



МОСКОВСКИЙ ОРДЕНА ЛЕНИНА
И ОРДЕНА ОКТЯБРЬСКОЙ РЕВОЛЮЦИИ
АВИАЦИОННЫЙ ИНСТИТУТ
ИМЕНИ СЕРГО ОРДЖОНИКИДЗЕ

ПРОГРАММИРОВАННЫЙ
ЗАДАЧНИК
ПО ТЕХНИЧЕСКОЙ
ТЕРМОДИНАМИКЕ

МОСКВА - 1983

МИНИСТЕРСТВО
ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО
ОБРАЗОВАНИЯ СССР

МОСКОВСКИЙ ОРДЕНА ЛЕНИНА
И ОРДЕНА ОКТЯБРЬСКОЙ РЕВОЛЮЦИИ
АВИАЦИОННЫЙ ИНСТИТУТ
ИМЕНИ СЕРГО ОРДЖОНИКИДЗЕ

ПРОГРАММИРОВАННЫЙ ЗАДАЧНИК
ПО ТЕХНИЧЕСКОЙ ТЕРМОДИНАМИКЕ

Учебное пособие

Утверждено
на заседании редсовета
25 октября 1982 г.

МОСКВА 1983

УДК: 621.1.016.7(075.8)
621.1(075)
П784

В.К. Кошкин, Т.В. Михайлова, Ю.С. Михеев, А.Е. Пирогов,
Программированный задачник по технической термодинамике:
Учебное пособие/В.К. Кошкин и др. - М.: МАИ, 1983. - 62 с.,
ил.

Пособие содержит вопросы для самоподготовки и типовые задачи по основным разделам курса технической термодинамики для студентов факультета двигателей летательных аппаратов.

Пособие предусматривает использование методики программированного самоконтроля степени усвоения учебного материала и навыков практического применения основных положений курса к решению практических задач.

Рецензенты: В.И. Крутов, Б.Н. Юдаев

© Московский авиационный институт, 1983 г.

ПРЕДИСЛОВИЕ

Учебное пособие предназначено для студентов факультета двигателей летательных аппаратов дневной и вечерней форм обучения и включает вопросы и задачи по основным разделам курса технической термодинамики.

В задачнике используется широко применяемая в течение нескольких лет на кафедре авиационной теплотехники МАИ методика программированного контроля и самоконтроля усвоения учебного материала, положительно зарекомендовавшая себя на практике.

В каждом разделе, наряду с типовыми задачами, требующими проведения расчетов, даются вопросы для самоподготовки к решению задач, цель которых - проверить усвоение основных понятий, соотношений и методов термодинамического расчета и анализа. Как правило, при ответе на эти вопросы студент должен выбрать правильный ответ из нескольких предложенных вариантов.

Авторы старались не включать в число ответов заведомо неправильные. Большинство вариантов ответов имеют смысл, хотя бы для иных условий.

Программированная форма самоконтроля требует активного усвоения учебного материала, способствует более глубокому его пониманию и развивает навыки практического применения теоретических положений к решению конкретных задач.

В конце пособия приводятся ответы на все вопросы, решения задач и методические указания. Однако рекомендуем читателям не торопиться заглядывать в ответы, а попытаться внимательно продумать ответ, просмотреть в случае необходимости лекционный материал по соответствующему разделу. Только в этом случае можно получить прочные знания и практические навыки.

Получение неверных ответов на 20-25% вопросов и задач должно послужить сигналом к более внимательному изучению лекционного материала по данному разделу курса.

При решении задач используются учебные энтропийные Ts и is - диаграммы, имеющиеся на кафедре:

- 1) Ts - диаграмма для 1 кг воздуха;
- 2) Ts - диаграмма для 1 кмоль двухатомных газов;
- 3) is - диаграмма для воздуха и продуктов сгорания углеводородного топлива;
- 4) is - диаграмма водяного пара (по М.П. Вукаловичу).

Пособие является одной из первых попыток создания программированного задачника по термодинамике. Авторы с благодарностью примут все критические замечания и предложения читателей.

ПРИНЯТЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

- c - истинная теплоемкость газа, Дж/(кг·К);
- $c_m, c_{t_1}^{t_2}$ - средняя теплоемкость в интервале температур $t_1 \dots t_2$, Дж/(кг·К);
- c_0^t - средняя теплоемкость в интервале температур $0 \dots t$, Дж/(кг·К);
- f - площадь сечения канала, м²;
- g_i - массовая доля i -го компонента смеси;
- G - масса, кг;
- G_c - массовый расход, кг/с;
- i, J - энтальпия, Дж/кг, Дж;
- k - показатель адиабаты;
- l, L - работа, Дж/кг, Дж;
- M - число молей вещества, кмоль;
- n - показатель политропы;
- p - абсолютное давление, Па;
- p_i - парциальное давление i -го компонента смеси, Па;
- p_H - давление окружающей среды (при истечении), Па;
- q, Q - количество тепла, Дж/кг, Дж;
- R, R_u - газовая постоянная, Дж/(кг·К), Дж/(кмоль·К);
- r - скрытая теплота парообразования, Дж/кг;
- r_i - объемная (молярная) доля i -го компонента смеси;
- s, S - энтропия, Дж/(кг·К), Дж/К;
- t, T - температура, °С, К;
- u, U - внутренняя энергия, Дж/кг, Дж;
- v - удельный объем, м³/кг;
- V - абсолютный объем, м³;
- v_u - объем моля, м³/кмоль;
- V_i - приведенный объем i -го компонента смеси, м³;
- w - скорость течения, м/с;
- α - коэффициент избытка воздуха;
- γ - удельный вес, Н/м³ (кгс/м³);
- ε - степень сжатия;
- μ - молекулярная масса;

- λ - степень увеличения давления в процессе $V = const$;
- π, π_k - степень повышения давления при сжатии;
- ρ - степень предварительного расширения в процессе $p = const$;
- ρ - внутренняя теплота парообразования, Дж/кг;
- ρ - плотность, кг/м³;
- ψ - коэффициент распределения тепла в процессе;
- ψ - внешняя теплота парообразования, Дж/кг;
- η_2 - термический КПД цикла;
- η_{t_k} - термический КПД цикла Карно.

Индексы

- "S" - относится к параметрам сухого насыщенного пара;
- "x" - относится к параметрам влажного насыщенного пара;
- "ж" - относится к параметрам жидкости, нагретой до температуры кипения (насыщения);
- "K" - относится к параметрам в критическом сечении сопла.

Δ (дельта, приращение) означает разность конечного и начального значений параметров и функций состояния.

Глава 1. ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ СОСТОЯНИЯ. УРАВНЕНИЕ СОСТОЯНИЯ

Вопросы для самоподготовки

1.1. Укажите верные соотношения, если $p_{абс}$ - абсолютное давление, p_m - показания манометра, $p_{вак}$ - показания вакуумметра, p_B - барометрическое давление.

- | | |
|--------------------------------|----------------------------|
| 1. $p_{абс} = p_B - p_{вак}$. | 4. $p_{абс} = p_B + p_m$. |
| 2. $p_{абс} = p_B + p_{вак}$. | 5. $p_{абс} = p_m$. |
| 3. $p_{абс} = p_B - p_m$. | |

1.2. Какие из следующих величин не равны одной технической атмосфере?

- | | |
|---|---------------------------|
| 1. $9,81 \cdot 10^4$ Н/м ² , | 4. 735,6 мм рт.ст. |
| 2. 9,81 бар, | 5. 10^4 мм вод.ст. |
| 3. 10^4 кг/м ² . | 6. 1 кг/см ² . |

1.3. Какие из следующих величин не равны одной физической атмосфере?

- | | |
|--|----------------------------------|
| 1. $1,013 \cdot 10^5$ Н/м ² . | 4. 1,013 бар. |
| 2. $1,033$ кг/см ² . | 5. $1,033 \cdot 10^4$ мм вод.ст. |
| 3. 735,6 мм рт.ст. | 6. $1,013 \cdot 10^5$ Па. |
- при 0°С.

1.4. Чему равно абсолютное давление в сосуде, если ртутный вакуумметр, присоединенный к сосуду, показывает разрежение 300 мм рт.ст.? Давление атмосферного воздуха равно 756 мм рт.ст.

- | | |
|---------------------------|--------------------------|
| 1. $14,08 \cdot 10^4$ Па. | 2. $3,41 \cdot 10^4$ Па. |
| 3. $103,6 \cdot 10^6$ Па. | |

1.5. Манометр, установленный на паровом котле, показывает 7,5 кг/см². Чему равно абсолютное давление пара в котле, если показания барометра равны 755 мм рт.ст. при температуре 15°С?

1. $83,58 \cdot 10^4$ Па, 2. $6,474$ кг/см², 3. $8,52$ кг/см².
- 1.6. Показание манометра на воздушном баллоне до выпуска было $p_{M_1} = 40$ ати, после выпуска воздуха стало $p_{M_2} = 4$ ати. Во сколько раз упало абсолютное давление воздуха в баллоне, если показание барометра $p_b = 730$ мм рт.ст. при температуре 15°C ?
1. В 10 раз. 3. В 8,25 раз.
2. В 8,21 раз. 4. В 10,5 раз.
- 1.7. Значение абсолютного давления должно быть равно $0,6 \cdot 10^5$ Па. Каково будет показание ртутного вакуумметра, если показание барометра 720 мм рт.ст. при $t = 15^\circ\text{C}$?
1. 520 мм рт.ст.. 3. 270 мм рт.ст.
2. 450 мм рт.ст. 4. 790 мм рт.ст.
- 1.8. Чему равен удельный объем газа, если его общий объем $V = 10$ м³, а масса $G = 20$ кг?
1. 0,5. 2. 2. 3. 10. 4. 30.
- 1.9. Чему равна плотность вещества, если масса $1,5$ м³ этого вещества равна 5 кг?
1. 0,3. 2. 3,5. 3. 3,33. 4. 7,5.
- 1.10. Плотность воздуха при определенных условиях равна $1,25$ кг/м³. Чему равен удельный объем воздуха при этих условиях?
1. 1,25. 3. Определить при этих данных нельзя.
2. 0,8.
- 1.11. Температура пара, выходящего из перегревателя парового котла, равна 1000°F , Чему равна температура этого пара:
- а) по стоградусной шкале температур?
б) по абсолютной шкале температур?
в) по шкале Реомюра?
1. 537,7. 3. 723.
2. 810,7. 4. 430,16.
- 1.12. Чему равен абсолютный нуль:
- а) по стоградусной шкале температур?
б) по шкале Реомюра?
в) по шкале Фаренгейта?
1. 0. 3. $-27,3$.
2. -218 . 4. $-159,6$.
- 1.13. Водяной пар перегрет на 60°C . Чему соответствует этот перегрев по шкале Фаренгейта?
1. 108. 2. 60. 3. 42.

1.14. Укажите правильную запись уравнения состояния для 1 кг газа.

1. $pV = GRT$. 3. $pV = RT$.
2. $pV = \mu RMT$. 4. $p = \rho RT$.

1.15. Укажите правильную запись уравнения состояния для произвольного количества килограммов газа.

1. $pV = GRT$. 3. $pV = RT$.
2. $pV = 8314 MT$. 4. $pV\mu = \mu RT$.

1.16. Укажите правильную запись уравнения состояния для 1 моля газа.

1. $pV = GRT$ 3. $pV = R_0T$.
2. $pV = 8314 MT$. 4. $pV\mu = \mu RT$.

1.17. Укажите правильную запись уравнения состояния для M молей газа.

1. $pV = GRT$ 3. $pV = RT$,
2. $pV = 8314 MT$. 4. $pV\mu = \mu RT$.

1.18. Какие из следующих выражений не равны газовой постоянной одного килограмма газа?

1. pV/T . 4. $pV_0/\mu T$.
2. pV/GT . 5. pV/MT .
3. $p/\rho T$.

1.19. Какие из следующих выражений не равны универсальной газовой постоянной?

1. $pV\mu/T$. 4. $\mu pV/T$.
2. pV/MT . 5. $\mu p/\rho T$.
3. pV/GT .

1.20. В каких единицах измеряется универсальная газовая постоянная $R_0 = 8314$?

1. Дж/(кмоль·К). 3. кг³м/(кмоль·К).
2. Ккал/(кмоль·К).

Задачи

1.21. Определить плотность и газовую постоянную O_2 при нормальных физических условиях ($P = 760$ мм рт.ст., $t = 0^\circ\text{C}$).

1.22. Определить давление воздуха в стандартном баллоне емкостью $V = 40$ л при температуре $t = 15^\circ\text{C}$, если масса заряженного баллона 70 кг, а масса незаряженного баллона 65 кг ($R_{возд} = 288$ Дж/(кг·К)).

1.23. Давление кислорода в баллоне емкостью 100 л равно $p_{M_1} = 9$ ати по манометру при $t_1 = 20^\circ\text{C}$. После подкачива-

ния давление увеличилось до $p_{2M} = 104$ ати по манометру при $t_2 = 70^\circ\text{C}$. Сколько килограммов кислорода подкачено в баллон? Давление окружающей среды по барометру составляет $p_B = 1$ ата.

1.24. Определить массу и объем 1/4 кмоль азота при температуре $t = 1500^\circ\text{C}$ и давлении $p = 1$ кгс/см².

1.25. Определить газовую постоянную и удельный объем азота N_2 при температуре $t = 15^\circ\text{C}$ и давлении $p = 5 \cdot 10^5$ Па.

1.26. Определить объем 1 кмоль газа при температуре $t = 1500^\circ\text{C}$ и абсолютном давлении $p = 100$ кгс/см².

1.27. Определить плотность H_2 в сосуде при температуре $t = 25^\circ\text{C}$, если ртутный вакуумметр, присоединенный к сосуду, показывает $p_{вак} = 240$ мм рт.ст., давление атмосферного воздуха $p_B = 750$ мм рт.ст.

1.28. Сосуд объемом $V = 100$ м³ наполнен газом ($R = 650$ Дж/(кг·К)). Найти массу газа в сосуде, если при температуре газа $t = 27^\circ\text{C}$ показания манометра на сосуде $h = 100$ мм вод.ст., давление атмосферного воздуха $p_B = 760$ мм рт.ст.

Глава 2. ГАЗОВЫЕ СМЕСИ. ТЕПЛОЕМКОСТЬ ГАЗОВ

Вопросы для самоподготовки

2.1. Как изменится парциальное давление i -го компонента p_i , если при постоянном объеме смеси увеличить абсолютную температуру в 2 раза?

1. Не изменится.
2. Увеличится в 2 раза.
3. Уменьшится в 2 раза.
4. Однозначного ответа дать нельзя.

2.2. Как изменится приведенный объем i -го компонента V_i , если при постоянном объеме смеси уменьшить ее абсолютную температуру в 2 раза?

1. Не изменится.
2. Увеличится в 2 раза.
3. Уменьшится в 2 раза.
4. Однозначного ответа дать нельзя.

2.3. Какие из выражений не равны парциальному давлению p_i i -го компонента смеси?

- (G - масса, M - число молей)
1. $M_i R_{cm} T_{cm} / V_i$.
 2. $p_{cm} M_i / M_{cm}$.
 3. $G_i R_i T_{cm} / V_i$.
 4. $p_{cm} V_i / V_{cm}$.

2.4. Какие из приведенных отношений соответствуют:

а) массовой доле g_i i -го компонента смеси?

б) объемной доле V_i i -го компонента смеси?

(G - масса, M - число молей, μ - относительная молекулярная масса).

- 1) $\frac{G_i}{G_{cm}}$.
- 2) $\frac{M_i}{M_{cm}}$.
- 3) $\frac{V_i}{V_{cm}}$.
- 4) $\frac{\mu_i}{\mu_{cm}}$.
- 5) $\frac{p_i}{p_{cm}}$.

2.5. Какое из выражений не равно кажущейся молекулярной массе смеси μ_{cm} ?

1. $\sum \mu_i r_i$.
2. G_{cm} / M_{cm} .
3. $\sum \mu_i g_i$.
4. $p_{cm} V_{cm} / G_{cm} T_{cm}$.
5. $p_{cm} V_{cm} / M_{cm} R_{cm} T_{cm}$.

2.6. Какое из выражений не равно газовой постоянной смеси R_{cm} ?

1. $\sum g_i R_i$.
2. R_{μ} / μ .
3. $p_{cm} V_{cm} / G_{cm} T_{cm}$.
4. $\sum \mu_i R_i$.

2.7. Какие из приведенных отношений равны r_i / g_i ?

1. R_i / R_{cm} .
2. M_i / M_{cm} .
3. μ_{cm} / μ_i .
4. p_i / p_{cm} .
5. V_i / V_{cm} .

2.8. Какие из выражений равны отношению p_i / p_{cm} ?

1. r_i .
2. g_i .
3. $r_i g_i$.
4. r_i / g_i .
5. g_i / r_i .

2.9. Сравните кажущиеся молекулярные массы μ и газовые постоянные двух смесей следующего состава:

1. $r_{N_2} = 0,8$; $r_{O_2} = 0,2$.
2. $r_{N_2} = 0,7$; $r_{O_2} = 0,2$; $r_{CO_2} = 0,1$.

2.10. Сравните удельные объемы ν и объемы молей ν_{μ} двух смесей, имеющих одинаковые давления и температуры при следующем объемном составе:

1. $r_{N_2} = 0,76$; $r_{O_2} = 0,2$; $r_{CO_2} = 0,04$.
2. $r_{N_2} = 0,8$; $r_{O_2} = 0,2$.

2.11. Сравните газовые постоянные R и давления p двух смесей при одинаковых объемах и температурах, если известны их объемные составы и массы:

1. $r_{CO_2} = 0,1$; $r_{O_2} = 0,1$; $r_{N_2} = 0,8$; $G = 10$ кг.
2. $r_{CO_2} = 0,1$; $r_{O_2} = 0,1$; $r_{N_2} = 0,7$; $r_{CO} = 0,1$; $G = 20$ кг.

