,0121
60	0,1992	5,11	4,184	65,9	469,4	2,98	1,0171
70	0,3117	5,7	4,189	66,8	405,7	2,55	1,0228
80	0,4736	6,32	4,196	67,5	354,8	2,21	1,0290
90	0,7011	6,95	4,205	68,0	314,6	1,95	1,0359
100	1,0132	7,52	4,217	68,3	282,2	1,75	1,0435
110	1,4326	8,08	4,230	68,5	258,7	1,60	1,0515
120	1,9854	8,64	4,245	68,6	237,6	1,47	1,0603
130	2,7011	9,19	4,264	68,6	217,6	1,36	1,0697
140	3,614	9,72	4,286	68,5	200,9	1,26	1,0798
150	4,760	10,3	4,311	68,4	186,2	1,17	1,0906
160	6,180	10,7	4,340	66,3	173,5	1,10	1,1021
170	7,920	11,3	4,372	67,9	162,7	1,04	1,1144
180	10,027	11,9	4,409	67,5	152,9	1,00	1,1275
190	12,553	12,6	4,451	67,0	144,1	0,96	1,1415
200	15,551	13,3	4,498	66,3	136,2	0,93	1,1565
210	19,080	14,1	4,552	65,5	130,3	0,91	1,1726
220	23,201	14,8	4,614	64,5	124,5	0,89	1,1900

Физические свойства некоторых металлов и сплавов

$t, ^\circ\text{C}$	$\rho \cdot 10^{-3}$ г/см ³	$\beta \cdot 10^4$ 1/К	α , кДж/ /(кг·К)	$\lambda \cdot 10^3$ Вт/(м·К)	$\mu \cdot 10^6$ Н·с/м ²	ρ_f	$\sigma \cdot 10^8$ м ² /кг
230	27,979	15,9	4,686	63,7	119,6	0,88	1,2087
240	33,480	16,8	4,769	62,8	114,7	0,87	1,2291
250	39,776	18,1	4,866	61,8	108,8	0,86	1,2512
260	46,94	19,7	4,981	60,5	105,8	0,87	1,2755
270	55,05	21,6	5,118	59,0	101,9	0,88	1,3023
280	64,19	23,7	5,28	57,5	98,0	0,90	1,3321
290	74,45	26,2	5,49	55,8	94,1	0,93	1,3655
300	85,92	29,2	5,75	54,0	91,1	0,97	1,4036
310	98,70	32,9	6,10	52,3	88,2	1,03	1,447
320	112,90	38,2	6,56	50,6	85,3	1,11	1,499
330	128,65	43,3	7,21	48,4	81,3	1,22	1,562
340	146,08	53,4	8,16	45,7	77,4	1,39	1,639
350	165,37	66,8	9,80	43,0	72,5	1,60	1,741
360	186,74	109	13,98	39,5	66,6	2,35	1,894
370	210,53	264	40,32	33,7	56,8	6,79	2,22

Таблица 13. Физические свойства некоторых твердых тел (элементов) при 0 °С

Наименование элементов	ρ , кг/м ³	λ , Вт/(м·К)	α , кДж/(кг·К)
Алюминий	2700	209	0,896
Ванадий	5900	34,9	0,494
Висмут	9830	9,4	0,121
Вольфрам	19340	169	0,134
Железо	7880	74	0,44
Золото	19310	313	0,130
Калий	870	100	0,737
Литий	534	68,6	3,31
Магний	1760	158	0,975
Медь	8930	390	0,388
Молибден	10200	141	0,252
Натрий	975	109	1,20
Никель	8800	67,5	0,427
Олово	7300	66,3	0,222
Платина	21460	69,8	0,132
Свинец	11850	35,1	0,127
Серебро	10500	419	0,234
Сурьма	6690	18,8	0,205
Титан	4540	15,1	0,581
Углерод, графит	(1700...2300)	174	0,67
Уран	19100	19,2	0,117
Хром	7150	69,8	0,448
Цинк	7150	113	0,384

Таблица 14. Физические свойства некоторых сталей и сплавов при $t = (20...200) ^\circ\text{C}$

Наименование материалов	ρ , кг/м ³	λ , Вт/(м·К)	α , кДж/(кг·К)	$\sigma \cdot 10^8$, м ² /с
Сталь 20	7830	51,0	0,494	1,32
Сталь 45	7830	47,8	0,490	1,25
Нержавеющая сталь 12Х18Н10Т	7860	16,3	0,494	0,42
Магнелиевые сплавы	1780	79,1	0,98	4,53
Алюминиевые сплавы	2800	163	1,13	5,16
Титановые сплавы	4460	8,7	0,524	0,372
Латунь	8500	109	0,392	3,27
Бронза	8800	48,2	0,368	1,49

* Физические свойства конкретного сплава зависят от химического состава и могут отличаться от указанных [11, 20]

Таблица 15. Физические свойства различных технических материалов

Наименование материала	ρ , кг/м ³	t , °С	λ , Вт/(м·К)	α , кДж/(кг·К)
Асбест	500	20	0,106	0,837
Асбестовый картон	1000	20	0,184	0,84
Асбест распушенный	100	20	0,092	0,84
Графитовые изделия	1600	100	158	0,837
Двуокись циркония	5280	100	167	0,586
Железобетон	2200	20	1,55	0,840
Кирпич красный	1800	0	0,77	0,879
Минеральная вата	150	20	0,075	0,92
Оксид алюминия	3740	100	30,2	0,925
Оргстекло	1180	20	0,184	1,43
Пенокерамика	1400	20	1,16	0,84
Пенопласт	200	30	0,058	—
Пеностекло	400	20	0,107	0,84
Пеношамот	600	20	0,132	0,92
Резина твердая обыкновенная	1200	20	0,159	1,382
Слюда	2900	20	0,52	0,879
Стекло обыкновенное	2500	20	0,74	0,670
Стеклобита	200	20	0,0465	—
Стекловолокно	120	20	0,11	0,84
Стеклотекстолит	1650	20	0,459	1,64
Текстолит	1350	20	0,293	1,47
Фторопласт-4	2150	20	0,247	1,05
Фибра	1200	60	0,48	—
Шлак котельный	700	20	0,186	0,75
Эбонит	1200	20	0,165	—

Таблица 16. Степень черноты полного нормального излучения для различных материалов

Наименование материалов	$t, ^\circ\text{C}$	ε
Алюминий полированный	50...500	0,04...0,06
Алюминий с шероховатой поверхностью	20...50	0,06...0,07
Бронза полированная	50	0,1
Бронза пористая шероховатая	50...150	0,55
Вольфрам	200	0,05
»	600...1000	0,1...0,16
»	1500...2200	0,24...0,31
Железо оцинкованное листовое блестящее	30	0,23
Жесть белая старая	20	0,28
Золото, тщательно полированное	200...600	0,02...0,03
Латунь полированная	200	0,03
Латунь листовая прокатная	20	0,06
Медь полированная	50...100	0,02
Медь окисленная	500	0,88
Молибден	1500...2200	0,19...0,26
Молибденовая нить	700...2500	0,1...0,3
Никелевая проволока	200...1000	0,1...0,2
Нихромовая проволока чистая	50	0,65
Платиновая проволока	50...200	0,06...0,07
То же	1400	0,18
Ртуть чистая	0,100	0,09...0,12
Серебро чистое полированное	200...600	0,02...0,03
Сталь листовая шлифованная	950...1100	0,55...0,61
Стальное литье полированное	750...1050	0,52...0,56
Сталь с плоской шероховатой поверхностью	50	0,56
Хром полированный	50...1000	0,28...0,38
Цинк листовой	50	0,2
Чугунное литье	50	0,81
Асбестовый картон	20	0,96
Вода (слой толщиной 0,1 мм и более)	50	0,95
Смооченная металлическая поверхность	20	0,98
Кирпич красный шероховатый	20	0,88...0,93
Лак черный матовый	40...100	0,96...0,98
Лак белый	40...100	0,8...0,95
Резина мягкая серая шероховатая	20	0,86
Сажа с жидким стеклом	20...200	0,96
Сажа, нанесенная на твердую поверхность	50...1000	0,96
Снег	—	0,96
Стекло	250...1000	0,87...0,72
»	1100...1500	0,7...0,67
Угольная нить	1000...1400	0,53

Продолжение табл. 16

Наименование материалов	$t, ^\circ\text{C}$	ε
Шеллак черно-матовый	75...150	0,91
Шлаки котельные	0...100	0,97...0,93
То же	200...500	0,89...0,78
»	600...1200	0,76...0,70
»	1400...1800	0,69...0,67
Эмаль белая	20	0,9

К главе 1

1.2. $1,021 \text{ ат} = 0,988 \text{ атм} = 10211,4 \text{ мм вод. ст.} = 10211,4 \text{ кгс/м}^2 = 1,0014 \text{ бар}$. 1.3. $p_{\text{max}} = 0,078 \text{ МПа}$; $p_{\text{min}} = 294 \text{ мм рт. ст.}$; $p_{\text{ср}} = 0,58 \text{ атм} = 0,59 \text{ бар}$. 1.4. $112,3 \text{ кПа}$. 1.5. $0,983 \cdot 10^5 \text{ Па}$. 1.6. $1,81$. 1.7. $0,18 \text{ МПа}$. 1.8. $0,252 \text{ МПа}$. 1.9. $5,82 \text{ кПа}$. 1.10. Разрежение $95,8\%$. 1.11. $1,01 \cdot 10^5 \text{ Па}$; $19,6 \cdot 10^5 \text{ Па}$; $0,157 \cdot 10^5 \text{ Па}$. 1.13. 23 632 Па . 1.14. $39,9 \cdot 10^5 \text{ Па}$. 1.16. $3,61 \text{ кг}$; 41 кг/м^3 . 1.17. 2940 с . 1.18. 298 К . 1.19. $11,9 \text{ кг}$. 1.20. $1,97 \text{ кг/м}^3$. 1.21. $161,7 \text{ К}$; азот (N_2). 1.22. $1,21 \text{ кг/м}^3$. 1.23. $33,51 \text{ с}^{-1}$. 1.24. $0,172 \cdot 10^5 \text{ Па}$. 1.26. $0,22 \text{ м}^3/\text{с}$. 1.27. $47,235 \text{ кН}$. 1.28. 4 баллона; $p = 6,171 \text{ МПа}$. 1.29. $x = 0,84 \text{ м}$, $T = 495$ или 305 К .