2.12. Сравните температуры T и числа молей M двух газовых смесей, имеющих одинаковые объемы и давления, если известны их составы:

1. $N_2 - 1,6$ кг; $O_2 - 0,4$ кг.
2. $N_2 - 1,4$ кг; $O_2 - 0,6$ кг.

2.13. Сравните парциальные давления и приведенные объемы кислорода O_2 в двух смесях, занимающих равные объемы при одинаковой температуре и имеющих следующий состав:

1. $N_2 - 0,8$ кг; $CO_2 - 0,1$ кг; $O_2 - 0,1$ кг.
2. $N_2 - 0,7$ кг; $CO_2 - 0,2$ кг; $O_2 - 0,1$ кг.

2.14. Какие из приведенных выражений являются определенными:

- а) истинной теплоемкости c ?
 - б) средней теплоемкости $c_m = c_{t_1}^{t_2}$?
1. $q/(t_2 - t_1)$.
 2. $a + bt + dt^2 + \dots$
 3. dq/dt .
 4. $q/(t_1 - t_2)$.
 5. $a + \frac{b}{2}t + \frac{d}{3}t^2$.

2.15. Какие из выражений в общем случае не равны теплу q , необходимому для нагревания газа от t_1 до t_2 ?

1. $\int_{t_1}^{t_2} c \cdot dt$.
2. $c(t_2 - t_1)$.
3. $c_{t_1}^{t_2}(t_2 - t_1)$.
4. Q/G .
5. $c_0^{t_2} \cdot t_2 - c_0^{t_1} \cdot t_1$.

2.16. Какие из выражений в общем случае не равны средней теплоемкости $c_{t_1}^{t_2}$?

1. $[c(t_1) + c(t_2)]/2$.
2. $q/(t_2 - t_1)$.
3. $\frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} c \cdot dt$.
4. $(c_0^{t_2} \cdot t_2 - c_0^{t_1} \cdot t_1)/(t_2 - t_1)$.
5. $Q/G(t_2 - t_1)$.

2.17. Какую температуру нужно подставить вместо t в формулу истинной теплоемкости $\mu c_v = 24,3 + 0,005 t$ для расчета средней теплоемкости в процессе изохорного нагревания газа от 200°C до 1000°C ?

1. 200°C .
2. 600°C .
3. 800°C .
4. 1000°C .
5. 1200°C .

2.18. Какую температуру нужно подставить вместо t в формулу средней теплоемкости $\mu c_p = 28 + 0,0058 t$ для расчета средней теплоемкости при изобарном охлаждении газа от 1000 до 200°C ?

1. 200°C .
2. 600°C .
3. 800°C .
4. 1000°C .
5. 1200°C .

2.19. Известны табличные величины средних теплоемкостей газа c_0^t для двух температур:

$$t = 200^\circ\text{C}, \quad c_0^{200} = 0,9 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{K});$$

$$t = 1000^\circ\text{C}, \quad c_0^{1000} = 1,1 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{K}).$$

Чему равна средняя теплоемкость при охлаждении газа от 1000 до 200°C ?

1. 1,0.
2. 1,0.
3. 1,15.
4. 1,6.
5. Данных для расчета недостаточно.

2.20. Какие цифры нужно подставить вместо t и t^2 в формулу истинной теплоемкости $\mu c_p = 29 + 0,0084 t - 0,000004 t^2$ для расчета средней теплоемкости при изобарном нагревании газа от 500 до 1000°C ?

	t	t^2
1	$\frac{1}{2} (500 + 1000)$	$\frac{1}{4} (500 + 1000)^2$
2	$\frac{1}{2} (500 + 1000)$	$\frac{1}{3} (500^2 + 500 \cdot 1000 + 1000^2)$
3	$500 + 1000$	$500^2 + 500 \cdot 1000 + 1000^2$
4	$500 + 1000$	$(500 + 1000)^2$
5	$1000 - 500$	$(1000 - 500)^2$

Задачи

2.21. Найти кажущуюся молекулярную массу $\mu_{см}$ и газовую постоянную $R_{см}$, а также плотность $\rho_{см}$ и удельный объем $v_{см}$ сухих продуктов сгорания, не содержащих паров воды при $p = 750$ мм рт.ст. и $t = 800^\circ\text{C}$, если их объемный состав:

$$CO_2 - 12,8\%; \quad O_2 - 7,2\%; \quad N_2 - 80\%.$$

2.22. В состав воздуха входят по объему 21% кислорода и 79% азота. Абсолютное давление в баллоне $5 \cdot 10^5$ Па, температура 50°C , количество воздуха 4 кг. Определить для этой смеси газовую постоянную $R_{см}$, объем $V_{см}$, плотность $\rho_{см}$, число киломолей $M_{см}$, а также массы составляющих (G_{O_2} , G_{N_2}) и парциальные давления (p_{O_2} , p_{N_2}).

2.23. Анализ продуктов сгорания показал следующий их состав по объему:

$$r_{CO_2} = 0,122; \quad r_{O_2} = 0,071; \quad r_{CO} = 0,004; \quad r_{N_2} = 0,7443.$$

Определить массовые доли составляющих g_i .

2.24. Определить массовый состав газовой смеси углекислоты и азота, если парциальное давление углекислоты $p_{CO_2} = 1,2$ МПа, а давление смеси 3 МПа.

2.25. Определить газовую постоянную смеси газов, состоящей по массе из 6,67% водорода и 93,33% окиси углерода. Найти удельный объем смеси при давлении 760 мм рт.ст. и температуре 0°C .

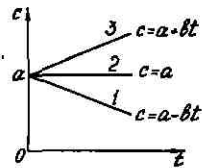
2.26. Определить газовую постоянную смеси, состоящей из 1 м³ генераторного газа и 1,5 м³ воздуха при нормальных физических условиях ($p = 760$ мм рт.ст., $t = 0^\circ\text{C}$), если плотность генераторного газа при этих условиях равна 1,2 кг/м³.

2.27. Теплоемкость метана (CH_4) $c_p = 3,06$ кДж/(кг·К). Найти c_v .

2.28. Найти среднюю массовую теплоемкость c_p углекислого газа в пределах температур от 400 до 1000^oС, если истинная теплоемкость его определяется формулой

$$c_p = 0,87 + 0,000481 t \text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К}).$$

2.29. Зависимости истинной теплоемкости от температуры имеют вид, показанный на рисунке. Построить соответствующие графики зависимости количества тепла q от температуры.



2.30. 3 кг азота (N_2) нагреваются от 100 до 1000^oС при постоянном давлении. Какое количество тепла необходимо при этом затратить, если зависимость средней теплоемкости от температуры имеет вид $\mu c_p = 28,5 + 0,0054 t$ кДж/(кмоль·К)?

2.31. Какое количество тепла нужно затратить на нагревание 5 кг воздуха от 20 до 700^oС при постоянном объеме, если средняя молярная теплоемкость зависит от температуры:

$$\mu c_p = 26,2 + 0,00222 T \text{ Дж}/(\text{кмоль}\cdot\text{К})?$$

2.32. Найти величину объемной теплоемкости c' в килоджоулях на кубический метр-Кельвин (кДж/(м³·К) кислорода для нормальных физических условий ($p = 760$ мм рт.ст., $t = 0^\circ\text{C}$) при $p = \text{const}$ и $V = \text{const}$, если $\mu c_v = 21$ кДж/(кмоль·К).

2.33. Опытным путем получена истинная молярная теплоемкость кислорода μc_v для трех температур: $0^\circ\text{C} - 29,3$ кДж/(кмоль·К); $500^\circ\text{C} - 33,6$ кДж/(кмоль·К); $1000^\circ\text{C} - 36,0$ кДж/(кмоль·К). Составить по этим данным зависимость вида

$$\mu c_p = a + bt + dt^2.$$

2.34. Определить истинные теплоемкости $c_v, c_p, \mu c_v, \mu c_p$ смеси продуктов сгорания при температуре 800 К. Состав смеси следующий: $M_{CO_2} = 0,07$ кмоль; $M_{H_2O} = 0,06$ кмоль; $M_{N_2} = 0,7$ кмоль; $M_{O_2} = 0,04$ кмоль.

Средние молярные теплоемкости μc_v равны:

$$(\mu c_v)_{CO_2} = 28,4 + 0,00792 T;$$

$$(\mu c_v)_{H_2O} = 28,75 + 0,00486 T;$$

$$(\mu c_v)_{N_2} = (\mu c_v)_{O_2} = 19,4 + 0,00222 T.$$

Глава 3. ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ С ИДЕАЛЬНЫМ ГАЗОМ

Вопросы для самоподготовки

3.1. Укажите правильное и наиболее общее выражение первого закона термодинамики в дифференциальной форме для неподвижного ТРТ.

$$1. dq = di - vdp.$$

$$3. dq = di.$$

$$2. dq = di + \frac{dw^2}{2}.$$

$$4. 0 = du + pdv.$$

3.2. В каком из приведенных ниже процессов все тепло идет на увеличение внутренней энергии?

1. Изобарный.

3. Изохорный.

2. Изотермический.

4. Адиабатный.

3.3. Какое из приведенных ниже выражений первого закона термодинамики применимо к произвольному процессу с реальным газом?

$$1. dq = c_p dT + pdv.$$

$$3. dq = di - vdp.$$

$$2. dq = c_p dT - vdp.$$

$$4. dq = di.$$

3.4. В каком из приведенных ниже процессов с идеальным газом все тепло идет на совершение работы?

1. Изобарный.

3. Адиабатный.

2. Изотермический.

4. Изохорный.

3.5. В каком из приведенных ниже процессов работа полностью затрачивается на увеличение внутренней энергии?

1. Изобарное сжатие.

4. Адиабатное сжатие.

2. Изотермическое сжатие.

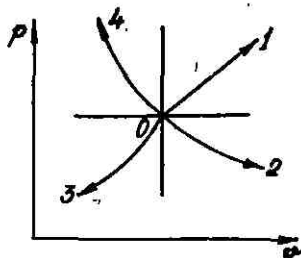
5. Адиабатное расширение.

3. Изотермическое расширение.

6. Изохорный нагрев.

рение.

3.6. Укажите процесс на pV -диаграмме, соответствующий сжатию газа с показателем $n = 1$.

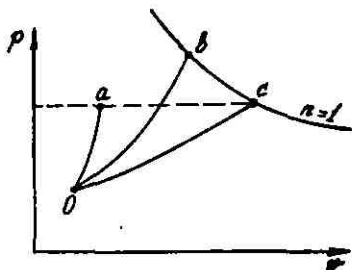


3.7. На pV -диаграмме предыдущей задачи найти процесс расширения с отрицательным показателем политропы.

3.8. Какие из следующих выражений являются уравнениями, соответствующими изохоры, адиабаты и изобары идеального газа?

1. $pV^0 = const.$
2. $pV^k = const.$
3. $pV = const.$
4. $pV^n = const, n \rightarrow \infty.$

3.9. Сравните изменение энтальпий в трех процессах ($0a, 0b, 0c$) с идеальным газом, приведенных на pV -диаграмме.



1. $\Delta i_a < \Delta i_b = \Delta i_c.$
2. $\Delta i_a < \Delta i_b < \Delta i_c.$
3. $\Delta i_a = \Delta i_c < \Delta i_b.$
4. $\Delta i_b = \Delta i_c.$

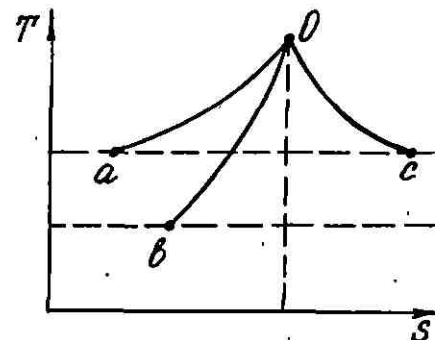
5. Для определения Δi_b недостаточно данных.

3.10. Сравните изменение внутренней энергии Δu по абсолютной величине в процессах $0a, 0b, 0c$ с идеальным газом, приведенных на TS -диаграмме.

1. $\Delta u_a = \Delta u_c > \Delta u_b.$
2. $\Delta u_a = \Delta u_c > \Delta u_b.$
3. $\Delta u_a < \Delta u_b < \Delta u_c.$

4. $\Delta u_b < \Delta u_a.$

5. Для сравнения Δu_a и Δu_c недостаточно данных.



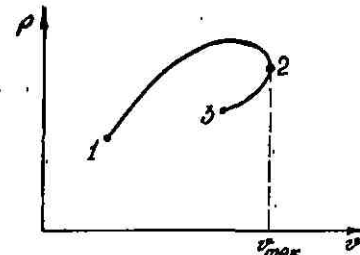
3.11. Какие из приведенных выражений являются уравнениями политропных процессов с показателями, равными соответственно $k; 0; \infty$?

1. $s = c_v \ln T + const.$
2. $s = const.$
3. $s = c_p \ln T + const.$
4. $T = const.$

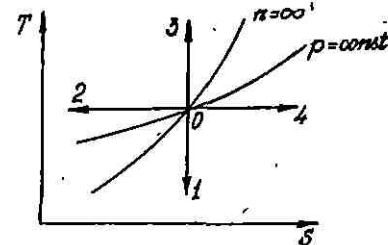
3.12. Сравните работы процессов 1-2, 1-2-3, 2-3, представленных на pV -диаграмме.

1. $l_{1-2} > l_{1-2-3} > l_{2-3}.$
2. $l_{1-2-3} > l_{1-2} > l_{2-3}.$
3. $l_{1-2} > l_{1-2-3}.$

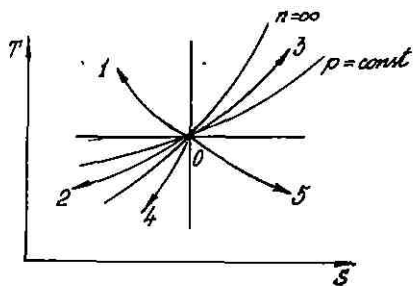
4. Для определения l_{2-3} недостаточно данных.



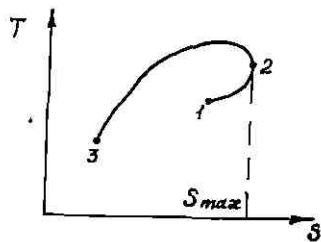
3.13. Какой из процессов, приведенных на TS -диаграмме, соответствует расширению идеального газа с показателем $n = k$?



3.14. На приведенной ниже диаграмме найдите процесс сжатия с отрицательным показателем политропы.

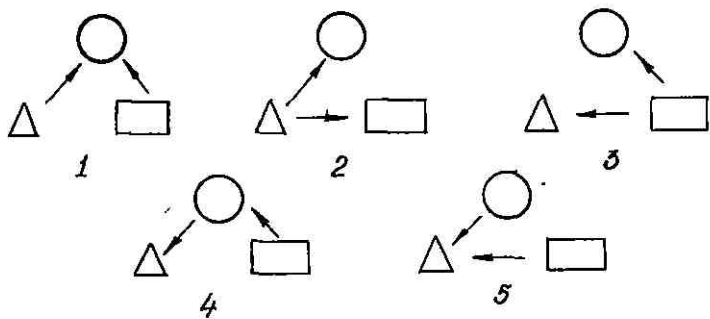


3.15. Сравните теплоты q процессов 1-2, 1-2-3, 2-3, представленных на Ts -диаграмме.

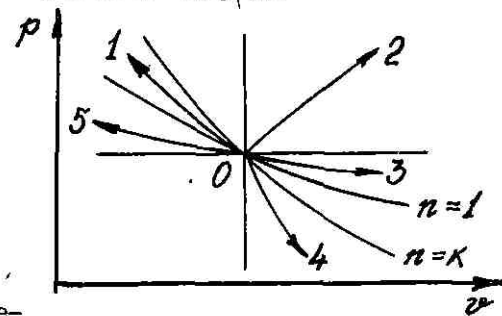
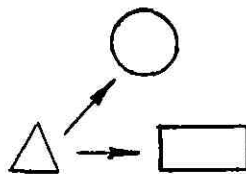


1. $q_{1-2} > q_{1-2-3} > q_{2-3}$.
2. $q_{1-2} < q_{1-2-3} < q_{2-3}$.
3. $q_{1-2} < q_{2-3}$, для сравнения q_{2-3} и q_{1-2-3} недостаточно данных.
4. $q_{1-2-3} < q_{1-2}$ для определения q_{2-3} недостаточно данных.

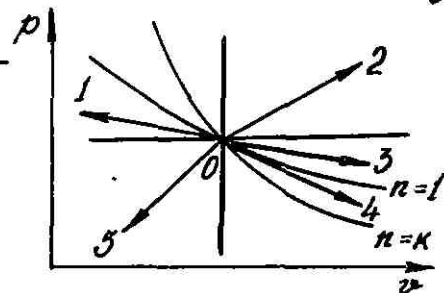
3.16. Какая из приведенных ниже схем распределения энергии соответствует политропному процессу с показателем $n = -4$? Определите по выбранной схеме направление процесса.



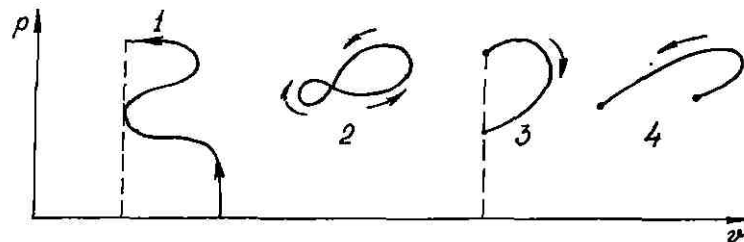
3.17. Какому из указанных политропных процессов соответствует приведенная схема распределения энергии?



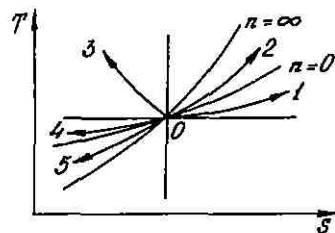
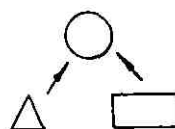
3.18. В каком из приведенных ниже политропных процессов теплоемкость отрицательна?