К главе 2

2.1. 298 кДж . 2.2. $c_p = 0,913 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{К)}$; $c_v = 1,679 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{К)}$. 2.3. $\mu_{\text{ср}} = 29,064 \text{ кДж/(кмоль} \cdot \text{К)}$; $c_p = 10,375 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{К)}$; $c_v = 14,532 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{К)}$; $c_p = 0,926 \text{ кДж/(м}^3 \cdot \text{К)}$; $c_v = 1,897 \text{ кДж/(м}^3 \cdot \text{К)}$. 2.4. $c_p = 1,5095$ и $1,512 \text{ кДж/(кмоль} \cdot \text{К)}$. 2.5. 12 124 кДж . 2.8. а) $538,5 \text{ кДж}$; б) $577,5 \text{ кДж}$. 2.9. $t_2 = -38^\circ \text{C}$; $p_2 = 10,64 \text{ кг/м}^3$. $\Delta I = -3498 \text{ кДж}$. 2.10. а) $\Delta U = 39 \text{ 633 кДж}$; $\Delta I = 55,378 \text{ кДж}$; б) $\Delta U = 39 \text{ 788 кДж}$; $\Delta I = 55 \text{ 370 кДж}$. 2.13. $g_{\text{O}_2} = 0,234$; $g_{\text{N}_2} = 0,76$; $g_{\text{H}_2\text{O}} = 0,006$; $R = 0,289 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{К)}$; $\rho^* = 1,283 \text{ кг/м}^3$. 2.14. $\rho_{\text{N}_2} = 0,242 \text{ кг/м}^3$; $\rho_{\text{O}_2} = 0,9 \text{ кг/м}^3$; $\rho_{\text{H}_2\text{O}} = 0,011 \text{ кг/м}^3$. 2.15. $\mu_{\text{ср}} = 30,4 \text{ кг/кмоль}$; $R = 0,273 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{К)}$; $v = 2,66 \text{ м}^3/\text{кг}$; $p_{\text{CO}_2} = 12,4 \text{ кПа}$; $p_{\text{O}_2} = 7,6 \text{ кПа}$; $p_{\text{N}_2} = 75 \text{ кПа}$. 2.16. $50,9 \text{ кг}$; $1,02 \text{ см/мин}$. 2.17. $G = 8,82 \text{ кг}$; $\rho_{\text{ср}} = 96,67 \text{ кг/м}^3$; $\rho_{\text{CH}_4} = 47,66 \text{ кг/м}^3$; $\rho_{\text{C}_2\text{H}_6} = 5,80 \text{ кг/м}^3$; $\rho_{\text{C}_3\text{H}_8} = 5,12 \text{ кг/м}^3$; $\rho_{\text{C}_4\text{H}_{10}} = 12,57 \text{ кг/м}^3$; $\rho_{\text{C}_5\text{H}_{12}} = 6,48 \text{ кг/м}^3$; $\rho_{\text{CO}_2} = 19,04 \text{ кг/м}^3$. 2.18. $R = 1,434 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{К)}$; $\mu_{\text{ср}} = 5,838 \text{ кг/кмоль}$; $\rho^* = 0,261 \text{ кг/м}^3$; $\rho = 0,106 \text{ кг/м}^3$. 2.19. $V_{\text{H}_2\text{O}} = 1,9025 \text{ м}^3$; $V_{\text{CO}_2} = 0,0217 \text{ м}^3$; $V_{\text{SO}_2} = 0,0748 \text{ м}^3$. 2.20. $p_{\text{H}_2\text{O}} = 903 \text{ МПа}$; $p_{\text{CO}_2} = 0,0022 \text{ МПа}$; $p_{\text{SO}_2} = 0,0075 \text{ МПа}$. 2.21. $R = 0,204 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{К)}$; $\rho^* = 1,82 \text{ кг/м}^3$. 2.22. $\mu_{\text{ср}} = 36,51 \text{ кДж/(кмоль} \cdot \text{К)}$; $\mu_{\text{св}} = 28,20 \text{ кДж/(кмоль} \cdot \text{К)}$; $c_p = 1,155 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{К)}$; $c_v = 0,882 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{К)}$. 2.23. 181 кДж/кг . 2.24. $\mu_{\text{ср}} = 40,1 \text{ кДж/(кмоль} \cdot \text{К)}$; $c_p = 0,979 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{К)}$; $c_v = 0,726 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{К)}$. 2.25. а) 52 390 кДж ; б) 52 697 кДж . 2.26. $\Delta I = 147,83 \text{ МДж}$; $V_{\text{N}_2} = 93,27 \text{ м}^3$; $V_{\text{O}_2} = 46,63 \text{ м}^3$; $V_{\text{CO}_2} = 139,90 \text{ м}^3$. 2.28. $\Delta u = 240 \text{ кДж/кг}$; $\Delta i = 308 \text{ кДж/кг}$. 2.30. $\Delta I = -263 \text{ 145 кДж/ч}$; $\rho = 0,53 \text{ кг/м}^3$; $c_p = 1,14 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{К)}$.

К главе 3.

3.1. —420,3 кДж; 0,685 МПа. 3.3. $p = 0,207$ МПа; $Q = 240$ кДж; $\Delta I = 288,5$ кДж. 3.4. 250 К. 3.5. 1,4 МПа; —262,2 кДж. 3.6. $\Delta t = 0,202$ кг; $p_{2, \text{нб}} = 12,86$ МПа. 3.8. $x = 17$ мм; $l = 80$ кДж/кг; 3.9. 0,175 кг/с. 3.10. 0,347 кг/с. 3.12. T_2 увеличится от 1084 до 1992 К; p_2 увеличится от 6,73 до 12,385 МПа; v_2/v_1 уменьшится от 2,2 до 1,32. 3.13. 6,448 МПа; 0,0859 м³. 3.14. $p = 15$ МПа; $\rho = 8,6$ кг/м³; $Q = 53,2$ кВт. 3.16. 297 К; $Q = L = 15,46$ кДж. 3.17. $l_{1,2} = q_{1,2} = -200,2$ кДж/кг; $l_{2,3} = 783$ кДж/кг; $q_{2,3} = 2740$ кДж/кг; $l_{3,1} = 0$; $q_{3,1} = -1936$ кДж/кг. 3.18. 73,2 кДж; 0,08 МПа; 557 К. 3.19. 0,166 м³/кг; 463 К; —147 кДж/кг. 3.20. $\Delta u = 298,2$ кДж/кг; $\Delta i = 422,1$ кДж/кг; $l = -298,2$ кДж/кг; $l_0 = -422,1$ кДж/кг. 3.22. 505 К; —82,5 кДж/с; 114 кВт. 3.23. 6,78 кг/с; 10 165 кВт. 3.24. 55,1 м/с; 2,08 м. 3.25. 523 К; 3,39 МВт. 3.27. $v = 10,96$; $p_2 = 2,93$ МПа; $l_{1,2} = 147,5$ кДж/кг; $p_3 = 3,72$ МПа. 3.29. l_2 — политропа, $l_{1,2} < 0$; 2-3 — изобара, $l_{2,3} > 0$; 3-4 — изотерма, $l_{3,4} < 0$. 3.30. При $n = 1,7$ температура повышается, при $n = 0,7$ — понижается; при $p_2/p_1 = 5$ $T_2/T_1 = 2$. 3.31. $n = 1,16$; $Q = -2278$ кДж; $c = 1,11$ кДж/(кг·К); $\Delta U = 1458$ кДж; $L = -3737$ кДж. 3.32. $n = 1,21$; $q = -79$ кДж/кг; $\Delta u = 83$ кДж/кг; $\Delta i = 117,6$ кДж/кг; $l = -162$ кДж/кг; $l_0 = -196$ кДж/кг, $\Delta s = -0,24$ кДж/кг. 3.33. $c = 0,359$ кДж/(кг·К). Дальнейшее нагревание должно проходить при постоянном объеме. 3.35. 15,5%. 3.36. 297,3 МДж/ч. 3.37. 1013 К; 0,84 кДж/(кг·К). 3.41. 6,09 МПа; —251 кДж/кг. 3.43. $Q = 8373$ кДж/с; $\Delta u = 137,3$ кДж/кг. 3.44. 2103 К. 3.46. $Q = -200$ кДж (теплота отдается); $T_2 = 455$ К; $c = -0,44$ кДж/(кг·К); $n = 1,22$. 3.47. 501 К. 3.48. $\Delta U = 8,3$ кДж; $\Delta I = 10,4$ кДж; $Q = -1,7$ кДж; $c = -0,155$ кДж/(кг·К). 3.49. а) 1453 К; б) 1360 К.

3.51. $14,55 \ln T - 0,733 \cdot 10^{-3} T + 0,576 \cdot 10^{-6} T^2 = 4,125 \ln p + \ln(\text{const})$, или

$T^{14,55} e^{(-0,733 \cdot 10^{-3} T + 0,576 \cdot 10^{-6} T^2)} p^{-4,125} = \text{const}$; $p_2 = 0,1136$ МПа.

3.54. 514 К; —497,4 кДж/кг; 59,7 МВт.