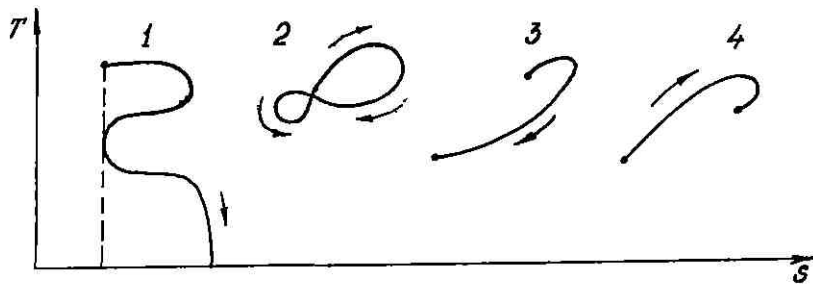
3.19. В каком из приведенных ниже процессов работа положительна? (стрелкой указано направление процесса).



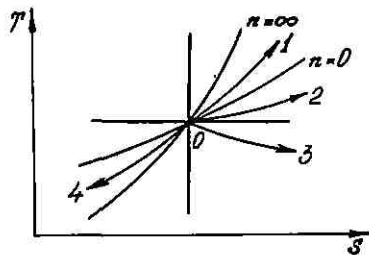
3.20. Какому из указанных политропных процессов соответствует приведенная схема распределения энергии?



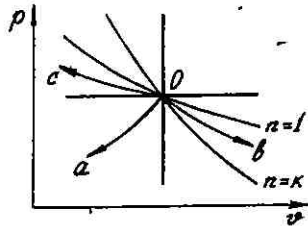
3.21. В каком из приведенных ниже процессов теплота отрицательна? Изобразите графически величину теплоты (стрелкой указано направление процесса).



3.22. В каком из приведенных ниже политропных процессов с идеальным газом теплоемкость отрицательна?



3.23. Сравните теплоемкости политропных процессов с идеальным газом.



1. $c_b < c_a < c_c$.
2. Однозначного ответа нет.
3. $c_c < c_a$, для сравнения c_a и c_b недостаточно данных.

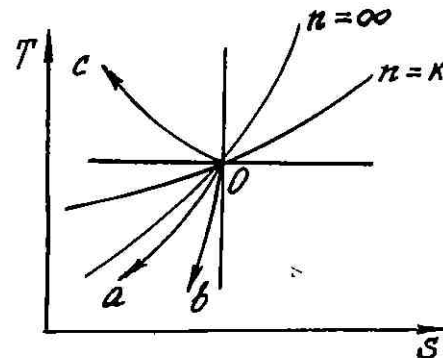
3.24. Сравните теплоемкости политропных процессов с идеальным газом.

1. Однозначного ответа нет.

2. $c_a > c_b > c_c$.

3. $c_c > c_a$, $c_c > c_b$,

4. Для сравнения c_a и c_b недостаточно данных.



Задачи

3.25. Пусковой баллон двигателя заполняется смесью продуктов сгорания так, что в конце заполнения смесь имеет давление $p_1 = 24$ бар и $T_1 = 500$ К. Определить давление в баллоне при остывании газа в нем до $t_2 = 15^\circ\text{C}$ и количество выделенной при этом теплоты, если емкость баллона $V = 500$ л, $c_v = 0,732$ кДж/(кг·К), $R = 294$ Дж/(кг·К).

3.26. В камере сгорания газовой турбины давление горючей смеси $p_1 = 1,2$ бар при $t_1 = 40^\circ\text{C}$. После подвода тепла (сгорания) при $V = \text{const}$ температура повысилась до $t_2 = 1200^\circ\text{C}$. Определить давление в конце сгорания при этой температуре.

3.27. Воздух в баллоне емкостью $V = 100$ л при давлении $p_1 = 3$ бар и температуре $t_1 = 15^\circ\text{C}$ нагревается с подводом тепла $Q = 148,4$ кДж. Определить давление и температуру воздуха в баллоне после нагревания. В расчетах принять $c_v = 0,711$ кДж/(кг·К).

3.28. В цилиндре с подвижным поршнем заключено $2,23 \cdot 10^{-2}$ м³ водорода H_2 при давлении $1,06 \cdot 10^5$ Па и температуре $T_1 = 353$ К. К водороду подводится некоторое количество тепла, в результате чего температура его увеличивается до $T_2 = 873$ К. При этом внешняя сила, действующая на поршень, остается неизменной. Показать, что описанный процесс является политропным (считать $c_v = \text{const}$), и определить показатель политропы n и коэффициент распределения тепла ψ . Определить изменение энтальпии водорода.

3.29. 2 кг этилена C_2H_4 при $t_1 = 15^\circ\text{C}$ и давлении $p = 1$ бар = const нагреваются до $t_2 = 300^\circ\text{C}$. Теплоемкость этилена $c_p = 1,714$ кДж/(кг·К). Определить для этого процесса отношение V_2/V_1 , Q , Δu , L , а также c_v и k .

3.30. Воздух при объеме $V_1 = 3000$ л расширяется изобарно ($p = const$) с увеличением объема в 1,5 раза. При этом подводится тепло $Q = 627$ кДж. Определить давление p , при котором идет процесс расширения, и величину совершенной работы расширения L , если $c_p = 1$ кДж/(кг·К).

3.31. 1 кг воздуха при объеме $V_1 = 0,2$ м³ и температуре $T = 400$ К изотермически расширяется, совершая при этом работу $L = 11760$ Дж. Определить конечное давление воздуха p_2 и количество подведенного тепла Q в процессе расширения.

3.32. Воздух при объеме $V_1 = 0,3$ м³, давлении $p_1 = 1$ бар и температуре $T_1 = 300$ К изотермически сжимается с уменьшением объема в 10 раз. В конце сжатия при постоянном объеме подводится тепло Q , равное отведенному ранее теплу при изотермическом сжатии. Определить конечные параметры этих двух процессов.

$$c_v = 0,711 \text{ кДж/(кг·К)}.$$

3.33. Воздух при давлении $p_1 = 8,8 \cdot 10^5$ Па и температуре $T_1 = 300$ К адиабатно расширяется до давления $p_2 = 0,98 \cdot 10^5$ Па. Определить конечное значение T_2 и работу расширения L . Принять $k = 1,4$.

3.34. Кислород при давлении $p_1 = 1$ бар и объеме $V_1 = 300$ л адиабатно сжимается с затратой при этом работы $L = 73500$ Дж. Определить количество кислорода G , начальную температуру T_1 и давление конца сжатия p_2 , если конечная температура $T_2 = 600$ К, $k = 1,4$.

3.35. 0,5 кг воздуха при температуре $T_1 = 600$ К адиабатно расширяется до давления $p_2 = 1,2$ бар с уменьшением внутренней энергии на $\Delta u = 80,4$ кДж. Определить начальное давление p_1 , конечный объем V_2 , температуру T_2 и работу расширения L , если $c_v = 0,711$ кДж/(кг·К), $k = 1,4$.

3.36. Определить, являются ли политропными процессы а) и б), если известны параметры в трех точках:

а) (рабочее тело - O_2) $p_1 = 100$ бар, $T_1 = 300$ К, $p_2 = 50$ бар, $T_2 = 300$, $p_3 = 10$ бар, $T_3 = 200$ К;

б) (рабочее тело - воздух) $p_1 = 60$ бар, $v_1 = 0,5$ м³; $p_2 = 15$ бар, $v_2 = 1$ м³; $p_3 = 5$ бар, $v_3 = 1,73$ м³.

3.37. В газовом двигателе политропически сжимается смесь горючего газа с воздухом ($\mu = 27,4$) так, что температура в конце сжатия на 100 К ниже температуры самовоспламенения смеси. В начале сжатия смесь имеет давление $p_1 = 0,9$ бар при $T_1 = 343$ К. Показатель политропы сжатия $n = 1,33$. Определить величину работы сжатия 1 кг смеси и во сколько раз объем смеси в конце сжатия будет меньше, чем в начале. Температура самовоспламенения смеси $T_c = 773$ К.

3.38. Начальное состояние продуктов сгорания в поршневом двигателе внутреннего сгорания задается величинами $\mu = 28,3$; $p_1 = 21$ бар, $V_1 = 2 \cdot 10^{-3}$ м³ и $T_1 = 1500$ К. Вследствие сильного догорания топлива расширение этих продуктов сгорания происходит по политропе с $n = 0,9$. Определить конечные параметры процесса p_2 , T_2 , Δu , L , Q , если при расширении объем увеличился в 4 раза. Дать схему распределения энергии для процесса. Принять $c_v = 0,91$ кДж/(кг·К), $k = 1,32$.

3.39. Компрессор всасывает в минуту 20 м³ воздуха при давлении $p_1 = 0,93$ бар и температуре $T_1 = 290$ К и сжимает его до давления $p_2 = 8,82$ бар по политропному процессу $pV^{1,28} = const$. Сжатый горячий воздух направляется в холодильник, где он охлаждается до температуры $T_3 = 310$ К при $p = const$. Определить расход охлаждающей воды, необходимый для холодильника, если температура входящей воды в холодильник $t_{вх} = 15^\circ\text{C}$, а выходящей из холодильника $t_{вых} = 30^\circ\text{C}$. Теплоемкость воздуха $c_p = 1,0$ кДж/(кг·К).

3.40. Воздух с начальной температурой $T_1 = 320$ К и объемом $V = 0,5$ м³ изотермически ($T = const$) расширяется до давления $p_2 = 2$ бар, совершая при этом работу $L = 980$ кДж. Определить массу воздуха G и его начальное давление p_1 .

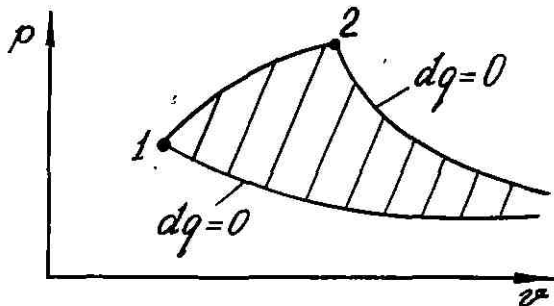
3.41. 0,5 кг некоторого газа, температура которого $T = 3000$ К, расширяется при $T = const$ с уменьшением давления в 5 раз, и при этом совершается работа $L = 995,7$ кДж. Определить, какой это газ.

3.42. Воздух при объеме $V_1 = 0,5$ м³, давлении $p_1 = 1$ бар и температуре $T = 300$ К изотермически сжимается до давления $p_2 = 10$ бар. В конце сжатия при $V = const$ к воздуху подводится тепло, равное половине отведенного ранее тепла при изотермическом сжатии. В конце изохорного процесса подводится при $p = const$ другая половина отведенного тепла изотермического сжатия. Определить суммарную работу всех трех процессов; $c_p = 1,00$ кДж/(кг·К), $k = 1,4$.

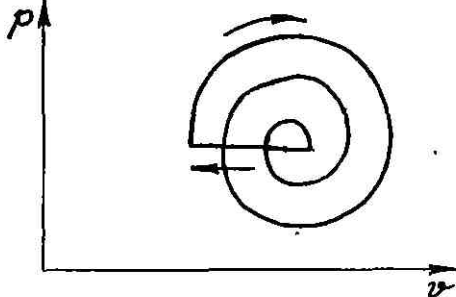
3.43. Некоторому количеству воздуха сообщается при $p = const$ тепло $Q = 41,8$ кДж. Определить совершенную при этом работу расширения, если принять $c_p = 1,0$ кДж/(кг·К), $R = 287$ Дж/(кг·К).

3.44. Найти соотношение между работой и теплом в политропном процессе Q/L .

3.45. Показать, что площадь на pV -диаграмме, образованная кривой процесса 1-2 и двумя адиабатами (см. рисунок), конечна, и дать физическое истолкование этой площади.



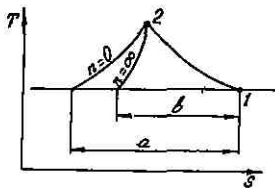
3.46. Показать графически работу замкнутого процесса на $p-v$ -диаграмме.



3.47. В цилиндре с подвижным поршнем политропно сжимается воздух от начального состояния с температурой $T_1 = 300\text{ K}$. Цилиндр помещен в среду с той же температурой. Определить, в каких пределах может изменяться показатель политропы процесса n и коэффициент распределения тепла ψ , если изменять скорость движения поршня от бесконечно малой величины до бесконечно большой. Какова должна быть скорость поршня w для обеспечения максимального и минимального значений n ?

3.48. Как изменятся пределы изменения n и ψ , если в условиях предыдущей задачи начальную температуру газа оставить прежней, а температуру среды увеличить до 600 K ?

3.49. Доказать, что отношение отрезков a/b на $T-S$ -диаграмме (см.рисунок) равно показателю политропы процесса 1-2.



3.50. Воздух из начального состояния ($p_1 = 9,8 \cdot 10^5\text{ Па}$, $T_1 = 523\text{ K}$) политропно расширяется до конечного состояния ($v_2 = 0,25\text{ м}^3/\text{кг}$, $T_2 = 573\text{ K}$). Пользуясь $T-S$ -диаграммой для 1 кг воздуха, определить v_1 , p_2 , показатель политропы n , работу l , теплоту q , изменение внутренней энергии Δu и энтальпии Δi процесса. Исходную политропу, а также политропы, используемые при графическом решении, можно приближенно заменить прямыми линиями.

3.51. В компрессоре сжимается воздух с начальными параметрами $p_1 = 9,8 \cdot 10^4\text{ Па}$, $T_1 = 273\text{ K}$, степень сжатия $\pi_k = \frac{T_2}{T_1} = 10$. Сжатие политропное $n = 1,2$. Пользуясь $T-S$ -диаграммой для 1 кг воздуха, определить параметры конечного состояния воздуха и отведенное в процессе тепло.

Глава 4. ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ ЦИКЛЫ ТЕПЛОВЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ. ПРОЦЕССЫ В КОМПРЕССОРАХ

Вопросы для самоподготовки

4.1. Какое из выражений справедливо для термического КПД цикла любого теплового двигателя?

1. $\eta_t = 1$. 2. $\eta_t > 1$ и 3. $\eta_t < 1$.

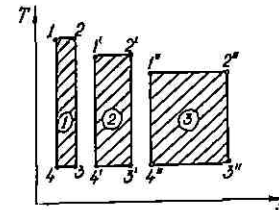
4.2. Какое из выражений справедливо для термического КПД любого прямого цикла?

1. $\eta_t = \frac{l}{q_1}$. 2. $\eta_t = \frac{q_1 - q_2}{q_1}$. 3. $\eta_t = \frac{T_1 - T_2}{T_1}$.

4.3. Какое из выражений справедливо для термического КПД цикла Карно?

1. $\eta_t = \frac{l}{q_1}$; 2. $\eta_t = \frac{q_1 - q_2}{q_1}$. 3. $\eta_t = \frac{T_1 - T_2}{T_1}$.

4.4. Какой из представленных циклов имеет наибольший термический КПД?



4.5. Укажите правильное соотношение термических КПД циклов Карно (η_{tk}) и любого другого цикла (η_t), совершающихся в одном и том же интервале температур.

1. $\eta_{tk} = \eta_t$.
2. $\eta_{tk} > \eta_t$.
3. $\eta_{tk} < \eta_t$.

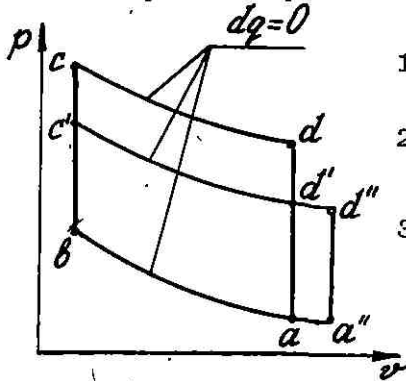
4.6. По какому процессу подводится тепло в изохорном цикле?

- 1) по любому термодинамическому процессу;
- 2) по изобарному процессу;
- 3) по изохорному процессу.

4.7. От чего зависит термический КПД изохорного цикла неполного расширения?

- 1) от температуры в камере сгорания;
- 2) от степени повышения давления в процессе подвода тепла;
- 3) от степени сжатия.

4.8. Сравните термические КПД заданных циклов.

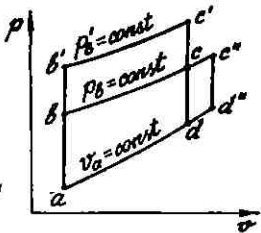


1. $\eta_{t_{abcd}} = \eta_{t_{abc'd'}} < \eta_{t_{a''bc'd''}}$.
2. $\eta_{t_{abcd}} > \eta_{t_{abc'd'}} > \eta_{t_{a''bc'd''}}$.
3. $\eta_{t_{abcd}} < \eta_{t_{abc'd'}} < \eta_{t_{a''bc'd''}}$.

4.9. От каких параметров зависит термический КПД изобарного цикла неполного расширения?

1. $(\epsilon, 1/\rho)$;
2. (ϵ) ;
3. (ρ) .

4.10. Сравните термические КПД заданных циклов.



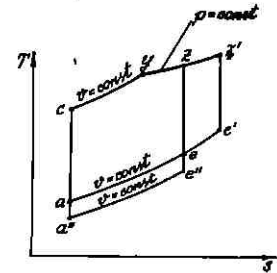
1. $\eta_{t_{abcd}} = \eta_{t_{ab'c'd}} > \eta_{t_{abc'd''}}$.
2. $\eta_{t_{abcd}} < \eta_{t_{ab'c'd}} > \eta_{t_{abc'd''}}$.
3. $\eta_{t_{abcd}} < \eta_{t_{ab'c'd}} < \eta_{t_{abc'd''}}$.

4.11. Укажите параметры, от которых зависит термический КПД смешанного цикла неполного расширения.

1. (ϵ, λ) .
2. $(\epsilon, 1/\rho)$.
3. $(\epsilon, \lambda, 1/\rho)$.

4.12. Сравните термические КПД заданных циклов.

1. $\eta_{t_{a''cuyze}} > \eta_{t_{acuyze}} > \eta_{t_{acuyze'}}$.
2. $\eta_{t_{a''cuyze}} = \eta_{t_{acuyze}} < \eta_{t_{acuyze'}}$.
3. $\eta_{t_{a''cuyze}} < \eta_{t_{acuyze}} < \eta_{t_{acuyze'}}$.

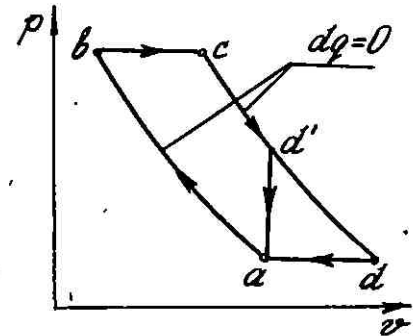


4.13. Укажите, от каких параметров зависит термический КПД изобарного цикла полного расширения.

1. (ϵ) .
2. (π) .
3. (ϵ, λ) .
4. $(\epsilon, 1/\rho)$.

4.14. Сравните термические КПД заданных циклов.

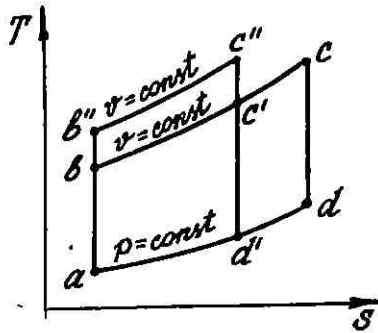
1. $\eta_{t_{abcd}} > \eta_{t_{abcd'}}$.
2. $\eta_{t_{abcd}} = \eta_{t_{abcd'}}$.
3. $\eta_{t_{abcd}} < \eta_{t_{abcd'}}$.



4.15. Укажите, от каких параметров зависит термический КПД изохорного цикла полного расширения.

1. $(\epsilon, \lambda, 1/\rho)$.
2. (ϵ, λ) .
3. (λ, ρ) .
4. (π, λ) .

4.16. Сравните термические КПД заданных циклов.



- $\eta_{t_{abcd}} > \eta_{t_{abc'd'}} < \eta_{t_{ab''c'd''}}$
- $\eta_{t_{abcd}} = \eta_{t_{abc'd'}} < \eta_{t_{ab''c'd''}}$
- $\eta_{t_{abcd}} < \eta_{t_{abc'd'}} > \eta_{t_{ab''c'd''}}$

4.17. Какое из соотношений является основной характеристикой компрессора?

- V_2/V_1
- p_2/p_1
- T_2/T_1

4.18. По какому из процессов с указанным показателем политропы n наиболее выгодно вести процесс сжатия в компрессоре с точки зрения затраты механической работы?

- $n = 1,4$
- $n = 1$
- $n = 0,8$

4.19. Чем ограничивается степень повышения давления в одноступенчатом компрессоре?

- Значением p_2 .
- Значением T_2 .
- Уменьшением объемной производительности компрессора.

4.20. Какое из соотношений соответствует степени повышения давления в двухступенчатом компрессоре?

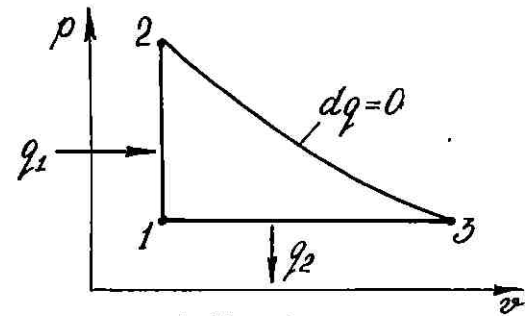
- $\frac{p_{кон}}{p_{нач}}$
- $\sqrt{\frac{p_{кон}}{p_{нач}}}$
- $\sqrt[3]{\frac{p_{кон}}{p_{нач}}}$

4.21. Какой компрессор требует меньшей затраты работы для сжатия газа от p_1 до p_2 ?

- Одноступенчатый.
- Двухступенчатый.
- Трехступенчатый.

Задачи

4.22. Для заданного цикла полного расширения параметры 1 кг воздуха в точке 1: $p_1 = 1,05$ ата, $t_1 = 27^\circ\text{C}$. При совершении цикла подводится тепло $q_1 = 200$ кДж/кг ($c_v = 0,71$ кДж/(кг·К)). Определить работу цикла и его КПД.



4.23. Газовая турбина (ГТ) работает по циклу полного расширения с подводом тепла при $p = \text{const}$, а двигатель внутреннего сгорания по тому же циклу с неполным расширением (цикл ГТ - $aczb$, цикл двигателя - $aczb'$). Определить термический КПД обоих циклов при следующих условиях:

$$p_a = 1 \text{ ата}, t_a = 0^\circ\text{C},$$

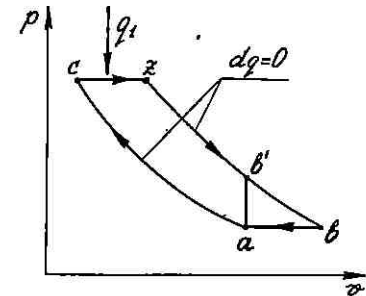
$$p_z = 55 \text{ ата}, p'_b = 3,5 \text{ ата}.$$

Расчет произвести для

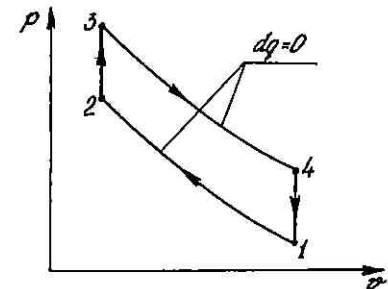
1 кг воздуха

$$(c_v = 0,71 \text{ кДж/(кг·К)},$$

$$R = 288 \text{ Дж/(кг·К)}).$$

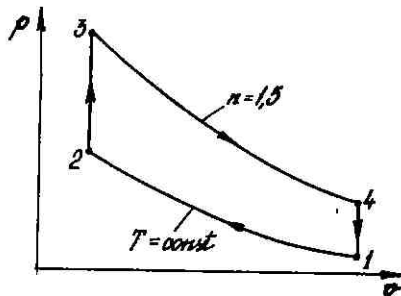


4.24. Для идеального цикла поршневого двигателя внутреннего сгорания с подводом тепла при постоянном объеме определить термический КПД и работу цикла, если $t_1 = 30^\circ\text{C}$, $p_1 = 1$ бар, $\varepsilon = \frac{v_1}{v_2} = 7$, $\lambda = \frac{p_3}{p_2} = 2,5$. Рабочее тело - воздух ($c_v = 0,71$ кДж/(кг·К), $R = 288$ Дж/(кг·К)). Определить также термический КПД цикла Карно для того же интервала температур.



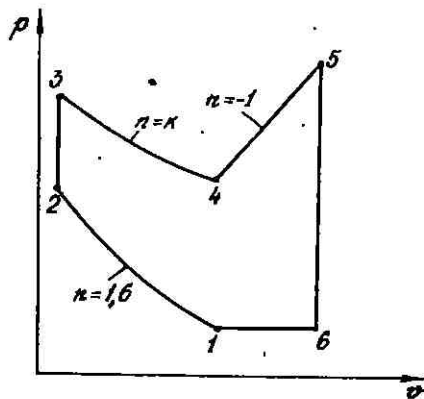
4.25. Для заданного цикла определить параметры характерных точек, термический КПД, работу цикла, если $p_1 = 1$ ата,

$v_1 = 1$ м³/кг, $p_2 = 5$ ата;
 $T_3 = 2000$ К, процесс расширения (2-3) происходит по политропе $n = 1,5$; рабочее тело - 1 кг воздуха. Кроме того, для процесса (2-3) определить изменение внутренней энергии, энтальпии, энтропии ($c_v = 0,71$ кДж/(кг·К), $R = 288$ Дж/(кг·К)).

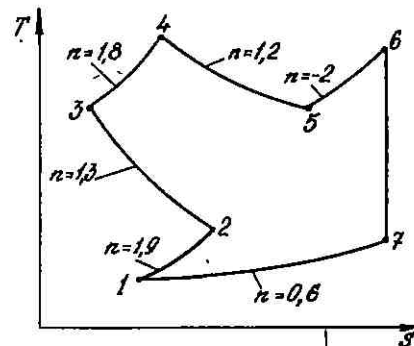


4.26. 1 кг воздуха с $p_1 = 10$ ата и $t_1 = 15^\circ\text{C}$ сжимается по адиабате с уменьшением объема в 3 раза. Затем к нему подводится тепло при $v = \text{const}$ до давления $p_3 = 7p_1$. После этого воздух расширяется по изотерме до объема $v_4 = 0,74v_1$. Затем вся совокупность процессов замыкается в цикл по политропе ($c_v = 0,71$ кДж/(кг·К), $R = 288$ Дж/(кг·К)). Определить параметры всех узловых точек, термический КПД цикла и работу. Изобразить данный цикл в $p-v$ и $T-s$ - координатах.

4.27. Перевести заданный термодинамический цикл двухатомного идеального газа ($k = 1,4$) из $p-v$ в $T-s$ - координаты.

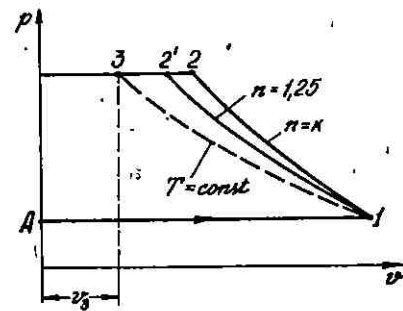


4.28. Перевести заданный термодинамический цикл двухатомного идеального газа ($k = 1,4$) из $T-s$ в $p-v$ - координаты.



4.29. Компрессор подает 100 м³ сжатого и охлажденного до первоначальной температуры воздуха за час при давлении $p_2 = 5$ ата. Давление всасываемого воздуха $p_1 = 1$ ата при температуре $t_1 = 27^\circ\text{C}$. Определить мощность двигателя для привода компрессора:

- при изотермическом сжатии ($n = 1$);
- при адиабатном сжатии ($k = 1,4$);
- при политропном сжатии ($n = 1,25$). Определить также количество отведенного тепла в этих процессах ($R_{\text{возд}} = 288$ Дж/(кг·К), $c_v = 0,71$ кДж/(кг·К)).



4.30. Воздух с начальными параметрами $t_1 = 27^\circ\text{C}$ и $p_1 = 1$ ата сжимается последовательно в трех ступенях компрессора до давления 125 ата с промежуточным охлаждением воздуха в холодильниках каждой ступени до начальной температуры. Сжатие в каждой ступени политропное с $n = 1,3$. Определить мощность двигателя для привода компрессора, если компрессор подает в час сжатый, холодный воздух в количестве 100 м³ при температуре 27°C , для случаев:

- трехступенчатого сжатия;
- двухступенчатого сжатия;
- одноступенчатого сжатия.

4.31. Потребность в сжатом воздухе для заводских пневматических установок составляет 400 кг/ч при давлении 6 ата. Определить мощность, затрачиваемую на привод компрессора для сжатия такой массы воздуха, если предположить, что сжатие будет происходить по политропе с $n = 1,28$. Начальное давление $p_1 = 0,95$ ата при $t_1 = 37^\circ\text{C}$ ($R_{\text{возд}} = 288$ Дж/(кг·К)).

4.32. Для лабораторных целей необходимо получить воздух с давлением $p = 400$ ата. Сколько ступеней сжатия с промежуточным охлаждением должен иметь компрессор, чтобы при адиабатном сжатии максимальная температура воздуха в каждой ступени была не выше 200°C ? Воздух в начале сжатия имеет параметры $p_1 = 1$ ата, $t_1 = 27^\circ\text{C}$. Работу между ступенями сжатия распределить равномерно.

4.33. Одноступенчатый компрессор всасывает 250 м³/ч воздуха при $p_1 = 0,9$ ата и $t_1 = 25^\circ\text{C}$ и сжимает его до $p_2 = 8$ ата. Какое количество воды нужно пропустить через систему охлаждения компрессора за час, если сжатие воздуха в компрессоре происходит политропно с показателем $n = 1,2$, а температура воды при ее прохождении по системе охлаждения компрессора повышается на 15°C ? $c_{\text{в,возд}} = 0,71$ кДж/(кг·К), $c_{\text{вод}} = 4,18$ кДж/(кг·К), $R_{\text{возд}} = 288$ Дж/(кг·К).

4.34. Компрессор всасывает в минуту 100 м³ воздуха при температуре 25°C и сжимает его адиабатно от давления $p_1 = 1$ ата до давления $p_2 = 8$ ата. Определить мощность двигателя для привода компрессора.

Глава 5. ПРОЦЕССЫ С ПАРАМИ. ЦИКЛЫ ПАРСИДОВЫХ УСТАНОВОК

Вопросы для самоподготовки

5.1. Напишите уравнение состояния реального газа Ван-дер-Ваальса.

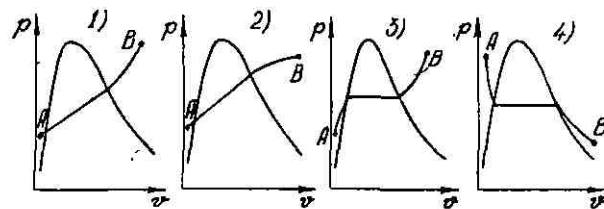
5.2. Какое из приведенных выражений определяет степень сухости влажного насыщенного пара x ?

$$1. \frac{V_S}{V_S + V_{\text{ж}}} \quad 2. \frac{G_{\text{ж}}}{V_S + V_{\text{ж}}} \quad 3. \frac{G_S}{G_S + G_{\text{ж}}} \quad 4. \frac{G_{\text{ж}}}{G_S + G_{\text{ж}}}$$

5. Ни одно из приведенных.

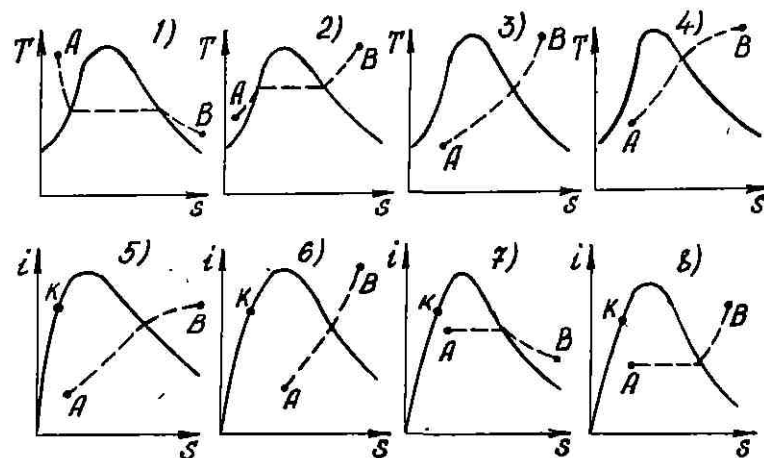
(V – объем; G – масса; S – сухой насыщенный пар; ж – жидкость).

5.3. Какой из процессов А–В, показанных на графиках, на всем протяжении может быть изотермическим?

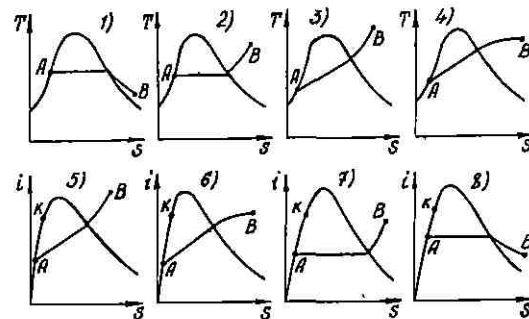


5). ни один из приведенных.

5.4. Какие из процессов А–В, показанных на графиках, на всем протяжении могут быть изохорными?



5.5. Какие из процессов, показанных на графиках, на всем протяжении могут быть изобарными?



5.6. Как изменяется степень сухости влажного насыщенного пара при адиабатном расширении?

1. Может повышаться или понижаться.
2. Повышается.
3. Понижается.
4. Не изменяется.

5.7. В каком из перечисленных ниже процессов возможно получение сухого насыщенного пара из жидкости?

1. Адиабатное сжатие.
2. Изобарное расширение.
3. Изотермическое сжатие.
4. Изохорное нагревание.
5. Ни в одном из перечисленных выше.

5.8. Можно ли путем изохорного охлаждения полностью превратить сухой насыщенный пар в жидкость?

1. Можно всегда.
2. Нельзя.
3. Можно, если $v < v_{кр}$.
4. Можно, если $T_1 > T_{кр}$.
5. Можно, если $p_1 > p_{кр}$.

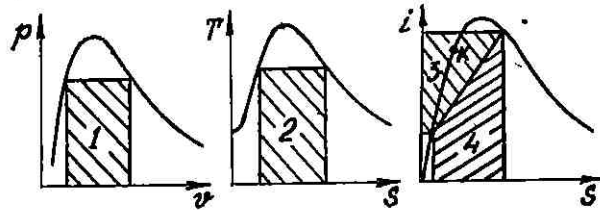
5.9. Можно ли полностью превратить сухой насыщенный пар в жидкость путем адиабатного расширения?

1. Можно всегда.
2. Можно, если $v_1 < v_{кр}$.
3. Нельзя.
4. Можно, если $p_1 < p_{кр}$.
5. Можно, если $T_1 < T_{кр}$.

5.10. В каком из перечисленных ниже процессов возможно сухой насыщенный пар полностью превратить в жидкость?