К главе 4

4.1. 75% 25%. 4.3. $\eta_i = 1 - T_2/T_1$; $\varepsilon = T_2/(T_1 - T_2)$; $\varphi = T_1/(T_1 - T_2)$. 4.5. $0,253 < \eta_{\text{эф}} < 0,268$. 4.7. а) полная регенерация теплоты $q_{1,2} = q_{3,4}$; б) увеличение отношения v_1/v_{11} . 4.8. $l_{12} = 3,11$ кДж/кг; $\varepsilon = 9,64$. 4.9. Не менее 8 кг топлива. 4.12. $\varphi = 1$; $\eta_i = 1/\varphi$. 4.13. $\varphi = (1 + \varepsilon \eta_i) > 1$. 4.14. 2,95. 4.15. 0,25. 4.16. $\varphi = 1/(1 + \varepsilon \eta_i) < 1$. 4.19. 413 К; $q = \Delta u = 102$ кДж/кг; $l_{12} = -40$ кДж/кг. 4.20. 3025 кДж. 4.21. —2136 кДж. 4.23. 559 К, 270 кДж/кг; 208 кДж/кг; 62 кДж/кг. 4.24. —149 °С; —153,4 кДж/кг; 111,4 кДж/кг; —42 кДж/кг. 4.25. —71,5 кДж/кг; —51 кДж/кг. 4.26. 114 кДж/кг; 30,8 кДж/кг. 4.28. —80,85 кДж/кг; —116 кДж/кг. 4.29. —112 кДж/кг; 154,6 кДж/кг. 4.30. —114 кДж/кг; 114 кДж/кг; 157 кДж/кг. 4.31. —259 кДж/кг. 4.32. 1,17; —110 кДж/кг; 84,0 кДж/кг; 118 кДж/кг; —203,8 кДж/кг. 4.33.

—1,06; 88,4 кДж/кг; 74,5 кДж/кг; 103,6 кДж/кг; 14,0 кДж/кг; —15,2 кДж/кг. 4.34. 2,2; —12,4 кДж/кг; —27,6 кДж/кг. 4.35. 97,3 кДж/кг; 43 кДж/кг; 33,4 кДж/кг; 63,9 кДж/кг; 54,3 кДж/кг. 4.36. —122 кДж/кг; —100,4 кДж/кг; —137,7 кДж/кг; —21,9 кДж/кг; 15,4 кДж/кг. 4.38. 0,386 кДж/(кг·К). 4.39. 0,245 кДж/(кг·К). 4.41. 0,951 кДж/(кг·К). 4.42. 0,951 кДж/(кг·К). 4.43. 405 К.

К главе 5

$$5.8. dT + \frac{k-1}{(\partial v / \partial T)_p} dv = 0.$$

$$5.10. (du/dv)_T = a/v^2.$$

$$5.11. u = c_p T - a/v^2 + u_0.$$

$$5.16. \lambda = \frac{v(\partial p / \partial v)_T + T(\partial p / \partial T)_c}{c_p(\partial p / \partial v)_T}$$

$$5.17. \frac{dp}{dT} = \frac{r}{T_n(v'' - v')}$$

$$5.18. \frac{dp}{dT} = \frac{\Delta c_p}{T \Delta(\partial v / \partial T)_p}; \frac{dp}{dT} = \frac{\Delta(\partial v / \partial T)_p}{\Delta(\partial v / \partial p)_T}$$

5.19. $\ln p = -r/(RT) + C$. 5.21. $\Delta T = -0,73 \cdot 10^{-3}$ К. 5.22. $p = 0,0849$ МПа (636 мм рт. ст.). 5.23. $r = 2280$ кДж/кг. 5.24. $\Delta r / \Delta T = -650$ Дж/(кг·К). 5.26. 552 кДж/кг. 5.27. 104 К. 5.28. 374 К. 5.29. 2870 кДж/кг. 5.30. 326,0 К. 5.31. $V = 211 \cdot 10^{-6}$ м³; $m = 52 \cdot 10^{-3}$ кг. 5.33. При избыточном давлении 67 МПа. 5.34. $m = 0,25$ кг. 5.35. $\lambda = 2RT^2 \frac{d(\ln p)}{dT}$.

К главе 6

6.2. Пар перегрет. 6.3. Пар перегрет. 6.5. На 37 °С. 6.7. Пар влажный; $x = 0,74$. 6.8. В 10 раз. 6.9. $v = 0,02430$ м³/кг; $i = 3432,5$ кДж/кг; $s = 6,5304$ кДж/(кг·К). 6.11. а) Пар влажный; $\eta = 0,85$; б) пар перегрет; $v = 1,2$ м³/кг; в) пар сухой насыщенный; $p = 0,8$ МПа; $v = 0,24$ м³/кг; г) пар влажный; $x = 0,92$; $v = 7$ м³/кг; $t = 60^\circ\text{C}$; д) пар перегрет; $p = 0,4$; $v = 0,8$ м³/кг. 6.12. 0,7 МПа. 6.13. 170 °С; 0,8 МПа. 6.14. 794,2 кДж/кг. 6.15. 826,16 кДж/кг. 6.16. 5163,1 кДж. 6.18. 536 кДж/кг. 6.19. 398 кДж/кг. 6.21. 436 кДж/кг; 1,9 МПа. 6.22. $\Delta u = 550$ кДж/кг; $q = 620$ кДж/кг. 6.24. $t_2 = 362^\circ\text{C}$; $l = -392,5$ кДж/кг; $l_0 = 514$ кДж/кг. 6.25. $l = 477$ кДж/кг; $l_0 = 672$ кДж/кг; $q = -628$ кДж/кг.

К главе 7

7.2. $\varphi = 0,746$; $\rho_H = 0,0096$ кг/м³; $\rho_B = 1,2$ кг/м³; $\rho = 1,2096$ кг/м³; $t_p = 10,5^\circ\text{C}$; $R = 287,0$ Дж/(кг·К); $d = 79,8 \cdot 10^{-4}$ кг/кг; $i = 35,1$ кДж/кг. 7.4. $t_{\text{см}} = 42,5^\circ\text{C}$; $\varphi_{\text{см}} = 0,6$; $i_{\text{см}} = 130$ кДж/кг. 7.5. $\varphi = 0,53$; $d = 0,082$ кг/кг; $i = 279$ кДж/кг; $p_H = 11\,700$ Па; $t_p = 48,5^\circ\text{C}$. 7.7. $796 \cdot 10^{-5}$ кг/кг; $10,5^\circ\text{C}$. 7.9. 57 кДж/кг; 30 кДж/кг; 27 кДж/кг. 7.12. 4520 кДж/кг.

К главе 8

8.1. $-2,852 \cdot 10^6$ кДж/кмоль. 8.2. $1,69 \cdot 10^5$ кДж/кмоль. 8.4. $9 \cdot 10^5$ кДж/кмоль. 8.6. $2,09 \cdot 10^5$ кДж/кмоль. 8.8. $-0,44 \cdot 10^5$ кДж/кмоль. 8.9. $-5,85 \cdot 10^5$ кДж/кмоль. 8.11. $-0,85 \cdot 10^5$ кДж/кмоль. 8.13. $-3,47 \cdot 10^5$ кДж/кмоль. 8.14. $-102 \cdot 10^3$ кДж/кмоль. 8.15. $-2,558 \cdot 10^5$ кДж/кмоль. 8.16. $-2,53 \cdot 10^5$ кДж/кмоль. 8.17. $\Delta U = -42\,700 - 2,82 T + 0,0032 T^2 - 3,847 \cdot 10^{-6} T^3$; $\Delta U_{T=1000} = -46\,167$ кДж/кмоль. 8.20. 1,41. 8.22. 7,59 (р, Па). 8.24. а) $\Delta G_1 = 14\,997$ кДж (налево); б) $\Delta G_2 = -11\,414$ кДж (направо). 8.25. а) $\Delta G_1 = 2389$ кДж (налево); б) $\Delta G_2 = -3367$ кДж (направо). 8.26. $\Delta F = -18\,018$ кДж (направо). 8.29. $\Delta G^\circ = -23\,294$ кДж; $\Delta I^\circ = -12\,796$ кДж. 8.30. $-752,39 \cdot 10^3$ кДж. 8.31. $175 \cdot 10^3$ кДж. 8.34. Объем и давление не влияют на степень диссоциации реакции. 8.37. Количества веществ (кмоль): $n_{CO} = 4$; $n_{H_2O} = 64$; $n_{CO_2} = 16$; $n_{H_2} = 16$; в молярных долях: $CO = 4\%$; $H_2O = 64\%$; $CO_2 = 16\%$; $H_2 = 16\%$. 8.38. $n_{SO} = 0,287$ кмоль; $n_{H_2} = 0,57$ кмоль. 8.39. Для $p = 1$ гПа $x = 0,656$; для $p = 10$ гПа $x = 0,82$. 8.40. $x = 0,78$. 8.42. $n_{SO_2} = 0,78$ кмоль; $n_{O_2} = 0,49$ кмоль; $n_{SO_3} = 0,22$ кмоль. 8.44. $\Delta \xi = 0,0115$. 8.46. 0,22. 8.47. $n_{Fe_2O_3} = 0,07$ кмоль; $n_{CO} = 1,07$ кмоль; $n_{FeO} = 3,29$ кмоль; $n_{CO_2} = 1,23$ кмоль. 8.50. $-56\,094$ кДж/(кмоль \cdot К); $1,349 \cdot 10^{-10}$. 8.51. $\Delta I^\circ = -1152 + 0,074 T$; $\Delta U^\circ = -1152 + 0,0989 T$; $\Delta G^\circ = -1152 + 0,884 T - 0,074 T \ln T$; $\Delta S^\circ = -810 + 74 \ln T$.

К главе 9

9.1.