1. Адиабатное расширение.
2. Изотермическое сжатие.
3. Изохорное охлаждение.
4. Изобарное расширение.
5. Ни в одном из перечисленных выше.

5.11. Какая из показанных на графиках площадей соответствует скрытой теплоте парообразования жидкости r ?



5.12. Как изменяется скрытая теплота парообразования жидкости с повышением давления?

1. Уменьшается.
2. Увеличивается.
3. Не изменяется.
4. Нет определенной зависимости.

5.13. В каком случае скрытая теплота парообразования r равна нулю?

1. В критической точке.

2. При абсолютном вакууме ($p \neq 0$).

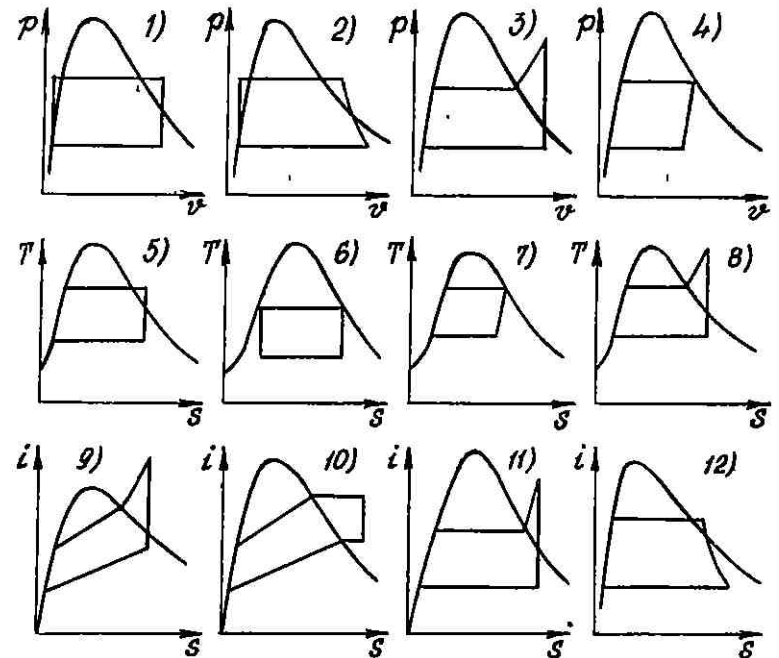
3. Не может равняться нулю никогда.

5.14. Напишите уравнение Клапейрона-Клаузиуса, связывающее величины скрытой теплоты парообразования r , температуры насыщения T_s , удельного объема сухого насыщенного пара v_s , жидкости, нагретой до температуры кипения, $v_{ж}$ и производной $\frac{dp}{dT}$.

5.15. Как изменяется степень сухости влажного насыщенного пара при изотермическом расширении?

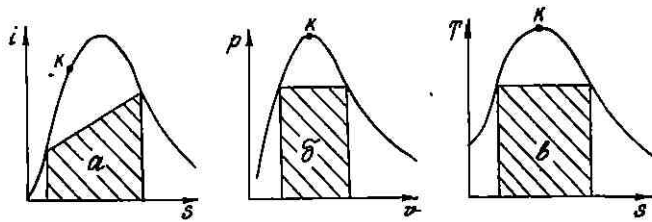
1. Повышается.
2. Понижается.
3. Неизменна.
4. Может повышаться или понижаться.

5.16. На каких графиках изображен контур парового цикла Ренкина?

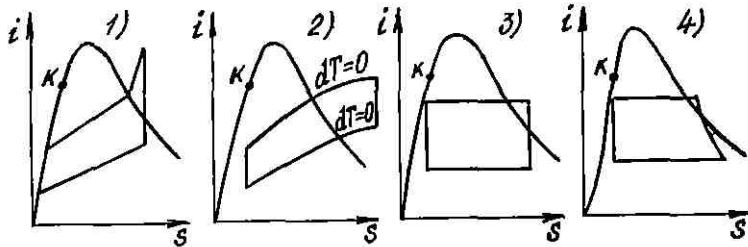


5.17. Чему соответствуют заштрихованные на графиках площади?

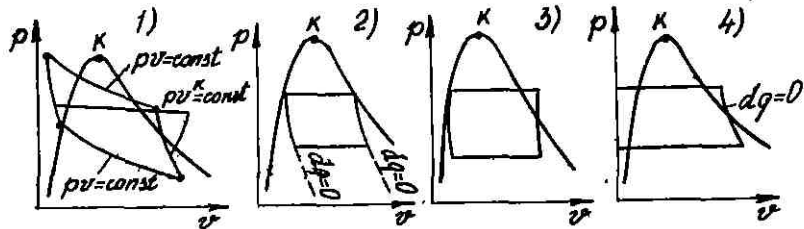
1. Скрытой теплоте парообразования r .
2. Внутренней теплоте парообразования ρ .
3. Внешней теплоте парообразования ψ .
4. Ни одной из перечисленных выше.



5.18. Укажите графики, на которых изображен контур парового цикла Карно.



5.19. На каком графике изображен паровой цикл Карно?



5.20. По какой из следующих формул можно рассчитать изменение внутренней энергии пара?

1. $c_v(T_2 - T_1)$.

4. $\int_1^2 T \cdot ds$.

2. $i_2 - i_1$.

5. Ни по одной из приведенных выше.

3. $i_2 - i_1 - (p_2 v_2 - p_1 v_1)$.

5.21. Какие из приведенных выражений равны для пара:

а) теплу изохорного процесса?

б) теплу изобарного процесса?

в) теплу изотермического процесса?

1. $T(s_2 - s_1)$. 2. $i_2 + i_1$. 3. $i_2 - i_1 - (p_2 v_2 - p_1 v_1)$.

4. Ни одно из приведенных выше.

5.22. Какие из перечисленных ниже величин равны нулю в процессах с парами?

1. Изменение внутренней энергии в изотермическом процессе.
2. Изменение энтальпии в изотермическом процессе.
3. Тепло в адиабатном процессе.
4. Работа в изохорном процессе.

Задачи

5.23. Найти с помощью is -диаграммы все параметры сухого насыщенного водяного пара при абсолютном давлении $p = 20$ бар.

5.24. Определить с помощью is -диаграммы все параметры влажного насыщенного водяного пара при абсолютном давлении 5 бар и степени сухости $x = 0,8$.

5.25. Найти с помощью is -диаграммы все параметры перегретого водяного пара при давлении 50 бар и температуре 400°C .

5.26. Определить с помощью is -диаграммы массу G 10 м^3 влажного насыщенного пара при давлении 9 бар и степени влажности 12%.

5.27. Рассчитать по is -диаграмме $\Delta J, \Delta u, q, l$ для процесса нагревания 4 кг водяного пара в закрытом сосуде до температуры $t_2 = 375^\circ\text{C}$. Начальные параметры пара: $p_1 = 5$ бар, $x_1 = 0,72$.

5.28. Определить по is -диаграмме $\Delta i, \Delta u, q, l$ при изобарном охлаждении 1 кг водяного пара, если $p = 0,5$ бар, $t_1 = 300^\circ\text{C}$, $x_2 = 0,85$.

5.29. Найти по is -диаграмме $\Delta i, \Delta u, q, l$ в процессе изотермического расширения 1 кг водяного пара от $p_1 = 8$ бар, $v_1 = 0,075 \text{ м}^3/\text{кг}$ до $v_2 = 16 \text{ м}^3/\text{кг}$.

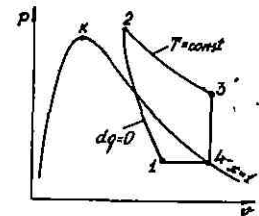
5.30. Рассчитать с помощью is -диаграммы работу адиабатного расширения 1 кг водяного пара, если $p_1 = 14$ бар, $t_1 = 300^\circ\text{C}$, $p_2 = 0,06$ бар.

5.31. Найти с помощью is -диаграммы термический КПД η_t и удельную работу парового цикла $l_{ц}$ кДж/кг, если

$p_1 = 2$ ата,

$x_1 = 0,85,$

$t_2 = 250^\circ\text{C}.$



5.32. Найти с помощью i_s -диаграммы термический КПД паросиловой установки, работающей по циклу Ренкина на водяном паре при следующих условиях: давление перед турбиной $p_1 = 20$ бар, температура $t_1 = 400^\circ\text{C}$, давление в конденсаторе $p_2 = 0,5$ бар. Определить степень сухости пара в конце расширения x_2 .

5.33. Как изменится термический КПД и степень сухости x_2 , если при прочих условиях задачи 5.32 повысить давление p_1 до 50 бар?

5.34. Как изменится термический КПД и степень сухости x , если при прочих условиях задачи 5.32 повысить температуру t_1 до 520°C ?

5.35. Как изменятся η_t и x_2 , если при прочих условиях задачи 5.32 понизить давление p_2 до 0,05 бар?

Глава 6. ИСТЕЧЕНИЕ ГАЗОВ И ПАРОВ

Вопросы для самоподготовки

6.1. Укажите правильное выражение первого закона термодинамики для адиабатного потока газа, текущего по горизонтальному неподвижному каналу без трения.

- $\frac{dw^2}{2} + du + dpv + dl_{\text{тех}} = 0$.
- $vdp + \frac{dw^2}{2} = 0$.
- $\frac{dw^2}{2} + di = 0$.
- $\frac{dw^2}{2} + di + gdh = 0$.

6.2. Укажите правильную структурную формулу для скорости истечения w газа из сопла (индексы 1, 2 относятся к входному и выходному сечениям соответственно).

- $\sqrt{RT_1} f\left(\frac{p_2}{p_1}\right)$.
- $\frac{p_1}{\sqrt{RT_1}} f\left(\frac{p_2}{p_1}\right)$.
- $RT_1 f\left(\frac{p_2}{p_1}\right)$.
- $\sqrt{RT_1} f\left(\frac{p_2}{p_1}\right)$.

6.3. Укажите правильную зависимость расхода газа G , вытекающего из сопла, от давления и температуры на входе при заданной геометрии и отношении p_2/p_1 .

- $\sqrt{RT_1}$.
- $\frac{p_1}{\sqrt{RT_1}}$.
- RT_1 .
- $\sqrt{\frac{p_1}{RT_1}}$.

6.4. Укажите правильную структурную формулу для расхода газа, вытекающего из сопла Лавала. Режим истечения - сверхзвуковой, индекс "кр" - критическое сечение, F - площадь сечения.

- $\frac{p_1}{\sqrt{RT_1}} \varphi\left(\frac{p_{кр}}{p_1}\right) F_2$.
- $\sqrt{RT_1} f\left(\frac{p_2}{p_1}\right) F_2$.
- $\frac{p_1}{\sqrt{RT_1}} \varphi\left(\frac{p_2}{p_1}\right) F_2$.
- $\frac{p_1}{\sqrt{RT_1}} \varphi\left(\frac{p_2}{p_1}\right) F_{кр}$.

6.5. Давление газа на входе в расчетное сопло Лавала $p_1 = 20$ бар, давление окружающей среды $p_H = 5$ бар. Чему равно давление p_2 на срезе сопла?

- 5,28 бар.
- 5 бар.
- 10,56 бар.
- Недостаточно данных.

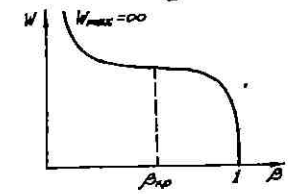
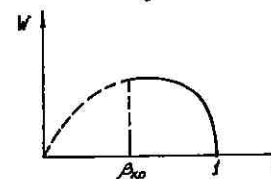
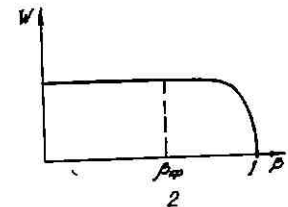
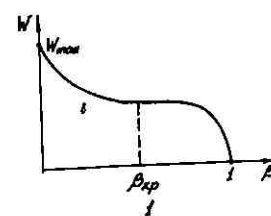
6.6. Давление воздуха на входе в сужающееся сопло $p_1 = 40$ бар, давление окружающей среды $p_H = 2,5$ бар. Чему равно давление p_2 на срезе сопла?

- 2,5 бар.
- 21,12 бар.
- 5,28 бар.
- 40 бар.

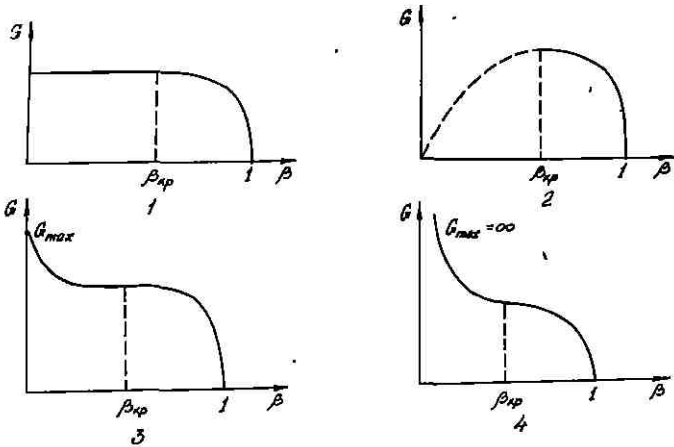
6.7. Давление воздуха на входе в сужающееся сопло $p_1 = 6$ бар, давление окружающей среды $p_H = 4,5$ бар. Чему равно давление p_2 на срезе сопла?

- 4,5 бар.
- 5,28 бар.
- 3,17 бар.
- 6,0 бар.

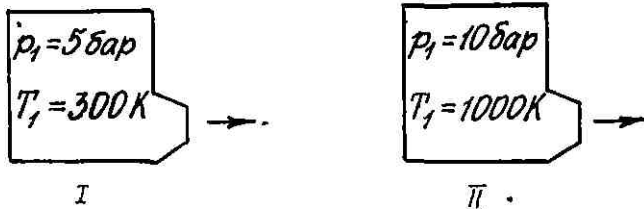
6.8. Укажите правильную зависимость скорости истечения w от отношения давлений $\beta = \frac{p_H}{p_1}$ для сужающегося сопла (α) расчетного сопла Лавала (δ).



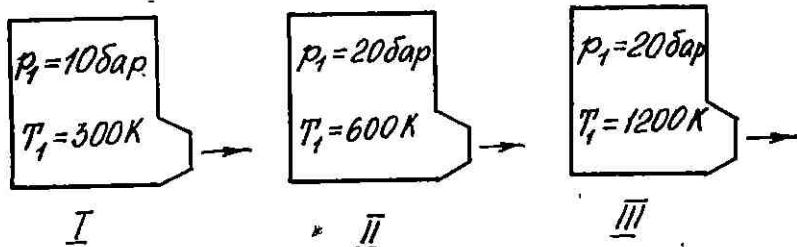
6.9. Укажите правильную зависимость расхода газа G от отношения давления $\beta = \frac{p_H}{p_1}$ для сужающегося сопла (α) и сопла Лавала (δ).



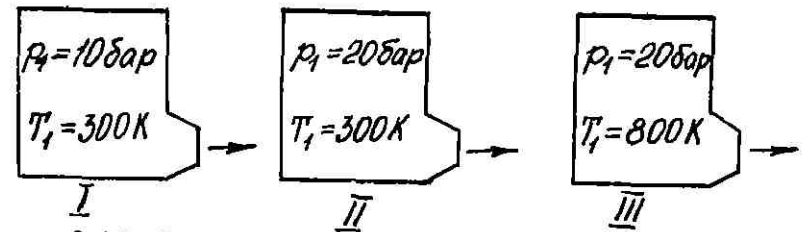
6.10. Сравните скорости w и расходы G при истечении воздуха через одинаковые сужающиеся сопла; $p_H = 1$ бар.



6.11. Сравните расходы G при истечении CO_2 через одинаковые сужающиеся сопла, $p_H = 1$ бар.

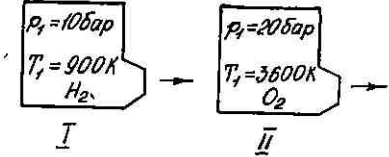


6.12. Сравните скорости истечения газа через одинаковые сужающиеся сопла, $p_H = 1$ бар.

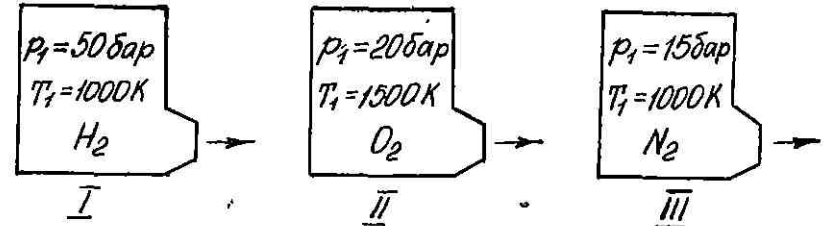


6.13. Сравните скорости и расходы при истечении газов (H_2 и O_2) из одинаковых сужающихся сопел, $p_H = 1$ бар.

- $w_I = w_{II}$; $G_I < G_{II}$.
- $w_I > w_{II}$; $G_I < G_{II}$.
- $w_I < w_{II}$; $G_I > G_{II}$.
- $w_I > w_{II}$; $G_I = G_{II}$.



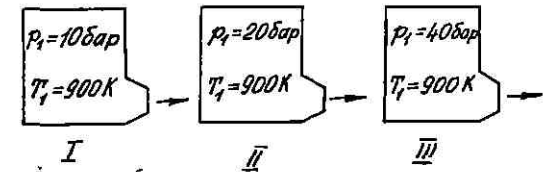
6.14. Сравните расходы при истечении газов (H_2 ; O_2 ; N_2) из одинаковых сужающихся сопел, $p_H = 1$ бар.



6.15. Для условий задачи 6.14 сравните скорости истечения w .

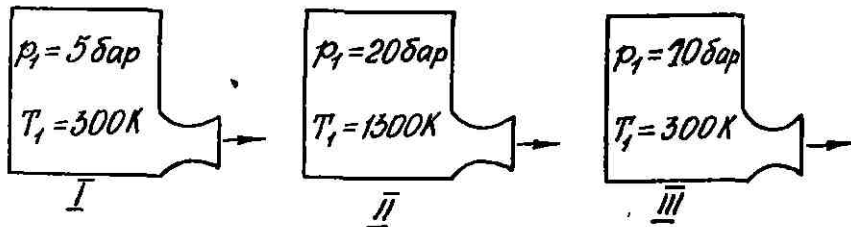
6.16. Сравните скорости истечения воздуха через одинаковые сужающиеся сопла, $p_H = 8$ бар.

- $w_I < w_{II} = w_{III}$.
- $w_I < w_{II} < w_{III}$.
- $w_I = w_{II} = w_{III}$.
- $w_{II} = w_{III}$.

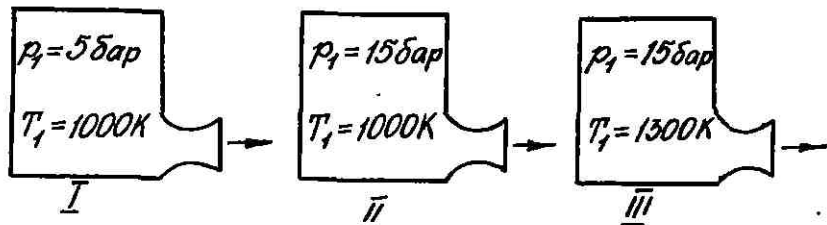


5. Для сравнения w_I и w_{II} недостаточно данных.

6.17. Сравните расходы воздуха через одинаковые сопла Лавала, $p_H = 0,5$ бар.



6.18. Сравните скорости истечения азота из расчетных сопел Лавалья, $p_H = 0,5$ бар.

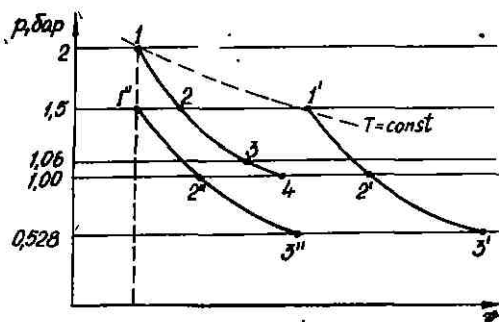


1. $w_I < w_{II} < w_{III}$.

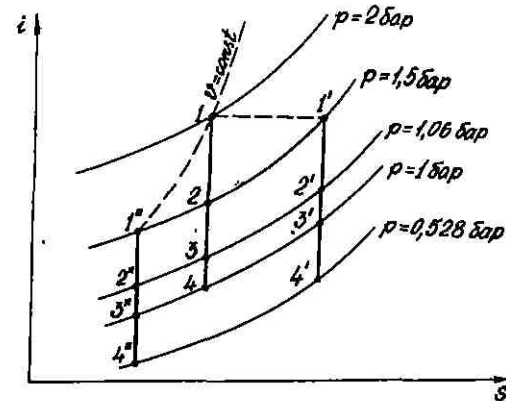
2. $w_I = w_{II} < w_{III}$.

3. Однозначного ответа дать нельзя, поскольку неизвестны относительные размеры сопел.

6.19. Газообразный азот N_2 вытекает из сосуда неограниченной емкости через сужающееся сопло в окружающую среду с давлением $p_H = 1$ бар. Давление в сосуде $p_1 = 2$ бар. Найдите правильное изображение этого процесса в $p-v$ -координатах и покажите, как изменится процесс, если p_1 уменьшить до 1,5 бар (при неизменной температуре в сосуде).



6.20. Найдите правильное изображение в $i-s$ -координатах процессов, описанных в задаче 6.19.



6.21. Воздух вытекает из расчетного сопла Лавалья, скорость истечения сверхзвуковая. Как изменить площадь сечения среза сопла F , чтобы оно осталось расчетным, если на входе в сопло:

1) растет температура?

2) растет давление?

3) растут давление и температура?

Как при этом изменится расход воздуха G ?

Варианты условия	Варианты ответов	
	F	G
1	а) Не изменится б) Уменьшится в) Не изменится	а) Уменьшится б) Не изменится в) Однозначного ответа нет
2	а) Увеличится б) Не изменится в) Увеличится	а) Однозначного ответа нет б) Увеличится в) Увеличится
3	а) Однозначного ответа нет б) Увеличится в) Увеличится	а) Однозначного ответа нет б) Однозначного ответа нет в) Увеличится

6.22. Воздух вытекает из расчетного сопла Лавалья, скорость истечения сверхзвуковая. Как изменить площадь критического сечения $F_{кр}$ для сохранения расчетного режима истечения, если на входе:

- 1) растет температура ?
 - 2) уменьшается давление ?
 - 3) растет температура и уменьшается давление ?
- Как при этом изменится расход газа G ?

Варианты условия	Варианты ответов	
	$F_{кр}$	G
1	а) Не изменится б) Не изменится в) Уменьшится	а) Однозначного ответа нет б) Уменьшится в) Не изменится
2	а) Уменьшится б) Не изменится в) Уменьшится	а) Уменьшится б) Не изменится в) Однозначного ответа нет
3	а) Уменьшится б) Однозначного ответа нет в) Уменьшится	а) Уменьшится б) Однозначного ответа нет в) Однозначного ответа нет

Задачи

6.23. Определить скорость адиабатного истечения и расход воздуха, вытекающего из сосуда неограниченной емкости через цилиндрическое сопло в окружающую среду с давлением $p_H = 15$ бар. Параметры воздуха в сосуде $p_1 = 20$ бар и $T_1 = 623$ К. Диаметр сопла $d = 35,6$ мм.

6.24. В газовой турбине параметры воздуха перед его адиабатным истечением из расчетного сопла Лавала: $p_1 = 20$ бар, $T_1 = 973$ К, $p_2 = 0,5$ бар.

В секунду через сопло протекает 20 кг воздуха. Определить скорость истечения воздуха в наиболее узком сечении сопла и на выходе и диаметры этих сечений.

6.25. Определить скорость адиабатного истечения воздуха из цилиндрического отверстия и расход при следующих данных: $p_1 = 24$ бар, $T_1 = 293$ К, $p_H = 1$ бар, диаметр отверстия $d = 3,56$ см.

6.26. Из простого сопла адиабатно вытекает воздух с давлением $p_1 = 10$ бар и $T_1 = 300$ К в среду, имеющую давление $p_H = 6$ бар. Определить объемный расход V м³/с вытекающего воздуха и его конечные параметры T_2 , v_2 , если сечение сопла $f_2 = 25$ см².

6.27. Определить расход воздуха через сужающееся сопло, если известны $p_1 = 5$ бар, $T_1 = 600$ К, $p_H = 1$ бар, $d_2 = 10$ мм. Как изменится расход при увеличении p_H до а) 2 бар; б) 4 бар?

6.28. Газ вытекает из сосуда неограниченной емкости, в котором поддерживается давление $p_1 = 10$ бар и температура $T_1 = 400$ К. Давление окружающей среды $p_H = 5$ бар. Определить режим истечения и скорость истечения для случаев, когда в сосуде находятся: а) гелий, б) водород, в) углекислый газ.

6.29. Определить скорость истечения w и расход G кислорода, вытекающего из сосуда неограниченной емкости через отверстие диаметром 15 мм. Давление и температура в сосуде $p_1 = 20$ бар, $T_1 = 300$ К соответственно. Давление окружающей среды $p_H = 1$ бар. Как изменятся w и G , если в два раза увеличить диаметр отверстия?

6.30. Параметры воздуха, вытекающего из расчетного сопла Лавала, $p_1 = 40$ бар, $T_1 = 523$ К, $p_H = 1$ бар. Диаметр критического сечения $d_{кр} = 2,5 \cdot 10^{-2}$ м. Определить расход воздуха и диаметр выходного сечения сопла d_2 . Изменяется ли G_T и d_2 , если воздух заменить на водород H_2 (при сохранении условия полного расширения)? Воздух считать двухатомным газом.

6.31. В газотурбинной установке продукты сгорания при коэффициенте избытка воздуха $\alpha = 3$ адиабатно вытекают через расчетное сопло Лавала. Параметры газа перед истечением $p_1 = 15$ бар, $T_1 = 1073$ К, $p_H = 1$ бар. Определить скорость истечения в критическом и выходном сечениях сопла и расход газа, если диаметр критического сечения сопла равен $d_{кр} = 14$ мм. В расчетах принять $K = 1,4$; $\beta_{кр} = 0,528$.

6.32. Истечение сухого насыщенного водяного пара происходит адиабатно из расчетного сопла Лавала при начальном давлении $p_1 = 14$ бар и конечном $p_H = 0,1$ бар. Пользуясь is -диаграммой, определить скорость истечения пара в критическом и выходном сечениях сопла. В расчетах принять $\beta_{кр} = 0,577$.

6.33. Водяной пар ($p_1 = 12$ бар и $T_1 = 573$ К) вытекает адиабатно из расчетного сопла Лавала в среду с давлением $p_H = 0,1$ бар. Определить скорость истечения и конечное состояние пара.

ОТВЕТЫ И РЕШЕНИЯ

Глава 1

- 1.1. 1.5. 1.2. 2. 1.3. 3. 1.4. 2. 1.5.
 1.3. 1.6. 2.
 1.7. 3. 1.8. 1. 1.9. 3. 1.10. 2. 1.11a. 1.
 1.11b. 2. 1.11в. 4.
 1.12a. 3. 1.12б. 2. 1.12в. 4. 1.13. 1.
 1.14. 3.4. 1.15. 1.
 1.16. 4. 1.17. 2. 1.18. 5. 1.19. 3. 1.20. 1.
 1.21. $R = 259,8 \text{ Дж/кг}$, $\rho = 1,4 \text{ кг/м}^3$.
 1.22. $G_{\text{возд}} = 70 - 65 = 5 \text{ кг}$;
 $\rho = \frac{GR_T}{v} = \frac{5 \cdot 288 \cdot 288}{40 \cdot 10^{-3}} = 103,68 \cdot 10^5 \text{ Па}$.
 1.23. $G_I = \frac{p_I v}{R T_I} = \frac{(9+1) \cdot 9,81 \cdot 10^4 \cdot 100 \cdot 10^{-3}}{259,8 \cdot 293} = 1,288 \text{ кг}$;
 $R_{O_2} = \frac{R \mu}{\mu_{O_2}} = \frac{8314}{32} = 259,8 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К)}$;
 $G_2 = \frac{p_2 v}{R T_2} = \frac{(104+1) \cdot 9,81 \cdot 10^4 \cdot 100 \cdot 10^{-3}}{259,8 \cdot 343} = 11,56 \text{ кг}$.
 $G_{\text{подк}} = 11,56 - 1,288 = 10,27 \text{ кг}$.
 1.24. $G = 7 \text{ кг}$, $V = 37,56 \text{ м}^3$.
 1.25. $R = 296,9 \text{ Дж/кг} \cdot \text{К}$, $v = 0,171 \text{ м}^3/\text{кг}$.
 1.26. $V_{\mu} = 1,5 \text{ м}^3/\text{кмоль}$.
 1.27. $p_{\text{абс}} = p_{\text{б}} - p_{\text{вак}} = 750 - 240 = 510 \text{ мм.рт.ст.}$,
 $R_{H_2} = \frac{R \mu}{\mu_{H_2}} = \frac{8314}{2} = 4157 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К)}$,
 $\rho = \frac{p}{R T} = \frac{510}{735,6} \cdot 9,81 \cdot 10^4 = 0,055 \text{ кг/м}^3$.
 1.28. $G = 52,3 \text{ кг}$.

Глава 2.

- 2.1. 2. 2.2. 1. 2.3. 3. 2.4. а) 1.
 б) 2,3,5. 2.5. 3. 2.6. 4. 2.7. 1,2.
 2.8. 1.

2.9. $\mu_I < \mu_{II}$, так как в смеси II выше содержание "тяжелого" (с большим μ) компонента CO_2 ; $R_I > R_{II}$, так как $R = \frac{8314}{\mu}$.

2.10. 1. $v_{\mu_I} - v_{\mu_{II}}$ согласно следствию из закона Авогадро. 2. Из уравнения состояния $p v = R T$ следует, что $v \sim R$, но $R_I < R_{II}$, так как $\mu_I > \mu_{II}$ (смотри вопрос 2.9). Следовательно, $v_{\mu_I} < v_{\mu_{II}}$.

2.11. 1. $R_I = R_{II}$, так как $\mu_I = \mu_{II}$ ($\mu_{N_2} = \mu_{CO} = 28$). 2. Из уравнения состояния $p v = G R T$ следует, что $p \sim R$. Поэтому $p_I < p_{II}$.

2.12. 1. $M = \frac{G}{\mu}$, но $G_I = G_{II}$, а $\mu_I < \mu_{II}$, следовательно, $M_I > M_{II}$. 2. Из уравнения состояния $p v = 8314 M T$ следует, что $T_{II} > T_I$.

2.13. 1. В уравнении состояния $p_i V_{cm} = G_i R_i T_{cm}$ все остальные величины одинаковы, следовательно $p_{O_2 I} = p_{O_2 II}$. 2. $\mu_I < \mu_{II}$, но $V_i = \frac{V_{cm}}{G_i} = \rho_i \frac{V_{cm}}{\mu_i}$, откуда $V_i \sim \mu_{cm}$. Следовательно, $V_{O_2 I} < V_{O_2 II}$.

2.14. а) 3, б) 1. 2.15. 2. 2.16. 1.
 2.17. 2. 2.18. 5.

2.19. 3; $C_{t_2}^{t_2} = \frac{C_0^{t_2} \cdot t_2 - C_0^{t_1} \cdot t_1}{t_2 - t_1} = \frac{0,9 \cdot 200 - 1,1 \cdot 100}{200 - 100} = 1,15 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{К)}$.

2.20. 2.

2.21. $\mu_{cm} = \sum \mu_i r_i = 44 \cdot 0,128 + 32 \cdot 0,072 + 28 \cdot 0,80 = 30,35$;

$R_{cm} = \frac{8314}{\mu_{cm}} = 274 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К)}$;

$v = \frac{R T}{p} = \frac{274 \cdot 1078 \cdot 735,6}{750 \cdot 9,8 \cdot 10^4} = 2,95 \text{ м}^3/\text{кг}$;

$\rho = \frac{1}{v} = 0,338 \text{ кг/м}^3$.

2.22. $\mu_{cm} = \sum \mu_i r_i = 0,21 \cdot 32 + 0,79 \cdot 28 = 28,9$;

$R_{cm} = \frac{8314}{\mu_{cm}} = 287 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К)}$.

$$M_{cm} = \frac{G_{cm}}{\mu_{cm}} = \frac{4}{28,9} = 0,138 \text{ кмоль}, \quad \rho_{cm} = \frac{p_{cm}}{R_{cm} T_{cm}} = \frac{5 \cdot 10^5}{28 \cdot 323} = 5,38 \text{ кг/м}^3;$$

$$V_{cm} = \frac{G_{cm}}{\rho_{cm}} = \frac{4}{5,38} = 0,742 \text{ м}^3; \quad \rho_{O_2} = \rho_{O_2} \frac{\mu_{O_2}}{\mu_{cm}} = 0,21 \frac{32}{28,9} = 0,232;$$

$$G_{N_2} = 0,768; \quad G_{O_2} = G_{cm} \rho_{O_2} = 0,93 \text{ кг}; \quad G_{N_2} = 3,07 \text{ кг}.$$

2.23. $\rho_i = \rho_i \mu_i / \mu_{cm}; \quad \rho_{CO_2} = 0,177; \quad \rho_{O_2} = 0,075;$

$$\rho_{CO} = 0,0037; \quad \rho_{N_2} = 0,7443.$$

2.24. $\rho_{CO_2} = 0,095; \quad \rho_{N_2} = 0,905.$

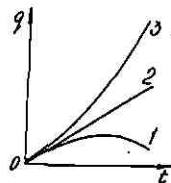
2.25. $R_{cm} = 555 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К)}; \quad v_{cm} = 1,48 \text{ м}^3/\text{кг}.$

2.26. $R_{cm} = 295 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К)}; \quad p_{гг} = 0,4 p_{cm}; \quad p_{возд} = 0,6 p_{cm}.$

2.27. $2,54 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{К)}.$

2.28. $c_{pM} = c_p \Big|_{400}^{1000} = 0,87 + 0,000481 \frac{400+1000}{2} = 1,206 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{К)}.$

2.29.



1) $q = at - \frac{b}{2} t^2;$

2) $q = at;$

3) $q = at + \frac{b}{2} t^2.$

2.30. $Q = G \cdot c_{pM} (t_2 - t_1) = 3 \cdot \frac{28,5 + 0,0054(100+1000)}{28} \times (1000 - 100) = 3330 \text{ кДж}.$

2.31. $2580 \text{ кДж}.$

2.32. $\mu c_p = \mu c_v + R_{\mu} = 29,314 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{К)};$

при нормальных условиях; $\mu_{\mu} = 22,4 \text{ м}^3/\text{кмоль};$

$$c_v' = \frac{\mu c_v}{\mu_{\mu}} = \frac{21}{22,4} = 0,937 \text{ кДж/(м}^3 \cdot \text{К)}; \quad c_p' = \frac{29,314}{22,4} = 1,31 \text{ кДж/(м}^3 \cdot \text{К)}.$$

2.33. Решение системы уравнений: $a = 29,3; a + b \cdot 500 + d \cdot 500^2 = 33,6; a + b \cdot 1000 + d \cdot 1000^2 = 36$ дает следующие значения коэффициентов:

$$a = 0,29,3; \quad b = 0,0105; \quad d = -0,00000378.$$

Искомая зависимость $\mu c_p = 29,3 + 0,0105 t - 0,00000378 t^2 \text{ кДж/(кмоль} \cdot \text{К)}.$

2.34. Истинная теплоемкость μc_v смеси равна:

$$(\mu c_v)_{cm} = \sum_i (\mu c_v)_i = (28,4 + 2 \cdot 0,00792 \cdot 800) \frac{0,07}{0,87} +$$

$$+ (28,75 + 2 \cdot 0,00486) \frac{0,06}{0,87} + (19,4 + 2 \cdot 0,00222 \cdot 800) \frac{0,7 + 0,04}{0,87} =$$

$$= 25,07 \text{ кДж/(кмоль} \cdot \text{К)}; \quad (\mu c_p)_{cm} = (\mu c_v)_{cm} + 8,314 = 33,38 \text{ кДж/(кмоль} \cdot \text{К)};$$

$$(c_v)_{cm} = \frac{(\mu c_v)_{cm}}{\mu_{cm}} = 0,87 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{К)}; \quad (c_p)_{cm} = 1,16 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{К)};$$

$$(\mu_{cm} = 44 \frac{0,07}{0,87} + 18 \frac{0,06}{0,87} + 28 \frac{0,7}{0,87} + 32 \frac{0,04}{0,87} = 28,8).$$

Глава 3

3.1. 1. 3.2. 3. 3.3. 3. 3.4. 2.