ω , км/ч	1000		2000	
h , км	1	10	1	10
T_0 , К	319,9	261,4	435,2	376,6
p_0 , МПа	0,1392	0,0457	0,4011	0,1603

9.2. 1000 м/с. 9.3. 80...95 км. 9.4. 5,38 км; 400 м/с. 9.5. 7,5 км; 930 м/с. 9.7. 28 100 К. 9.8. $p_2/p_1 = 2,61$. 9.9. CO_2 : $T = 1390$ К; $p/p_0 = 4,17$; O_2 : $T = 1352$ К; $p/p_0 = 2,87$; H_2 : $T = 1044$ К; $p/p_0 = 1,16$. 9.10. 5,6 МПа. 9.11. Газ одноатомный. 9.12. Для кислорода. 9.13. $p_0 = 1,6$ МПа; $T_0 = 673$ К; $p_0 = 5,26$ кг/м³. 9.15. 190°C. 9.16. 423 К; 0,5 МПа. 9.18. $\beta_{кр} = [0,5(k+1)]^{k/(k-1)}$; $\omega_{кр} = \sqrt{2p_1 v_1 k/(k+1)}$; $F_{кр} = M_1 \sqrt{v_1(k+1)/(2kp_1)} [0,5(k+1)]^{1/(k-1)}$. 9.19. Одноатомный идеальный газ, в начале процесса неподвижный, $\beta_0 \leq \beta_{кр}$. 9.20. $\omega_1/\omega_0 = 1,87$ при $\omega_1 = 0$; $(\omega_1/\omega_0)_{max} = 1,882$ (для $t_1 = 0^\circ C$). 9.21. $\omega = 228$ м/с; $\omega_0 = 216$ м/с. 9.22. 297,6 Дж/(кг \cdot К). 0,123 м. 9.24. 2370 м/с. 9.25. 2580 м/с. 9.26. $d_{кр} = d_{min} = 0,0455$ м; $d_0 = 0,1283$ м; $l_{расш} = 0,394$ м. 9.27. 0,547. 9.28. $p = 1$ МПа; $T = 842$ К. 9.29. 105,8 м/с. 9.30. 1,646 кг/с; 723,5 К. 9.31. 0,04 МПа. 9.32. 387,1 К. 9.34. $d_{кр} = 113,1$ мм; $d_0 = 298,6$ мм; $l_{расш} = 882,5$ мм. 9.35. 126 К. 9.36. 1198 м/с. 9.37. 0,03 МПа. 9.38. Кислород. 257,2 К; 279,2 м/с. 9.39. 283 К. 9.40. 978 К (для воздуха 1015 К); 568,2 м/с; $3,15 \cdot 10^{-4}$ м³. 9.41. $g_{CO_2} = 0,468$; $g_{H_2O} = 0,383$; $g_{N_2} = 0,149$. 9.42. $\alpha_1 = 5$. 9.43. 0,91. 9.44. 9,4 мм; 20 мм; 0,246 кг/с. 9.45. $t_2 = 218^\circ C$; $\omega_1 = 516,5$ м/с ($\omega_1 = 0$); $\omega_2 = 517,8$ м/с ($\omega_1 = 100$ м/с). 9.46. 0,965. 9.47. $\omega_{сум} = 567,9$ м/с; $\omega_{лав} = 1300$ м/с; $\omega_{лав д} = 1185$ м/с.

$\omega_{тр} = 532,2$ м/с. 9.49. $p = 6$ МПа; $t = 275^\circ C$; комбинированное сопло. 9.50. $F = 0,007204$ м². 9.51. 451,6 м/с; 1,1. 9.52. 0,408 МПа. 0,500 м³/кг. 9.53. $\xi = 0,2$; $\omega_1 = 1230$ м/с; $\Delta I_{тр}/q_{тр} = 0,65$. 9.55. 1,5 МПа; 350°C; 0,2. 9.56. 3 МПа; 450°C; 1207 м/с. 9.57. 321°C; 6,5 МПа. 9.58. 328°C; 1,25 МПа. 9.60. $f_z = |1 - A\psi_{max}(\tau - \tau_n)(\sqrt{v_1/p_1 M_1 \psi_{max}})^{1-2/(n+1)} - (n+1)/2$. 9.61. $f_z = y^{2(n+1-n/k)/(n-1)} |1 - (p_c/p_1)^{(k-1)/k} V[1 - (y-n/m p_c/p_1)^{(k-1)/k}]|$; $y = |1 - \mu_0 v_1 n M_1 (\tau - \tau_n)/V|^{(1-m)/2}$; $\tau - \tau_n = 865$ с; $d_1 = 7,9$ мм; $M_{Στ} = 6,08$ кг. 9.63. 0,0403 м/с; 0,0206 кг/с. 9.64. 1,5 МПа; 100°C; 0,003 кг/с. 9.65. 38 с; 158 м/с; $2,174 \cdot 10^{-4}$ кг/с. 9.66. 19,8 с; 215 м/с; $1,73 \cdot 10^{-3}$ кг/с. 9.69. $\tau = 38,4$; 111,3; 1028 с для He, HF и H₂O соответственно. 9.70. $\tau = 23,0$; 90,3; 94,6 с для He, HF и H₂O соответственно. 9.72. $-113,6$ К; 120,2°C; 0,852 м³/кг. 9.73. $\Delta I = 0$; $\Delta S = 0,1989$ кДж/(кг \cdot К). 9.75. 15,84 м³. 9.76. $\alpha_i = \frac{v}{c_p} \times \chi \left(\frac{2a(v-b)^2 - RTbv^2}{RTv^3 - 2a(v-b)^2} \right)$. 9.77. $T = \frac{2a}{Rb} \left(1 - \frac{b}{v} \right)$. 9.78. $-59,67$ кДж/кг. 9.80. Пар влажный: $p = 0,28$ МПа; $t = 130^\circ C$; $x = 0,99$. 9.81. Пар влажный: $t = 210^\circ C$; $x = 0,97$. 9.82. $-44^\circ C$; -146 кДж/кг. 9.83. 4,5 К; 3,1 К.

К главе 10

10.1. а) $L_k = -20,8$ МДж/ч; $Q = -20,8$ МДж/ч; $T_2 = 300$ К. б) $L_k = -28,43$ МДж/ч; $Q = 0$; $T_2 = 548$ К; в) $L_k = -24,83$ МДж/ч; $Q = -10,75$ МДж/ч; $T_2 = 424$ К. 10.2. а) 0,566 МПа; б) 1,26 МПа. 10.4. 13,47 кВт. 10.5. 496 К; 34,85 кВт. 10.7. 61,3 кВт; 1,268 кг/с. 10.8. 536,7 м³/ч. 10.9. Мощность уменьшится на 8,6 %. 10.10. 471 К. 10.12. 3,69 м³/с. 10.17. 0,064 м³/с; 12,1 кВт. 10.18. 11 кВт; 0,0089 м³. 10.19. 1,75 кВт; 0,02 кг/с. 10.20. $V_1 = 0,116$ м³/с; $V_2 = 0,0248$ м³. 10.21. а) 380 кДж/кг; б) 319 кДж/кг; в) 302 кДж/кг; $p = 8,175$ МПа. 10.22. 9,3%. 10.23. $Q = 2490$ кДж/мин = 4,15 кВт. 10.24. 570 кВт. 10.25. $p = 4,28$ кг/м³; $\varphi_{дох} = 199$ кДж/кг; $2l_0 = 390,8$ кДж/кг. 10.26. 345,6 м³/ч. 10.27. 48,5 кВт; 0,337 кг/с. 10.28. $t_k = -370$ кДж/кг; $\Delta I_k = 78,5$ кДж/кг. 10.30. Три ступени; $p = 11,5$ МПа. 10.31. Три ступени компрессора; параллельное соединение электродвигателей 20 и 30 кВт; $m = 1636,5$ кг/ч.

К главе 11

11.2. $T_2 = 1940$ К; $i_{св} = 521,8$ кДж/кг; η_i не изменится. 11.3. 5,67; 0,487; 1428 кДж/кг. 11.4. 59,7%; 869,2 кДж/кг; 1456 кДж/кг. 11.5. 0,614. 11.9. $\eta^* = 0,626$; к.п.д. и работа увеличатся. 11.11. 0,645; 114,7 кВт; 0,0041 м³; 6,994 кВт/л. 11.12. $\eta_m = 0,808$; $\eta_i = 0,503$; $\eta_0 = 0,623$; $\eta_i = 0,27$; $\eta_0 = 0,538$. 11.13. $\eta_i = 1 - [1 + (k-1) \ln a / (t - 1 + \tau(k-1) \ln a)]$. 11.15. а) 0,192; 20,25 МПа; б) 0,384; 0,667. 11.16. 0,305; 0,7 кг/с. 11.17. 0,051 кг/с. 11.18. $\eta_i = 0,611$; $\eta_{i0} = 0,717$; $i_{св} = 106$ кДж/кг. 11.19. 0,472; 0,725; 126 кДж/кг. 11.20. $\eta_i = 0,307$; $i_{св} = 266$ кДж/кг; $i_{св} = 134$ кДж/кг; $M_{p,г} = 3,03$ кг/с. 11.21. $g_i = 0,394$ кг/(кВт \cdot ч). $g_e = 0,448$ кг/(кВт \cdot ч). 11.22. $i_{св} = 99,3$ кДж/кг; $\eta_i = 0,56$. 11.24. 237,0 г/(кВт \cdot ч). 11.26. 0,0066 кг/с. 11.28. 0,547 кг/(кВт \cdot ч). 11.29.

$\eta_t = 0,483$; $N_{ГТУ} = 44,823$ МВт; $Q_{охл} = 17,567$ МВт; $Q_{рег} = 9,547$ МВт. 11.30. $\eta_t = 0,438$; $T_2 = 425$ К; $T_4 = 464$ К; $T_6 = 561$ К; $\eta_t = 0,236$; $\eta_{отц} = 0,538$. 11.31.