3.5. 4. 3.6. 4. 3.6. 4. 3.7. 1.

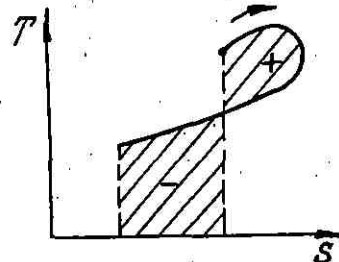
3.8. Изохора 4, адиабата 2, изобара 1. 3.9. 1.

3.10. 2. 3.11. К-2, 0-3, -1. 3.12. 1.

3.13. 1. 3.14. 2. 3.15. 1. 3.16. 1.

3.17. 4. 3.18. 4. 3.19. 3. 3.20. 5.

3.21. 3. Теплота есть разность заштрихованных на диаграмме площадей.



3.22. 3. 3.23. 1. 3.24. 2. 3.25. $p_2 = 13,8 \text{ бар}; \quad Q = 1237 \text{ кДж}.$ 3.26. $p_2 = 5,65 \text{ бар}$

3.27. $T_2 = 875 \text{ К}; \quad p_2 = 9,1 \text{ бар}.$ 3.28. $n = 0,$

$$\psi = 0,714, \quad \Delta J = 8,42 \text{ кДж.}$$

$$\underline{3.29.} \quad \frac{V_2}{V_1} = 1,99, \quad Q = 978 \text{ кДж,} \quad L = 168 \text{ кДж,}$$

$$\Delta U = 810 \text{ кДж,} \quad c_{\eta} = 1,42 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{К),} \quad k = \frac{c_p}{c_v} = 1,2.$$

$$\underline{3.30.} \quad p = 1,2 \cdot 10^5 \text{ Па,} \quad L = 180 \text{ кДж.}$$

3.31. Из формулы работы $L = GRT \ln V_2/V_1$ находим V_2/V_1 и V_2 , а затем по уравнению состояния $p_2 V_2 = GRT$ давление $p_2 = 2,11 \cdot 10^5 \text{ Па}$, при $T = \text{const}$, $Q = L = 11760 \text{ Дж}$.

$$\underline{3.32.} \quad p_2 = 10 \text{ бар,} \quad V_2 = 0,03 \text{ м}^3, \quad p_3 = 19,3 \text{ бар,}$$

$$T_3 = 580 \text{ К.}$$

$$\underline{3.33.} \quad T_2 = 293 \text{ К,} \quad l = 184200 \text{ Дж/кг.}$$

$$\underline{3.34.} \quad G = 0,378 \text{ кг,} \quad T_1 = 300 \text{ К,} \quad p_2 = 11,3 \text{ бар,}$$

$$V_2 = 0,053 \text{ м}^3.$$

$$\underline{3.35.} \quad p_1 = 5,78 \text{ бар,} \quad V_2 = 0,51 \text{ м}^3, \quad T_2 = 415 \text{ К,}$$

$$L = 35,3 \text{ кДж.}$$

3.36. Процесс а) не является политропным, так как если в двух точках политропного процесса температура одинакова, то и весь процесс должен быть изотермическим; процесс б) политропный с $n = 2$.

$$\underline{3.37.} \quad l = -304 \text{ кДж/кг,} \quad \frac{V_1}{V_2} \approx 7.$$

$$\underline{3.38.} \quad p_2 = 6,04 \text{ бар,} \quad T_2 = 1725 \text{ К,} \quad L = 61,7 \text{ кДж,}$$

$$\Delta U = 19,3 \text{ кДж,} \quad Q = 81 \text{ кДж.}$$

$$\underline{3.39.} \quad G = 0,983 \text{ кг/с.}$$

3.40. Из формулы работы $L = p_1 V_1 \ln \frac{p_1}{p_2}$ получаем уравнение $p_1 \ln \frac{p_1}{p_2} = 1960000 \text{ Па}$. Графическое решение дает $p_1 = 11,5 \text{ бар}$. Из уравнения состояния $G = \frac{p_1 V_1}{RT} = 6,15 \text{ кг}$.

3.41. $L = GRT \ln p_1/p_2$. Отсюда находим R и $\mu = \frac{8314}{R} = 2$. Следовательно, газ - водород.

$$\underline{3.42.} \quad L_{\Sigma} = 86,5 \text{ кДж.}$$

$$\underline{3.43.} \quad Q = G c_p \Delta T, \quad L = p \Delta V = G R \Delta T, \quad \text{откуда} \quad \frac{Q}{L} = \frac{c_p}{R},$$

$$L = 11,96 \text{ кДж.}$$

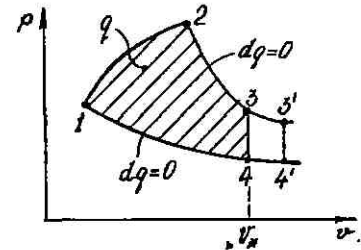
$$\underline{3.44.} \quad \frac{Q}{L} = \frac{n-k}{n-1}.$$

3.45. Соединим адиабаты изохорой (см. рисунок) и рассмотрим замкнутый процесс (цикл) 12341. Так как начальное и конечное состояния этого процесса совпадают, то $\Delta u = 0$; из первого закона термодинамики $q = l$, где $q = q_{1-2} + q_{3-4} -$

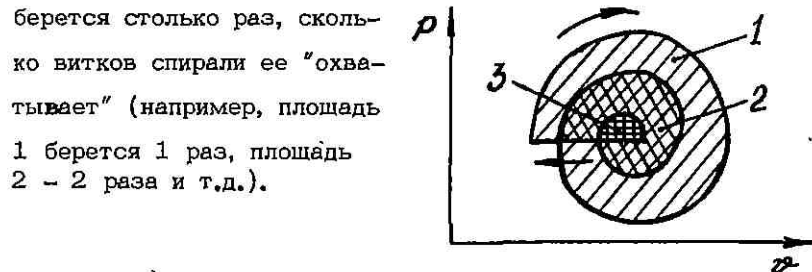
алгебраическая сумма теплот процессов 1-2 и 3-4, l - работа цикла. Тогда заштрихованная площадь есть q . Устремим объем V_x к бесконечности (процесс 3'-4' и т.д.), при этом начало и конец процесса будут

сближаться так, что тепло $q_{3-4} = c_v (T_4 - T_3) \rightarrow 0$.

Отсюда $q \rightarrow q_{1-2}$, т.е. искомая площадь конечна и представляет собой тепло процесса 1 - 2.



3.46. Работа процесса есть сумма площадей, заштрихованных различным образом (см. рисунок), причем каждая площадь берется столько раз, сколько витков спирали ее "охватывает" (например, площадь 1 берется 1 раз, площадь 2 - 2 раза и т.д.).



3.47. Величина n зависит от скорости поршня w . При малых w в каждый момент ГРТ находится "почти" в равновесии с окружающей средой, т.е. при $w \rightarrow 0$ $T = \text{const}$, $n = 1$. С увеличением w газ не успевает охладиться до температуры среды и часть работы идет на увеличение внутренней энергии. При $w \rightarrow \infty$ теплообменом со средой можно пренебречь, $n = k$. Таким образом, $1 < n < k$, $0 > \psi > 0 - \infty$.

$$\underline{3.48.} \quad k < n < \infty, \quad \infty > \psi > 1.$$

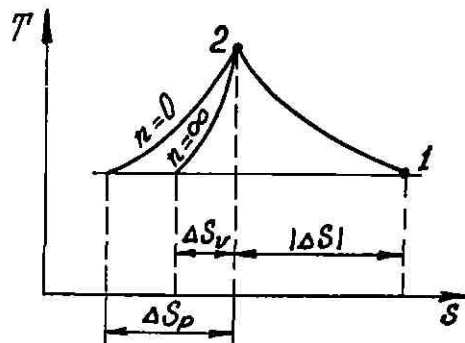
$$\underline{3.49.}$$

$$n = \frac{c - c_p}{c - c_v} = \frac{\Delta s - \Delta s_p}{\Delta s - \Delta s_v}, \quad \text{где} \quad \Delta s = c \ln \frac{T_2}{T_1}, \quad \Delta s_{p,v} = c_{p,v} \ln \frac{T_2}{T_1}.$$

Для выбранного процесса Δs и Δs_p имеют различные знаки (то же для Δs и Δs_v), причем знаки $\Delta s - \Delta s_p$ и $\Delta s - \Delta s_v$

одинаковы. Отсюда

$$n = \frac{|\Delta s| + |\Delta s_p|}{|\Delta s| + |\Delta s_v|} < \frac{a}{b}.$$



3.50.

$$v_1 = 0,145 \text{ м}^3/\text{кг},$$

$$p_2 = 6,8 \cdot 10^5 \text{ Па}, \quad n = 0,71,$$

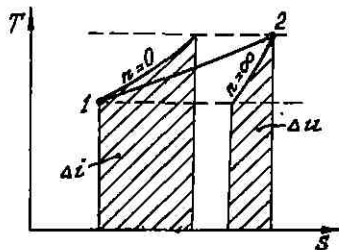
$$\Delta u = 3 \cdot 5,5 \text{ кДж/кг},$$

$$\Delta l = 50,5 \text{ кДж/кг},$$

$$q = 114,0 \text{ кДж/кг},$$

$$l = 79,3 \text{ кДж/кг.}$$

Графическое определение Δu и Δl показано на рисунке.



3.51. $v_2 = 0,117 \text{ м}^3/\text{кг}, \quad T_2 = 403 \text{ К}, \quad q = \text{кДж/кг}.$

Глава 4

4.1.	3.	4.2.	1,2.	4.3.	1,2,3.	4.4.	1.
4.5.	2.	4.6.	3.	4.7.	3.	4.8.	1.
4.10.	2.	4.11.	3.	4.12.	1.	4.13.	1,2.
4.14.	1.	4.15.	2,4.	4.16.	1.	4.17.	2.
4.18.	3.	4.19.	2,3.	4.20.	2.	4.21.	3.

4.22. $q_{1-2} = c_v(T_2 - T_1);$

$$T_2 = \frac{q_1 + c_v T_1}{c_v} = \frac{200 + 0,71(27 + 273)}{0,71} = 581,7 \text{ К};$$

$$p_2 = p_1 \cdot \frac{T_2}{T_1} = 1,05 \frac{581,7}{300} = 2,03 \text{ ага};$$

$$T_3 = T_2 \left(\frac{p_3}{p_2} \right)^{\frac{k-1}{k}} = 581,7 \left(\frac{1,05}{2,03} \right)^{1,4} = 482 \text{ К};$$

$$q_{3-1} = c_p(T_1 - T_3) = 0,71 \cdot 1,4(300 - 482) = -181 \text{ кДж/кг};$$

$$l_4 = q_{1-2} - q_{3-1} = 200 - 181 = 19 \text{ кДж/кг};$$

$$\eta_t = \frac{l}{q_1} = \frac{19}{200} = 0,095.$$

4.23.

$$T_c = T_a \left(\frac{p_c}{p_a} \right)^{\frac{k-1}{k}} = 273 \left(\frac{55}{1} \right)^{\frac{1,4-1}{1,4}} = 855,4 \text{ К};$$

$$v_a = \frac{RT_a}{p_a} = \frac{288 \cdot 273}{9,81 \cdot 10^4} = 0,8 \text{ м}^3/\text{кг};$$

$$T_{b'} = \frac{p_{b'} v_{b'}}{R} = \frac{3,5 \cdot 9,81 \cdot 10^4 \cdot 0,8}{288} = 953 \text{ К};$$

$$T_z = T_{b'} \left(\frac{p_z}{p_{b'}} \right)^{\frac{k-1}{k}} = 953 \left(\frac{55}{3,5} \right)^{\frac{1,4-1}{1,4}} = 2089 \text{ К};$$

$$T_b = T_z \left(\frac{p_b}{p_z} \right)^{\frac{k-1}{k}} = 2089 \left(\frac{1}{55} \right)^{\frac{1,4-1}{1,4}} = 666,7 \text{ К};$$

$$q_{c-z} = c_p(T_z - T_c) = 0,71 \cdot 1,4(2089 - 855,4) = 1226,2 \text{ кДж/кг};$$

$$q_{b-a} = c_p(T_a - T_b) = 0,71 \cdot 1,4(273 - 666,7) = -391,3 \text{ кДж/кг};$$

$$q_{b'-a} = c_v(T_a - T_{b'}) = 0,71 \cdot (273 - 953) = -482,8 \text{ кДж/кг};$$

$$\eta_{t_{aczb}} = \frac{q_{c-z} - q_{b-a}}{q_{c-z}} = \frac{1226,2 - 391,3}{1226} = 0,68.$$

$$\eta_{t_{aczb'}} = \frac{q_{c-z} - q_{b'-a}}{q_{c-z}} = \frac{1226,2 - 482,8}{1226,2} = 0,6.$$

4.24.

$$\eta_t = 0,54;$$

$$\eta_{tk} = 0,81.$$

4.25.

$$T_1 = \frac{p_1 v_1}{R} = \frac{1 \cdot 9,81 \cdot 10^4 \cdot 1}{288} = 340 \text{ К};$$

$$v_2 = v_1 \cdot \frac{p_1}{p_2} = 1 \cdot \frac{1}{5} = 0,2 \text{ м}^3/\text{кг};$$

$$p_3 = p_2 \cdot \frac{T_3}{T_2} = 5 \cdot \frac{2000}{340} = 29,4 \text{ ага};$$

$$T_4 = T_3 \left(\frac{V_3}{V_4} \right)^{\gamma-1} = 2000 \left(\frac{0,2}{1} \right)^{1,5-1} = 894,4 \text{ К};$$

$$p_4 = p_1 \frac{T_4}{T_1} = 1 \cdot \frac{894,4}{340} = 2,63 \text{ ага};$$

$$q_{1-2} = R T_1 \ln \frac{p_1}{p_2} = 288 \cdot 340 \ln \frac{1}{5} = -157596 \text{ Дж/кг} = -157,6 \text{ кДж/кг};$$

$$q_{2-3} = c_v (T_3 - T_2) = 0,71 (2000 - 340) = 1178,6 \text{ кДж/кг};$$

$$q_{3-4} = c_v \frac{\kappa - k}{\kappa - 1} (T_4 - T_3) = 0,71 \frac{1,5 - 1,4}{1,5 - 1} (894,4 - 2000) = -157 \text{ кДж/кг};$$

$$q_{4-1} = c_v (T_1 - T_4) = 0,71 (340 - 894,4) = -939,6 \text{ кДж/кг};$$

$$l_4 = q_{2-3} - q_{1-2} - q_{3-4} - q_{4-1} = 469,8 \text{ кДж/кг};$$

$$\eta_t = \frac{l_4}{q_{2-3}} = \frac{469,8}{1178,6} = 0,4;$$

$$\Delta s_{3-4} = c_v \frac{\kappa - k}{\kappa - 1} \ln \frac{T_4}{T_3} = 0,71 \frac{1,5 - 1,4}{1,5 - 1} \ln \frac{894,4}{2000} = -0,114 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{K)};$$

$$\Delta u_{3-4} = c_v (T_4 - T_3) = 0,71 (894,4 - 2000) = -785 \text{ кДж/кг};$$

$$\Delta i_{3-4} = c_p (T_4 - T_3) = 0,71 \cdot 1,4 (894,4 - 2000) = -1099 \text{ кДж/кг};$$

4.26.

$$v_1 = 0,084 \text{ м}^3/\text{кг};$$

$$v_2 = 0,028 \text{ м}^3/\text{кг};$$

$$T_2 = 447 \text{ K};$$

$$p_2 = 46 \cdot 10^5 \text{ Па};$$

$$T_3 = 667,6 \text{ K};$$

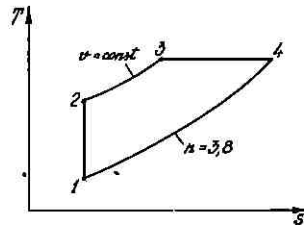
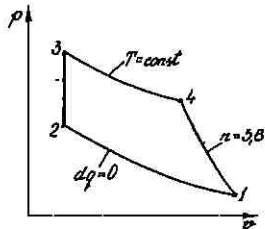
$$v_4 = 0,062 \text{ м}^3/\text{кг};$$

$$p_4 = 31 \cdot 10^5 \text{ Па};$$

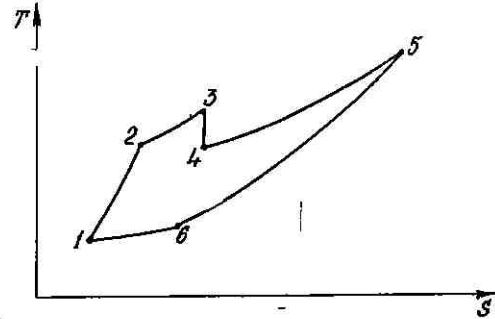
$$\kappa = 3,8;$$

$$l_u = 78,5 \text{ кДж/кг};$$

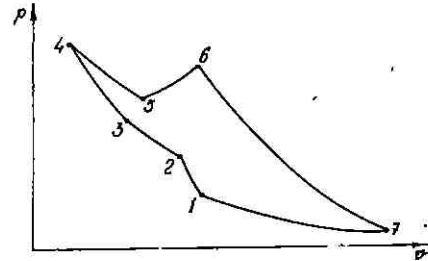
$$\eta_t = 0,253;$$



4.27.



4.28.



4.29.

$$L_{изот} = p_3 V_3 \ln \frac{p_3}{p_1} = 5,981 \cdot 10^4 \cdot 100 \ln \frac{5}{1} = 78,94 \cdot 10^3 \text{ кДж/ч};$$

$$N_{изот} = \frac{L_{изот}}{3600} = 21,92 \text{ кВт};$$

$$L_{ад} = \frac{k}{k-1} p_2 V_3 \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right] = \frac{1,4}{1,4-1} \cdot 5,981 \cdot 10^4 \cdot 100 \left[\left(\frac{5}{1} \right)^{\frac{1,4-1}{1,4}} - 1 \right] = 99,91 \cdot 10^3 \text{ кДж/ч};$$

$$N_{ад} = \frac{L_{ад}}{3600} = \frac{99,91 \cdot 10^3}{3600} = 27,75 \text{ кВт};$$

$$L_{пол} = \frac{\kappa'}{\kappa' - 1} p_2 V_3 \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\kappa' - 1}{\kappa'}} - 1 \right] = \frac{1,25}{1,25-1} \cdot 5,981 \cdot 10^4 \cdot 100 \cdot \left[\left(\frac{5}{1} \right)^{\frac{1,25-1}{1,25}} - 1 \right] = 93,12 \cdot 10^3 \text{ кДж/ч};$$

$$N_{пол} = \frac{L_{пол}}{3600} = \frac{93,12 \cdot 10^3}{3600} = 25,86 \text{ кВт};$$

$$Q_{изот} = GRT \ln \frac{p_1}{p_2} = 567 \cdot 288 \cdot 300 \ln \frac{1}{5} = -78,84 \cdot 10^3 \text{ кДж/кг};$$

$$G = \frac{p_2 V_3}{R T_3} = \frac{5,9 \cdot 81 \cdot 10^4 \cdot 100}{288 \cdot 300} = 567 \text{ кг/ч};$$

$$Q_{ад} = 0$$

$$Q_{пол} = G c_v \frac{\kappa - k}{\kappa - 1} (T_2 - T_1) = 567 \cdot 0,71 \frac{1,25 - 1,4}{1,25 - 1} (413,9 - 300) = -27,5 \cdot 10^3 \text{ кДж/ч};$$

$$T_2 = T_1 \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\kappa - 1}{\kappa}} = 300 \left(\frac{5}{1} \right)^{\frac{1,25 - 1}{1,25}} = 413,9 \text{ К};$$

4.30.

$$\pi_{3 \times ст} = \sqrt[3]{\frac{p_{кон}}{p_{нач}}} = \sqrt[3]{\frac{125}{1}} = 5;$$

$$L_{3 \times ст} = 3 \cdot \frac{\kappa}{\kappa - 1} p_1 V_1 \left(\pi^{\frac{\kappa - 1}{\kappa}} - 1 \right) = 3 \frac{1,3}{1,3 - 1} \cdot 125 \cdot 9,81 \cdot 10^4 \times$$

$$\times 100 \left(5^{\frac{1,3 - 1}{1,3}} - 1 \right) = 71,4 \cdot 10^5 \text{ кДж/ч};$$

$$N_{3 \times ст} = \frac{71,4 \cdot 10^5}{3600} = 1983 \text{ кВт};$$

$$\pi_{2 \times ст} = \sqrt[2]{\frac{p_{кон}}{p_{кон}}} = \sqrt[2]{\frac{125}{1}} = 11,2;$$

$$L_{2 \times ст} = 2 \frac{\kappa}{\kappa - 1} p_{кон} V_{кон} \left(\pi^{\frac{\kappa - 1}{\kappa}} - 1 \right) =$$

$$= 2 \frac{1,3}{1,3 - 1} 125 \cdot 9,81 \cdot 10^4 \cdot 100 \left(11,2^{\frac{1,3 - 1}{1,3}} - 1 \right) =$$

$$= 78,97 \cdot 10^5 \text{ кДж/ч};$$

$$N_{2 \times ст} = \frac{78,97 \cdot 10^5}{3600} = 2193 \text{ кВт};$$

$$\pi_{одност} = \frac{p_{кон}}{p_{нач}} = \frac{125}{1} = 125;$$

$$L_{одноступ.} = \frac{1,3}{1,3 - 1} 125 \cdot 9,81 \cdot 10^4 \cdot 100 \left(125^{\frac{1,3 - 1}{1,3}} - 1 \right) =$$

$$= 108,18 \cdot 10^5 \text{ кДж/ч};$$

$$N_{одноступ.} = \frac{108,18 \cdot 10^5}{3600} = 3005 \text{ кВт}.$$

4.31.

$$N = 22,68 \text{ кВт}.$$

4.32.

$$p_2 = p_1 \left(\frac{T_2}{T_1} \right)^{\frac{\kappa}{\kappa - 1}} = 1 \left(\frac{473}{300} \right)^{\frac{1,4}{1,4 - 1}} = 4,92 \text{ ата};$$

$$\pi = \frac{p_2}{p_1} = \frac{4,92}{1} = 4,92;$$

$$Z = \sqrt{\frac{m p_{кон}}{p_{нач}}}$$

$$4,92 = \sqrt{\frac{m \cdot 400}{1}}; \quad m = \frac{\ln 400}{\ln 4,92} = 3,76;$$

число ступеней $m = 4$.

4.33.

$$G_{возд} = \frac{p_1 V_1}{R T_1} = \frac{0,9 \cdot 9,81 \cdot 10^4 \cdot 250}{288 \cdot 298} = 257 \text{ кг/ч};$$

$$Q_{возд} = G_{возд} \cdot c_{v_{возд}} \frac{\kappa - k}{\kappa - 1} (T_2 - T_1) =$$

$$= 257 \cdot 0,71 \frac{1,2 - 1,4}{1,2 - 1} (428,2 - 298) = -23,75 \cdot 10^3 \text{ кДж/ч};$$

$$T_2 = T_1 \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\kappa - 1}{\kappa}} = 298 \left(\frac{8}{0,9} \right)^{\frac{1,2 - 1}{1,2}} = 428,2 \text{ К};$$

$$Q_{вод} = Q_{возд} \text{ (без учета потерь);}$$

$$Q_{вод} = G_{вод} \cdot c_{вод} \Delta T_{вод};$$

$$G_{вод} = \frac{Q_{вод}}{c_{вод} \Delta T_{вод}} = \frac{23,75 \cdot 10^3}{4,18 \cdot 15} = 378,8 \text{ кг/ч}.$$

4.34.

$$N = 462,6 \text{ кВт}.$$

Глава 5

- 5.1. $(p + \frac{a}{v^2})(v-b) = RT$. 5.2. 3. 5.3. 4. 5.4. 3.6
 5.5. 2,5. 5.6. 1. 5.7. 2. 5.8. 2. 5.9. 3.
 5.10. 2. 5.11. 2. 5.12. 1. 5.13. 1
 5.14. $\frac{dp}{dT} = \frac{r}{T_s(v_c - v_{ж})}$. 5.15. 1. 5.16. 2,8,9.
 5.17. а) 4, б) 3, в) 1. 5.18. 2. 5.19. 2.
 5.20. 3.
 5.21. а) 3, б) 2, в) 1. 5.22. 3,4.
 5.23. $v = 0,1 \text{ м}^3/\text{кг}$, $t = 213^\circ\text{C}$, $i = 2796 \text{ кДж/кг}$,
 $s = 6,33 \text{ кДж/(кг К)}$.
 5.24. $v = 0,31 \text{ м}^3/\text{кг}$, $t = 152^\circ\text{C}$, $i = 2325 \text{ кДж/кг}$,
 $s = 5,83 \text{ кДж/(кг К)}$.
 5.25. $v = 0,058 \text{ м}^3/\text{кг}$, $i = 3198 \text{ кДж/кг}$,
 $s = 6,65 \text{ кДж/(кг К)}$.
 5.26. $x = 0,88$, $v_x = 0,19 \text{ м}^3/\text{кг}$, $G = \frac{V_x}{v_x} = \frac{10}{0,19} = 52,7 \text{ кг}$.
 5.27. $\Delta J = G(i_2 - i_1) = 4(3210 - 2260) = 3800 \text{ кДж}$;
 $Q = \Delta u = \Delta J - V(p_2 - p_1) = 3800 - 4,03(10 \cdot 10^5 - 5 \cdot 10^5)10^{-3} =$
 $= 3200 \text{ кДж}$; $L = 0$.
 5.28. $\Delta i = i_2 - i_1 = 2300 - 3075 = -775 \text{ кДж/кг}$;
 $\Delta u = \Delta i - p(v_2 - v_1) = -775 - 0,5 \cdot 10^5(2,7 - 6,3) \cdot 10^{-3} =$
 $= -595 \text{ кДж/кг}$; $q = \Delta i = -775 \text{ кДж/кг}$; $l = q - \Delta u =$
 $= 180 \text{ кДж/кг}$ или $l = p(v_2 - v_1) = -180 \text{ кДж/кг}$.
 5.29. $\Delta i = 2860 - 2260 = 600 \text{ кДж/кг}$,
 $\Delta u = \Delta i - (p_2 v_2 - p_1 v_1) = 600 - (0,14 \cdot 10^5 \cdot 14,6 -$
 $- 8 \cdot 10^5 \cdot 0,18) \cdot 10^3 = 540 \text{ кДж/кг}$;
 $q = T(s_2 - s_1) = (170 + 273)(8,62 - 5,67) = 1310 \text{ кДж/кг}$;
 $l = q - \Delta u = 770 \text{ кДж/кг}$.
 5.30. $l = -\Delta u = -\Delta i + (p_2 v_2 - p_1 v_1) = -(2125 - 3040) +$
 $+ (0,06^5 \cdot 19 - 14 \cdot 10^5 \cdot 0,0183) \cdot 10^{-3} = 773 \text{ кДж/кг}$.
 5.31. $\eta_t = 0,206$, $l_u = 138 \text{ кДж/кг}$.

5.32. $\eta_t = \frac{i_1 - i_2}{i_1 - i_{ж}} = \frac{775,419 - 590,419}{775,419 - 4,19 \cdot 82} =$
 $= 0,263$, $x_2 = 0,928$
 (энтальпия конденсата $i_{ж} = c_b \cdot t_2$).

5.33. $\eta_t = \frac{765 - 552}{765 - 82} = 0,312$ - повышение на 19%;
 $x_2 = 0,805$ - уменьшение на 8%.

5.34. $\eta_t = \frac{838 - 590}{838 - 82} = 0,316$ - повышение на 20%;
 $x_2 = 0,985$ - увеличение на 6,5%.

5.35. $\eta_t = \frac{775 - 522}{775 - 33} = 0,34$ - повышение на 29,5%;
 $x_2 = 0,84$ - уменьшение на 9%.

Глава 6.

- 6.1. 3. 6.2. 1. 6.3. 2. 6.4. 3.
 6.5. 2. 6.6. 2. 6.7. 1.
 6.8. а) 2; б) 1. 6.9. а), б) 1.
 6.10. В обоих соплах режим истечения надкритический,
 поэтому $w \sim \sqrt{RT_1}$, $G \sim \frac{p_1}{\sqrt{RT_1}}$, откуда $w_I < w_{II}$, $G_I < G_{II}$.
 6.11. $G_I = G_{III} < G_{II}$. 6.12. $w_I = w_{II} < w_{III}$. 6.13. 2.
 6.14. $G_I < G_{III} < G_{II}$. 6.15. $w_I > w_{II} > w_{III}$. 6.16. 1.
 в сопле 1 режим докритический. 6.17. $G_{II} < G_I < G_{III}$.
 6.18. 1.
 6.19. Процессы 1-3 (исходный) и 1'-2'.
 6.20. Процессы 1-3 (исходный) и 1'-3'.
 6.21. В формуле расхода

$$G = \frac{p_1}{\sqrt{RT_1}} \varphi\left(\frac{p}{p_1}, k\right) F \quad (*)$$

можно в силу закона сохранения массы писать либо $p = p_2$, $F = F_2$,
 либо $p = p_{кр}$, $F = F_{кр}$. Поскольку сопло должно быть расчет-
 ным $p_2 = p_H$, отсюда имеем

$$\varphi(\beta_{кр}, k) F_{кр} = \varphi\left(\frac{p_H}{p_1}, k\right) F_2 \quad (**)$$

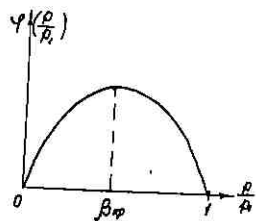


График функции $\varphi\left(\frac{p}{p_1}\right)$ приведен на рисунке. В формулу (***) T_1 не входит, поэтому варьирование T_1 не влияет на F_2 , а расход при этом (согласно (*), (в котором $F = \beta_{кр} F = F_{кр}$)) уменьшается (ответ 1а). Во втором случае (повышение p_1) формула (***) дает увеличение F_2 , поскольку при уменьшении $\frac{p_H}{p_1} \left(\frac{p_H}{p_1} < \beta_{кр}\right) \varphi$ падает.

Согласно (*) G возрастает (ответ 2в). Аналогично рассуждая, имеем в третьем случае ответ б.

6.22. 1 б, 2 а, 3 а.

6.23. Режим истечения докритический, $p_H = p_2$.

$$w = \sqrt{\frac{2k}{k-1} R T_1 \left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{k-1}{k}} \right]} = 314 \text{ м/с.}$$

$$G = F \sqrt{\frac{2k}{k-1} \frac{p_1^2}{R T_1} \left[\left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{2}{k}} - \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{k+1}{k}} \right]} = 2,8 \text{ кг/с.}$$

6.24. $w_{кр} = 550 \text{ м/с}$, $w_2 = 1200 \text{ м/с}$, $d_{кр} = 10 \text{ мм}$,
 $d_2 = 21 \text{ мм}$.

6.25. $w = 313 \text{ м/с}$, $G = 5,55 \text{ кг/с}$,

6.26. $V = 0,715 \text{ м}^3/\text{с}$, $T_2 = 287 \text{ К}$, $v_2 = 0,126 \text{ м}^3/\text{кг}$.

6.27. $G = 1,68 \cdot 10^{-2} \text{ кг/с}$.

а) не изменится; б) уменьшится, так как режим истечения становится докритическим.

6.28. а) докритический, $w = 1003 \text{ м/с}$; б) надкритический, $w = 1393 \text{ м/с}$; в) надкритический, $w = 287 \text{ м/с}$.

6.29. $w = 302 \text{ м/с}$, $G = 4,85 \text{ кг/с}$, w не изменится, G возрастет в 4 раза.

6.30. $G = 0,905 \text{ кг/с}$, $d_2 = 5,27 \cdot 10^{-2} \text{ м}^2$. См. формулы (*) и (***) в ответе к вопросу 6.21. Поскольку моле-

кулярная масса газа не входит в (***) (а k одинаковы у воздуха и H_2), то замена воздуха на H_2 не влияет на сечение среза расчетного сопла (при $F_{кр} = \text{const}$). Расход при этом уменьшается согласно (*) из-за увеличения $R = \frac{8314}{\mu}$.

6.31. $w_{кр} = 600 \text{ м/с}$, $w_2 = 120 \text{ м/с}$, $G = 3,25 \text{ кг/с}$.

6.32. Критическое давление $p_{кр} = p_1 \beta_{кр} = 8,07 \text{ бар}$.
Для сухого насыщенного пара при $p_1 = 14 \text{ бар}$,

$i_1 = 2,79 \cdot 10^3 \text{ кДж/кг}$. После адиабатного расширения до $p_{кр}$ и до $p_H = p_2$ соответственно $i_{кр} = 2,68 \cdot 10^3 \text{ кДж/кг}$; $i_2 = 2,05 \cdot 10^3 \text{ кДж/кг}$. Скорость $w = \sqrt{2(i_1 - i)}$, $w_{кр} = 462 \text{ м/с}$,
 $w_2 = 1220 \text{ м/с}$.

6.33. $i_1 = 3,04 \cdot 10^3 \text{ кДж/кг}$, $i_2 = 2,43 \cdot 10^3 \text{ кДж/кг}$,
 $x_2 = 0,852$, $w_2 = 1282 \text{ м/с}$.

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие	3
Принятые обозначения	5
Глава 1. Термодинамические параметры состояния. Уравнение состояния	7
Глава 2. Газовые смеси. Теплоемкость газов	10
Глава 3. Термодинамические процессы с идеаль- ным газом	15
Глава 4. Термодинамические циклы тепловых дви- гателей. Процессы в компрессорах	25
Глава 5. Процессы с парами. Циклы паросиловых установок	32
Глава 6. Истечение газов и паров	38
Ответы и решения	46

Валентин Константинович Кошкин,
Татьяна Васильевна Михайлова,
Юрий Сергеевич Михеев

ПРОГРАММИРОВАННЫЙ ЗАДАЧНИК ПО ТЕХНИЧЕСКОЙ ТЕРМОДИНАМИКЕ

Редактор Е.В. Лисовец
Техн. редактор Е.А. Смирнова
Л- 100148 от 22.11.83
Бум. типогр. № 2. Формат 60x90 1-16
Усл. печ. л. 3,75; уч.-изд. 3,00. Тираж 1000
Зак. 414/766. Цена 20 к.
Ротапринт МАИ
125871, Москва, Волоколамское шоссе, 4