	R , кДж/(кг·К)	η_t , %	$I_{ц}$, кДж/кг	N_T , кВт	N_y , кВт
а	2,08	0,356	553	55 149	12 720
б	1,07	0,356	290	28 423	6 670
в	0,063	0,356	16	1 644	368

11.32. $g_{He} = 0,134$; $g_{Xe} = 0,866$; $\eta_t^{ст} = 0,52$. 11.33. $Q = 1997$ МВт; $N_{ГТ} = 1865,3$ МВт; $N_{ик} = 665,3$ МВт; $Q_{охл} = 250$ МВт; $\eta_{ГТУ} = 0,565$; $\sigma = 0,93$; $Q_{рег} = 1738$ МВт; $\eta_{АЭС} = 0,548$; $N_3 = 1094$ МВт. 11.35. $\beta = 2,4$; $\eta_t = 0,224$; $I_{ц} = 110$ кДж/кг; $d = 177$ мм; $\eta_t = 0,115$. 11.37. $\eta_t = 0,487$; $\beta_k = 7,5$; $\delta_c = 0,26$. 11.38. 84 875 Н. 11.40. $T_2 = 2288$ К; $\eta_t = 0,364$; $\eta_t = 0,390$; $\eta_t = 0,395$. 11.41. 0,64. 11.42. На 8,7%. 11.43. В 1,78 раза. 11.45. 0,62; 45,5 МВт. 11.47. Возрастает на 4,1%. 11.49. а) увеличится на 8,9%; б) увеличится на 4,1%. 11.50. Уменьшится на 0,56%. 11.51. В 3,54 раза. 11.53. $\eta_t = 0,324$; $\eta_t = 0,355$; $\eta_t = 0,375$; $\eta_t = 0,403$; $x_2 = 0,837$; $x_2 = 0,912$; $x_2 = 0,755$; $x_2 = 0,84$. 11.55. Уменьшится на 6,4%. 11.56. 1435 кДж/кг; 0,426. 11.58. 0,85. 11.59. 11 200 кДж/кг. 11.61. $\Delta\theta = 208$ кДж/кг. 11.63. $\Delta\theta = 37,4$ кДж/кг. 11.66. $\Delta\theta = 337$ кДж/кг. 11.68. 0,832. 11.70. 0,937. 11.72. $p_2 = 0,2$ МПа; $T_{a2} = 371$ К; $T_{b2} = 487$ К; $\eta_3 = 0,704$.

К главе 12

12.2. Затраты электроэнергии при 0°C уменьшаются в 12 раз, при 30°C — в 5,4 раза. 12.3. $Q_{п} = 189$ кВт; $Q_{пк} = 433$ кВт; $\Phi_{п} = 19,9$. 12.5. 2,074 МВт; 3,13 кг/с. 12.7. $|L_{гн1}| = 8,1$ кВт; $|L_{гн2}| = 192,5$ кВт; $L_{д} = 200,6$ кВт; $Q_{гн1} = 31,9$ кВт; $Q_{гн2} = 1110$ кВт; $\Phi_1 = 0,705$; $\Phi_2 = 1,843$; $\Phi = 1,786$. Коэффициенты преобразования и затраты теплоты источника для обеих схем одинаковы. Преимуществом второй схемы является меньшая мощность теплового насоса ТН2 и двигателя Д. 12.8. 2,01. 12.9. $\epsilon = 16,3$; $Q_0 = 23,9$ МДж/ч; $L = 1,46$ МДж/ч; $N = 0,406$ кВт. 12.10. $I_{2-4} = -72$ кДж/кг; $I_{1-2} = 56,95$ кДж/кг; $I_{ц} = -15,05$ кДж/кг; $\epsilon = 2,6$; $Q_0 = 39,7$ кДж/кг. 12.12. 91 070 м³/ч; 200 кВт. 12.13. $N = 52,54$ кВт; $Q_1 = 189$ кВт; $\epsilon = 3,8$. 12.14. $\epsilon = 8,73$; $I = 134$ кДж/кг; $N = 6,67$ кВт; $M = 0,0497$ кг/с; $x = 0,097$. 12.15. 1,6:1:2. 12.16. 1,71. 12.18. 15,4; 9,75 кВт. 12.19. $q_1 = 46,5$ кДж/кг; $I = 503$ кДж/кг; $\epsilon = 0,0925$.

К главе 13

13.2. $105 \cdot 10^3$ К. 13.3. 27 240 м/с. 13.4. $\Delta p = 2,45 \cdot 10^{-2}$ МПа. 13.5. $\Delta I = 102$ кДж/м³; $\Delta s = 1,02 \cdot 10^{-3}$ кДж/(м³·К). 13.7. $\mu = 3,6 \cdot 10^{-3}$ 1/К. 13.8. $9,66 \cdot 10^3$ А/м². 13.9. 1,12 В; 783 Вт; 88%. 13.10. $d_{кр} = 16,4$; $d_{вых} = 74$ мм. 13.12. $a = 3093$ м/с. 13.13. $w_{пр} = 0,77$ м/с; $w_0 = 6,35 \cdot 10^4$ м/с. 13.14. $r = 4,75 \cdot 10^{-3}$ мм. 13.15. $I_{н.у} = 0,64 \times 10^{-5}$ см; $I_{100} = 3,7$ см. 13.16. 46,5 В. 13.17. 0,76 м.

$$13.18. I_{\max} = p_1 (1 - p_2/p_1) / \left(\xi_{ср} \frac{\rho_{ср} \omega^2}{2d_{ср}} \right).$$

13.19. В 2; 4; 4 раза. 13.20. 0,173 кг/с.

К главе 14

14.1. $\delta = 0,25$ м; $t = 59,8^\circ\text{C}$; $t = 89,9^\circ\text{C}$. 14.3. $(\lambda_0/\lambda)_1 = 1,617$; $(\lambda_0/\lambda)_2 = 1,0064$. 14.4. $q = 23,4$ Вт/м²; $m = 3,79$ кг; $\lambda = 0,045$ Вт/(м·К). 14.5. $\delta_1 = 1$ мм; $\delta_2 = 3,1$ мм; $q = 35 040$ Вт/м²; $K = 50,1$ Вт/(м²·К). 14.6. $t_b = 197^\circ\text{C}$; $q = 2743$ Вт/м²; $q = 108,6$ Вт/м². 14.7. $K = 13,1$ Вт/(м²·К); $t = 610$ К; $\Delta t = 0,11$ К. 14.9. $\lambda = 0,134$ Вт/(м·К) при $t = 56^\circ\text{C}$ (масло МК). 14.10. 197 Вт. 14.11. 55 К; 17%. 14.12. Нецелесообразно, так как $d_{кр} = 38$ мм, т. е. $d_{кр} > d_2$. 14.13. $t = -6,2^\circ\text{C}$; $\alpha = 66$ Вт/(м²·К); $r_{кр} = 0,0038$ м. 14.14. $t_1 = 153^\circ\text{C}$; $\lambda = 0,068$ Вт/(м·К) (шлаковая вата); $r_{кр} = 0,017$ м. 14.16. 0,434 м. 14.17. $T_1 = 921,6$ К; $T_2 = 925$ К. 14.18. $\lambda = 0,143 \times (1 + 0,00143 t)$ Вт/(м·К) — асбозоолит. 14.19. 230 Вт/м; 310°C ; $71,5^\circ\text{C}$. 14.20. 60°C ; 0,0065 м. 14.21. $d = 6$ см; $\Delta t = 545^\circ\text{C}$. 14.22. $n = 0,5$; $t = 356^\circ\text{C}$. 14.23. 117°C ; 58°C . 14.25. 4 мм; 403 Вт. 14.26. $q = 50[1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \exp(-39,3 nx)/(0,098 n + 1)] + 75 \operatorname{ch}[2,18(x - 0,75)]$; $Q_2 = 33,7$ Вт; $Q = 429$ Вт. 14.27. $\lambda_0/\lambda = 1,05$; $Q = 0,77$ Вт. 14.30. 14,4 мин. 14.31. 11,3 Вт/(м²·К). 14.32. $t_{x=0} = 112^\circ\text{C}$; $t_{x=\delta} = 52,8^\circ\text{C}$. 14.33. 2,8 ч. 14.34. 105,4°C. 11.35. 0,96 ч. 14.36. $Q_t = 4992$ кДж; $t_{x=\delta} = 48,6^\circ\text{C}$. 14.37. $T = T_{a,ст} - (T_{a,ст} - T_0) \cos(121,3 x) \exp(-0,0632 t)$; $T_{x=\delta} = 1016$ К. 14.38. 1570°C . 14.39. 3 мм. 14.40. 0,7 ч; 937°C . 14.41. 54 Вт/(м²·К); 774°C . 14.43. 1032°C . 14.44. $t_{x=\delta, y=z=0} = 1297^\circ\text{C}$; $t_{x=z=0, y=\delta_y} = 1146^\circ\text{C}$; $t_{x=y=0, z=\delta_z} = 1088^\circ\text{C}$. 14.45. $t_{r=0, x=0} = 178,3^\circ\text{C}$; $t_{r=0, x=\delta_x} = 155,7^\circ\text{C}$. 14.46. $t_{r=0, r=0} = 441^\circ\text{C}$; $t_{r=0, x=\delta_x} = 329^\circ\text{C}$. 14.47. 1,64 мин; 20°C . 14.48. 38,5 мин. 14.49. 0,123 МДж. 14.50. $t_{x=0, y=\delta_y} = -14^\circ\text{C}$; $t_{x=\delta_x, y=0} = -36^\circ\text{C}$. 14.52. 446 К. 14.54. $T_1 = 393$ К; $T_2 = 724$ К; $T_3 = 1236$ К. 14.55.

Число узлов разностной сетки	Температуры поверхностей пластины, К			
	T_1	Погрешность аппроксимации, %	T_2	Погрешность аппроксимации, %
3	981,8	0,34	393,8	7,86
7	978,8	0,03	368,8	1,01
13	978,6	0,01	366,1	0,27
29	978,5	0	365,4	0,08
Точное решение	978,5	—	365,1	—

14.56.

Шаг по времени, с	Температура поверхностей пластин, К			
	T_1	Погрешность аппроксимации, %	T_2	Погрешность аппроксимации, %
1	975,5	0,31	374,0	2,44
0,1	978,7	0,02	371,8	1,84
0,01	978,5	0	365,4	0,08
Точное решение	978,5	—	365,1	—

14.57.

Время, с (отсчитывается от начала запуска двигателя)	Температура поверхности сопла со стороны газового потока		Температура внешней поверхности сопла	
	Численное решение	Точное решение	Численное решение	Точное решение
0,3	920,7	933,0	290,1	290,2
1,2	965,9	966,1	298,3	293,1
3,0	978,5	978,5	370,1	365,1
6,6	986,5	986,5	560,5	562,1

14.58.

$\delta = 1$ мм,	$T = 298, 451, 928$ К;	$T = 418, 1416, 2923$ К;
$\delta = 2$ мм,	$T = 294, 342, 552$ К;	$T = 420, 1492, 3074$ К;
$\delta = 3$ мм,	$T = 293, 307, 394$ К;	$T = 417, 1496, 3101$ К.

14.59.

$\lambda = 0,02$ Вт/(м·К),	$T = 293, 294, 295$ К;
$\lambda = 0,2$ Вт/(м·К),	$T = 294, 334, 528$ К;
$\lambda = 2$ Вт/(м·К),	$T = 301, 530, 1300$ К.
$T = 520, 1891, 3557$ К;	
$T = 406, 1423, 2986$ К;	
$T = 333, 835, 2001$ К.	

14.60.

а) $T = 295, 376, 628$ К;	$T = 490, 1727, 3328$ К;
б) $T = 294, 326, 485$ К;	$T = 428, 1540, 3144$ К;
в) $T = 293, 295, 319$ К;	$T = 366, 1189, 2657$ К.

374

14.61. а) $T = 305, 456$ К; б) $T = 302, 416$ К; в) $T = 307, 482$ К. 14.62. $\theta_n = 0,765$; $\theta_r = 0,840$. 14.63. $\theta_n = 0,9955$; $\theta_{gr} = 0,5214 \cdot 10^{-1}$; $\theta_p = 0,2731 \cdot 10^{-2}$; $\theta_{угл} = 0,1431 \cdot 10^{-2}$; $\theta_{0,5} = 0,9041$.

14.64.

Время, с 35 95 155 215 275 335 395 455
Температура при наличии плавящегося слоя, К 483 635 768 885 966 1050 1110 1170
Температура при условиях, когда плавления не происходит, К 452 720 903 1050 1170 1280 1380 1440

14.65. $AL (I) = 342, 269, 217, 186, 171, 165, 167, 173, 180, 182$ Вт/(м²·К); $RE = 28481$; $AL = 171$ Вт/(м²·К); $G = 2,792 \cdot 10^{-2}$ кг/с; $DZETA = 2,524 \cdot 10^{-2}$; $ALTRE = 170$ Вт/(м²·К); $N = 10$; $A = 2,8412$; $B = 0,1418$; $C = 4,98 \cdot 10^{-4}$; $DZETAT = 2,527 \cdot 10^{-2}$; $DP2T = 2190$ Па; $QTR = 89,2\%$; $QKSR = 7,3\%$; $QLUSR = 3,4\%$; $T (I) = 27,2, 29,6, 32,5, 35,5, 38,1, 40,3, 42,0, 43,4, 44,3, 44,5$ °С; $T2W = 39,2$ °С; $SKP = 0,93$ °С. 14.67. $R_{кр,рар} = 1,4 \cdot 10^{-4}$ м²·К/Вт; $R_{кр,возд} = 2,5 \cdot 10^{-5}$ м²·К/Вт (при $r = 3,5 \cdot 10^{-5}$ м). 14.68. $q_{кр} = 2440$ Вт/м²; $\Delta T_{кр} = 0,34$ К (при $r = 1,2 \cdot 10^{-5}$ м). 14.69. $p_{кр} = 2,5$ МПа; $R_{кр}^{-1} = 1,41 \cdot 10^5$ Вт/(м²·К) ($r = 3,5 \cdot 10^{-5}$ м). 14.70. $\sigma_v = 130$ МПа; $R_{кр,р} \cdot 10^4 = 10,1, 3,4, 2,8, 1,4$ м²·К/Вт при $r \cdot 10^4 = 10, 12, 15$; 15 м соответственно. 14.71. $R_{кр,рар} = 9,24 \cdot 10^{-4}$ м²·К/Вт; $Ra_{Al_2O_3} = 300$ мкм. 14.72. В 1,32 и 1,26 раза. 14.73. $\eta_{a,0}$ возрастет в 1,53 раза; $T_{гв,рар} = 822$ К; $T_{гв,возд} = 803$ К. 14.74. $Ra = 4,5$ мкм при $r = 3,5 \cdot 10^{-5}$ м. 14.75. $R_1/R_2 = 1,97$; $1 \leq R_2/R_1 \leq 1,42$ ($R_2 \approx R_1$). 14.77. $q_{кр} = 11,2 \cdot 10^4$ Вт/м²; $\Delta T_{кр} = 40$ К. 14.78. $\Delta T_{кр, max}/\Delta T_{кр, min} = 1,32$; $\rho_{кр, max}/\rho_{кр, min} = 1,39$. 14.79. $\delta_0 = 26$ мкм и $\Sigma Ra_i \approx 25$ мкм — больше допустимых. 14.80. $T = 42,5$ °С ($R_{кр} = 0,5$ К/Вт); $T = 50$ °С.

К главе 15

15.2. $\alpha = 128,2$ Вт/(м²·К); $\Delta p = 1620$ Па. 15.3. $l/d = 266$; $\alpha = 169,4$ Вт/(м²·К). 15.4. а) 0,73 м; 45,34 Вт/(м²·К); б) 0,616 м; 277,7 Вт/(м²·К); в) 0,0124 м; 4055 Вт/(м²·К); г) 0,0102 м; 6287 Вт/(м²·К); д) 0,0039 м; 27 886 Вт/(м²·К). 15.6. 833 Вт/(м²·К). 15.7. 0,595 м. 15.8. $\alpha_q \approx 1,2 \alpha_r$. 15.9. $\alpha_{кр}/\alpha_{кр0} = 1,2$. 15.11. 58,2 кВт. 15.12. 36,5 Вт/(м²·К). 15.14. 0,0263. 15.15. 169 Вт/(м²·К). 15.17. ad/λ ; wpd/μ ; $\mu c/\lambda$; $g^2 \beta \Delta T \rho^2/\mu^2$. 15.18. $Eu = 32$ т/(Ре д). 15.19. $Eu = 0,1582$ т/(Ре^{1/4} д). 15.20. $\Delta_1 = (\alpha_0 - \alpha_{кр}) 100/\alpha_{кр} = 15,6\%$; $\Delta_2 = -5,7\%$. 15.22. 99,96° С. 15.23. — 5,8%. 15.25. а) 1,79; б) 1,56; в) 1,44. 15.26. а) 40,5; б) 37,7; в) 41,0. 15.27. $\alpha_{ш}/\alpha_{кр} = 1,12$. 15.29. 6384 Вт/(м²·К). 15.31. 583 К, 781 К. 15.32. 5,1 м/с. 15.34. 22,2 кВт/(м²·К). 15.38. Турбулентный, $\alpha = 70$ кВт/(м²·К).

К главе 16

16.2. $c_f = 0,646/\sqrt{Re_x}$. 16.3. $c_f/2 = 0,209/Re_x^{0,5}$. 16.4. $\delta_T/\delta \approx 1/\sqrt{Pr}$. 16.5. а) $\delta_T = 6,25$ мм; $\delta_x = 8,07$ мм; б) $\alpha_1 = 7,15$ Вт/(м²·К); $\alpha_2 = 5,50$ Вт/(м²·К); в) $\alpha = 7,84$ Вт/(м²·К). 16.6. $St = 0,33$ $Pr^{-2/3}$ $Re_x^{-1/2}$. 16.9. 184,7 Вт/(м²·К). Полученное значение отличается

375

только на 4,6 % от более точного решения с учетом теплоотдачи в ламинарном пограничном слое. 16.10. Увеличится на 26%. 16.11. На 43 %. 16.12. 65,6 Вт/(м²·К). 16.14. $Nu_d Re_d^{-1/2} = 0,805$; $\alpha_x = 54 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}$ 16.16. $\rho_{ст} \omega_{ст} = 0,00236 \text{ х}^{-0,2}$.

16.19

Точки 8 9 10 11 12 13
F·10⁵ 225 163 143 133 125 117

16.21. $(\rho \omega)_{ст} = 0,083 \text{ кг/(м}^2 \cdot \text{с)}$; $\delta = 1,5 \text{ мм}$. 16.22. В 3,3 раза.

К главе 17

17.1. 977 °С. 17.4. 674 Вт/(м·К). 17.6. 464 кВт/м². 17.8. $T_{ст}^* = 1385 \text{ К}$; $\alpha = 130 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}$; $q = 132 \text{ кВт/м}^2$. 17.9. 9,67 кВт/м². 17.11. 170 Вт/(м²·К). 17.12. 1,33 кВт/м². 17.13. 596; 212 и 61 Вт/(м²·К). 17.14. 17,6; 1,26 и 0,67 Вт/м². 17.15. В 2,75 раза. 17.18. $Fo = 14,3$; $R = 8 \text{ мм}$; $L = 40 \text{ мм}$; $\theta = 5^\circ$; $\gamma = 60^\circ$.

Bi	$b, \text{ кВт} \cdot \text{с}^{1/2} / (\text{м}^2 \cdot \text{К})$	$t_1, ^\circ\text{C}$	$t_{22}, ^\circ\text{C}$	$(T_{ст1}^* - T_1), \text{ К}$	$t_1, ^\circ\text{C}$	$t_{22}, ^\circ\text{C}$	$q_1, \text{ кВт/м}^2$
21,5	0,42	1591	1221	152	1311	1329	0,62
2,16	4,19	1483	853	280	1005	1118	1,71
0,85	10,5	1279	574	520	713	873	3,63
0,42	20,9	1021	386	823	497	652	5,98
0,24	36,9	781	264	1104	121	478	8,32

Вывод. Понижение температуры в профиле является следствием резкого увеличения коэффициента b при $a = \text{const}$. $Bi = \alpha_1 R / \lambda$ изменяется в основном за счет λ . Рост q_1 связан с увеличением $(T_{ст1}^* - T_1)$.

17.19. $Bi = 1,45$; $R = 8 \text{ мм}$; $L = 40 \text{ мм}$; $\theta = 5^\circ$; $\gamma = 60^\circ$.

Fo	$b, \text{ кВт} \cdot \text{с}^{1/2} / (\text{м}^2 \cdot \text{К})$	$t_1, ^\circ\text{C}$	$t_{22}, ^\circ\text{C}$	$(t_1 - t_{22}), \text{ К}$	$t_1, ^\circ\text{C}$	$t_{22}, ^\circ\text{C}$	$q_1, \text{ кВт/м}^2$
3,06	13,4	1204	162	1042	355	587	4,33
5,20	10,3	1294	301	993	504	741	3,51
6,25	9,36	1321	366	955	566	793	3,26
10,4	7,25	1385	584	801	759	938	2,66
31,2	4,19	1465	1066	399	1153	1204	1,87

Вывод. Уменьшение разности температур $(t_1 - t_{22})$ связано с увеличением коэффициента температуропроводности материала.

17.20. $R = 8 \text{ мм}$; $L = 40 \text{ мм}$; $\theta = 5^\circ$; $\gamma = 60^\circ$ (см. рис. 17.2).

Материал	$t_1, ^\circ\text{C}$	$t_{22}, ^\circ\text{C}$	$\Delta t, \text{ К}$	$t_1, ^\circ\text{C}$	$t_{22}, ^\circ\text{C}$	$t_{пл}, ^\circ\text{C}$
Бериллий	1030	650	380	732	847	1280
Вольфрам	1074	667	407	757	883	3380
Молибден	1081	723	358	802	907	2600
Ниобий	1211	599	612	753	968	1950
Титан	1328	581	747	904	1148	1800

Вывод. Самая низкая разность температур наблюдается в профиле из молибдена, самая высокая — в профиле из титана. Это объясняется тем, что среди материалов, перечисленных в таблице, молибден имеет самый высокий коэффициент температуропроводности, а титан, наоборот, самый низкий (коэффициент температуропроводности характеризует теплоинерционные свойства материала). Следовательно, при прочих равных условиях наиболее высокие деформации и термические напряжения могут возникнуть в конструкции с титановым профилем. Наиболее высокий коэффициент линейного расширения у бериллия и титана ($10,5 \cdot 10^{-6}$ и $7,7 \cdot 10^{-6} \text{ К}^{-1}$ соответственно).

17.21. $\Delta t = t_1 - t_{22}$ (см. рис. 17.3); $t_1, t_{22}, ^\circ\text{C}$.

R, мм	$\tau = 25 \text{ с}$			$\tau = 50 \text{ с}$			$\tau = 75 \text{ с}$			$\tau = 100 \text{ с}$		
	t_1	t_{22}	Δt	t_1	t_{22}	Δt	t_1	t_{22}	Δt	t_1	t_{22}	Δt
1	435	137	298	961	341	620	1368	519	849	1543	657	886
2	387	91	296	832	240	592	1259	429	830	1474	594	880
4	338	90	248	743	224	519	1078	395	683	1335	577	758
8	294	80	214	675	214	461	943	408	535	1161	616	545
12	273	79	194	649	251	398	918	491	427	1084	727	357

Вывод. Полученные результаты показывают, что форма и размеры носового профиля крыла существенно влияют не только на уровень температур в профиле, но также и на разность Δt между максимальной t_1 и минимальной t_{22} температурами. Чем меньше Δt , тем ниже термические напряжения и деформации в конструкции.

Для снижения уровня аэродинамического нагрева профиля радиус закругления следует выбирать достаточно большим (чтобы уменьшить интенсивность теплоотдачи), однако при этом необходимо иметь в виду, что с увеличением R растет сопротивление формы, возникающее при обтекании профиля.

17.22. $Fo = \alpha \tau / R^2 = 7,65$; $Bi = \alpha_1 R / \lambda$.

R, мм	2	4	8	16	32
Bi	0,0889	0,1492	0,2497	0,4230	0,7320
$t_1, ^\circ\text{C}$	341	494	675	860	1011
$t_{22}, ^\circ\text{C}$	102	149	214	298	396
$\Delta t, \text{ К}$	239	345	461	562	615
$q_1, \text{ Вт/м}^2$	1863	1563	1307	1110	957
$(q_{пл}/q_1) \cdot 100$	0,273	1,09	3,28	9,48	22,4

Вывод. Поскольку в этих расчетах рассматривались геометрически подобные профили, а критерий Fo для каждого момента времени во всех вариантах имел одно и то же значение, главной причиной повышения температуры в сходственных точках профилей являлось увеличение критерия Bi . Несмотря на то что коэффициент теплоотдачи α_1 по мере роста R падает, увеличение размеров носового профиля приводит к повышению температурного уровня. При этом доля теплоты, переносимой в окружающую среду путем излучения, $q_{\text{л}}/q_{\text{к}}$ растет.

17.23.

γ	10	20	30	40	50	60	70
$t_1, ^\circ\text{C}$	1046	1038	1018	1009	1002	926	805

17.24.

$\tau, \text{с}$	20			50			80		
F_a	9,37			23,4			37,5		
i	1	5	7	1	5	7	1	5	7
$\alpha_i, \text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$	7580	655	701	4420	586	238	532	50,8	51,4
$T_{\text{ст}}, \text{К}$	2063	2114	2184	1415	1420	1421	1683	1687	1685
$q_1, \text{кВт}/\text{м}^2$	3076	412	878	224	53,4	61,5	98,1	87,8	70,9
$t_{12}, ^\circ\text{C}$	1340	1009	600	1059	1020	961	1001	973	931

Вывод. Падение температуры в передней критической точке t_1 (τ) при $\tau > 20$ с объясняется снижением скорости полета на участке $20 < \tau < 40$ и одновременным увеличением высоты полета.

17.25.

$\tau_{\text{ст}}$	0	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0
$t_1, ^\circ\text{C}$	3453	3434	3415	3398	3381	3365
$t_{12}, ^\circ\text{C}$	322	322	321	321	321	320
$\Delta t, \text{К}$	3131	3112	3094	3077	3060	3045
$(T_{\text{ст}} - T_1), \text{К}$	552	605	657	705	753	800
$q_{\text{к}}, \text{МВт}/\text{м}^2$	25,8	28,0	30,2	32,2	34,1	36,0
$(q_{\text{л}}/q_{\text{к}}) \times 100$	0	7,89	14,6	19,9	24,5	28,6

Вывод. Полученные данные показывают, что по мере увеличения степени черноты поверхности профиля доля теплоты, переносимой путем излучения в окружающую среду, растет, достигая 28,6% (при $\tau_{\text{ст}} = 1$) от количества теплоты, подводимого к профилю конвективным путем. Однако в рассматриваемых условиях температура в передней критической точке носового профиля уменьшается всего на 2,5%. Это является следствием того, что плотность конвективного потока $q_{\text{к}}$ с увеличением $\tau_{\text{ст}}$ растет, поскольку увеличивается разность температур $T_{\text{ст}} - T_1$. При этом α_1 , $T_{\text{ст}}$ и суммарная плотность теплового потока, поступающего в профиль, $q_{\text{к}} - q_{\text{л}}$ остаются практически постоянными.

17.26.

$\delta, \text{мм}$	1				2			
$\tau, \text{с}$	20	40	60	80	20	40	60	80
$t_{12}, ^\circ\text{C}$	335	531	589	660	191	358	426	498
$t_{13}, ^\circ\text{C}$	267	479	549	616	158	327	401	469
$t_{15}, ^\circ\text{C}$	160	301	413	501	91	205	296	375

Вывод. Оптимальная толщина теплозащитного покрытия должна быть выбрана с таким расчетом, чтобы температура в профиле не превышала допустимую, а само покрытие при этом имело минимальную массу.

17.27.

$\delta, \text{мм}$	t_{12}	t_{13}	t_{14}	t_{15}	t_{16}	t_{17}	t_{18}	t_{19}
0,5	3366	2669	1974	1918	1048	724	174	111
1	3401	2749	2081	2008	650	458	105	67

17.28.

$\delta, \text{мм}$	0,1	0,25	0,5	1,0	1,5	2,5
$t_{19}, ^\circ\text{C}$	2293	1579	1048	650	491	408
$t_{12}, ^\circ\text{C}$	3271	3323	3366	3401	3415	3423

Вывод. Из полученных данных видно, что при $\delta > 0,5$ температура внешней вольфрамовой оболочки превышает температуру плавления ($t_{\text{пл}} = 3380^\circ\text{C}$).

К главе 18.

18.2. $0,315 \text{ м}^2$; 157 мм. 18.3. Переданное количество теплоты будет возрастать пропорционально $(T_{\text{н}} - T_{\text{ст}})^{3/4}$. 18.4. а) 7923 Вт/ $(\text{м}^2 \cdot \text{К})$; б) 9845 Вт/ $(\text{м}^2 \cdot \text{К})$. 18.6. Коэффициент теплоотдачи увеличится на 9,6%. 18.8. а) 2,6 м; б) 4,2 м. 18.10. 11,2 м/с. 18.11. 8157 Вт/ $(\text{м}^2 \cdot \text{К})$. 18.12. 3561 Вт/ $(\text{м}^2 \cdot \text{К})$. 18.14. 322 К.

$p, \text{МПа}$	1,255	2,798	5,505
$\alpha, \text{кВт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$	28,62	36,02	46,27
$\Delta t, \text{К}$	10,5	8,3	6,5
$t_{\text{ст}}, ^\circ\text{C}$	200,5	238,3	276,5

Результаты расчета приведены на рис. 1.

18.18.

$p, \text{МПа}$	2,798	5,505	7,445	11,29	18,67
$q_{\text{кр}1}, \text{МВт}/\text{м}^2$	3,765	4,205	4,230	3,740	2,005

Результаты расчета приведены на рис. 2.

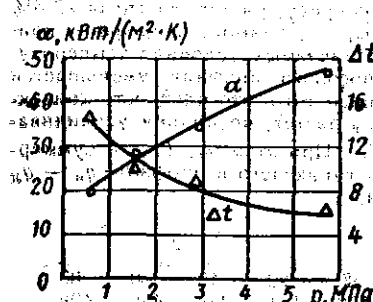


Рис. 1

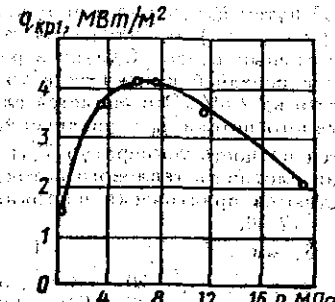


Рис. 2

18.21. Характер кипения азота пузырьковый, кислорода — пленочный. 18.22. 17,6 кВт/(м²·К); 983,8°C 18.23. 11,9 кВт/(м²·К); 887°C.

К главе 19

19.2. $\bar{\varphi}_{1,2} = 0,93$; $\bar{\varphi}_{21} = 0,36$. 19.3. $\bar{\varphi}_{1,2} = 0,40$; $\bar{\varphi}_{21} = 0,46$.
19.4. 0,112 м²/м; 0,136 м²/м; 0,145 м²/м.
19.5. а) 0,228 м; б) 0,399 м; в) 0,761 м. 19.8. $1 \cdot 10^{19}$ Вт/м². 19.10. 0,307 м. 19.12. 0,24. 19.14. 57,2 кВт/м². 19.16. 1253 кВт. 19.18. 23 Вт/(м²·К).

К главе 20

20.2. 80,3 м². 20.3. 417 К. 20.4. 0,668 м²/с. 20.6. 138. 20.7. 1,22 м²; 7. 20.8. 1,21 кВт/(м²·К). 20.10. $\alpha_1 = 8,64$ кВт/(м²·К); $\alpha_2 = 7,36$ кВт/(м²·К). 20.11. Коэффициент теплоотдачи со стороны воздуха $\alpha_1 = 227,5$ Вт/(м²·К), со стороны воды $\alpha_2 = 7775$ Вт/(м²·К); коэффициент теплопередачи, отнесенный к теплопередающей поверхности на стороне воздуха, $k = 161,7$ Вт/(м²·К); водяной эквивалент воздушного потока $w_{\text{возд}} = 91,45 \cdot 10^3$ кДж/(ч·К); водяной эквивалент потока воды $w_{\text{вод}} = 759,1 \cdot 10^3$ кДж/(ч·К); температура воздуха на выходе $T_{\text{возд}} = 299,7$ К; температура воды на выходе $T_{\text{вод}} = 300,8$ К; потеря напора со стороны воздуха $\Delta p = 2,076$ кПа; со стороны воды $\Delta p = 10,74$ кПа. 20.12. Уменьшится в 11 раз; $k_1 = 1128$ Вт/(м²·К); $k_2 = 101,8$ Вт/(м²·К).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абрамович Г. Н. Прикладная газовая динамика. М., 1969.
2. Андриященко А. И. Основы термодинамики реальных процессов. М., 1975.
3. Боришанский В. М., Кутателадзе С. С., Новиков И. И., Федюнский О. С. Жидкометаллические теплоносители. М., 1967.
4. Варгафтик Н. Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. М., 1972.
5. Жукаускас А. А., Макарявичус В. И., Шланчаускас А. А. Теплоотдача пучков труб в поперечном потоке жидкости. М., 1972.
6. Исаев С. И. Курс химической термодинамики. М., 1975.
7. Исследование процессов тепло- и массообмена / Под ред. Г. Б. Петражицкого. Труды МВТУ, № 170, вып. 1, 1973; № 195, вып. 2, 1975; № 222, вып. 3, 1976; № 302, вып. 4, 1979.
8. Кабардин Ю. А., Кузнецов С. И., Любимов А. Н., Шумяцкий Б. Я. Атлас газодинамических функций при больших скоростях и высоких температурах воздушного потока / Под ред. А. С. Предводителя. М., 1961.
9. Кутателадзе С. С., Леонтьев А. И. Теплообмен и трение в турбулентном пограничном слое. М., 1972.
10. Микулин Е. И. Криогенная техника. М., 1969.
11. Миснар А. Теплопроводность твердых тел, жидкостей, газов и их композиций. М., 1968.
12. Основы теплопередачи в авиационной и ракетно-космической технике / Под ред. В. К. Кошкина. М., 1975.
13. Петухов Б. С., Генин Л. Г., Ковалев С. А. Теплообмен в ядерных энергетических установках. М., 1974.
14. Петухов Б. С. Теплообмен и сопротивление при ламинарном течении жидкости в трубах. М., 1967.
15. Ривкин С. Л., Александров А. А. Термодинамические свойства воды и водяного пара. М., 1975.
16. Ривкин С. Л. Термодинамические свойства газов. М., 1973.
17. Таблицы стандартной атмосферы. М., 1964.
18. Таблицы стандартных справочных данных. Плотность, энтальпия, энтропия и изобарная теплоемкость жидкого и газообразного азота при температурах 70—1500 К и давлениях 0,1—100 МПа. М., 1978.
19. Теория тепломассообмена / Под ред. А. И. Леонтьева. М., 1979.
20. Теплофизические свойства веществ / Под ред. Н. Б. Варгафтика. М., 1956.
21. Техническая термодинамика / Под ред. В. И. Крутова. М., 1981.
22. Хаузен Х. Теплопередача при противотоке, прямотоке и перекрестном токе. М., 1981.
23. Шишов Е. В. Методы пограничного слоя в проблемах конвективного теплообмена. МВТУ, 1973.
24. Шахтин Г. Теория пограничного слоя. М., 1969.
25. Эккерт Э. Р. Введение в теорию тепло- и массообмена. М.-Л., 1957.

Предисловие	3
Часть первая	
ТЕХНИЧЕСКАЯ ТЕРМОДИНАМИКА	6
Глава 1. Параметры состояния термодинамической системы. Уравнение состояния идеального газа	6
Глава 2. Теплоемкость, внутренняя энергия и энтальпия идеального газа. Смеси газов	13
Глава 3. Первый закон термодинамики	21
§ 3.1. Приложение первого закона термодинамики к процессам изменения физического состояния газа	21
§ 3.2. Газовые процессы при переменной теплоемкости	33
Глава 4. Второй закон термодинамики	40
§ 4.1. Термодинамический анализ циклов	40
§ 4.2. Графический метод расчета процессов и циклов с помощью sT -диаграммы	47
§ 4.3. Энтропия газовых смесей	52
Глава 5. Дифференциальные уравнения термодинамики. Фазовые переходы	55
§ 5.1. Дифференциальные уравнения термодинамики	55
§ 5.2. Фазовые переходы	58
Глава 6. Термодинамические параметры состояния водяного пара. Паровые процессы	62
Глава 7. Влажный воздух	67
Глава 8. Химическая термодинамика	72
§ 8.1. Термохимия	72
§ 8.2. Химическое равновесие	79
Глава 9. Истечение и дросселирование	90
§ 9.1. Параметры адиабатически заторможенного газа	90
§ 9.2. Течение газа через сопла и диффузоры	94
§ 9.3. Истечение из сосуда ограниченной емкости	103
§ 9.4. Дросселирование газов и паров	110
Глава 10. Сжатие газа в компрессоре	112
Глава 11. Циклы тепловых двигателей	124
§ 11.1. Циклы тепловых двигателей с газообразным рабочим телом	124
§ 11.2. Циклы паросиловых установок	143
§ 11.3. Работоспособность термодинамических систем. Эксергия	150

Глава 12. Циклы холодильных машин	155
Глава 13. Термодинамика безмашинного преобразования энергии	168
Часть вторая	
ТЕОРИЯ ТЕПЛОМАСООБМЕНА	174
Глава 14. Теплопроводность	174
§ 14.1. Теплопроводность при стационарном режиме	174
§ 14.2. Теплопроводность при нестационарном режиме	182
§ 14.3. Численные методы решения задач нестационарной теплопроводности	192
§ 14.4. Контактный теплообмен между твердыми телами	216
Глава 15. Конвективный теплообмен	223
§ 15.1. Теплообмен при течении жидкости и газа в трубах и каналах	223
§ 15.2. Теплообмен при внешнем обтекании тел	228
§ 15.3. Теплообмен в атомных реакторах	234
Глава 16. Приложения теории пограничного слоя к явлениям теплообмена	237
Глава 17. Теплообмен при больших скоростях и температурах газового потока	254
Глава 18. Теплообмен при изменении агрегатного состояния вещества	273
§ 18.1. Теплообмен при конденсации пара	273
§ 18.2. Теплообмен при кипении жидкости	280
Глава 19. Теплообмен излучением	283
§ 19.1. Радиационный теплообмен между твердыми телами, разделенными диатермичной средой	283
§ 19.2. Радиационный теплообмен в излучающих и поглощающих средах	286
Глава 20. Теплообменные аппараты	295
Часть третья	
ДОМАШНИЕ ЗАДАНИЯ	305
Задание 1. Газовые смеси	305
Задание 2. Газовый цикл	308
Задание 3. Равновесный состав химически реагирующей газовой смеси	314
Задание 4. Термодинамический расчет топливного элемента	316
Задание 5. Теплопроводность при стационарном режиме	318
Задание 6. Теплопроводность при нестационарном режиме (решение задач аналитическими методами)	321
Задание 7. Теплопроводность при нестационарном режиме (решение задач численными методами)	332
Задание 8. Теплопередача	334
Задание 9. Лучистый теплообмен	337
Приложение	339
Ответы	367
Список литературы	381