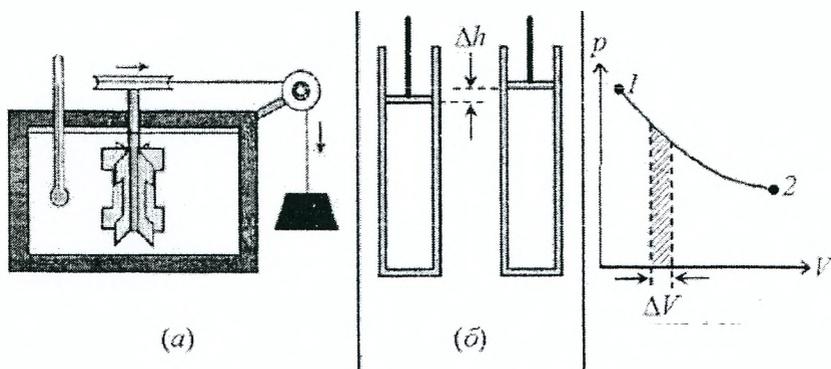


МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ
УЧРЕЖДЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ
«БРЕСТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра физики

**Методические указания
и контрольные задания**
по курсу
“Термодинамика и теплопередача”

для студентов технических специальностей
заочной формы обучения



Брест 2010

УДК 536.7 (075.8)

Методические указания и контрольные задания составлены в соответствии с программой курса «Термодинамика и теплопередача».

В методических указаниях приведены основные формулы и законы по термодинамике, примеры решения задач, необходимые для выполнения работы.

Составители: Кандилян Г.С., доцент
Чугунов С. В., ассистент

ВВЕДЕНИЕ

Предлагаемое пособие предназначено для самостоятельной работы студентов-заочников. В нем приведены краткие теоретические сведения по дисциплине «Термодинамика и теплопередача», задачи, имеющие достаточное число вариантов, и примеры решения типовых задач. Задание исходных данных по вариантам в соответствии с учебным шифром студента обеспечивает максимальную самостоятельность при выполнении контрольных заданий. Примеры решения типовых задач сопровождаются подробными комментариями и методическими рекомендациями, что способствует развитию у студентов необходимых навыков для решения задач, проведения вычислений и оформления расчетов.

ОБЩИЕ МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

Контрольные задачи составлены по стовариантной системе, в которой к каждой задаче исходные данные выбираются по последним цифрам шифра и сумме цифр шифра студента. Вариант работы должен соответствовать номеру и шифру студента. Работы, выполненные не по своему варианту, не рассматриваются.

При выполнении контрольных задач необходимо соблюдать следующие условия:

- а) записывать полностью условие задачи и исходные данные;
- б) решение задач сопровождать пояснительным текстом, в котором указывается, какая величина определяется и по какой формуле, какие величины подставляются в формулу и откуда они берутся (из условия задач, из справочных таблиц, или были определены ранее в задаче);
- в) решение проводить в системе СИ;
- г) необходимые справочные данные при решении задач брать из предлагаемой литературы; после решения задач нужно дать краткий анализ полученных результатов сделать выводы;
- д) привести список используемой литературы;
- е) контрольную работу выполнить в отдельной тетради и оставлять чистые поля, для замечаний рецензента;
- ж) исправления по замечаниям записываются на чистых листах в той же тетради.

Основные формулы

1. Давление:

$$P_{абс} = P_{изб} + P_{атм} \quad (1)$$

или

$$P_{абс} = P_{атм} - P_{вак} \quad (1а),$$

где $P_{абс}$ – абсолютное давление; $P_{изб}$ – избыточное давление; $P_{атм}$ – атмосферное давление; $P_{вак}$ – величина вакуума(разрежение).

2. Температура:

$$T(K) = t^{\circ}C + 273,15;$$

$$t^{\circ}(F) = 1,8 \cdot t^{\circ}C + 32; \quad (2)$$

$$t^{\circ}(R) = 0,8 \cdot t^{\circ}C;$$

$$t^{\circ}(Ra) = 1,8(t^{\circ}C + 273,15),$$

где $T(K)$ – термодинамическая (абсолютная) температура по шкале Кельвина(K); $t^{\circ}C$ – температура по шкале Цельсия($^{\circ}C$); $t^{\circ}(F)$ – температура по шкале Фаренгейта($^{\circ}F$); $t^{\circ}(R)$ – температура по шкале Реомюра($^{\circ}R$); $t^{\circ}(Ra)$ – температура по шкале Ренкина($^{\circ}Ra$).

3. Удельный объем:

$$v = \frac{V}{m}, \quad (3)$$

где m – масса тела; V – его объем.

4. Плотность:

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{1}{v} \quad (4)$$

5. Уравнение состояния идеального газа:

$$p v = RT = \frac{\bar{R}}{M} T, \quad (5)$$

где $\bar{R} = 8,31451 \left(\frac{Дж}{моль \cdot К} \right)$ – универсальная газовая постоянная; R – удельная газовая постоянная.

Последнее уравнение (5) можно переписать в форме:

$$pV = mRT = m \frac{\bar{R}}{M} T \quad (5а)$$

6. Изотермический процесс ($T = const$):

$$P_1 V_1 = P_2 V_2 \quad (6)$$

$$P_1 v_1 = P_2 v_2 \quad (6а)$$

7. Изобарный процесс ($P = const$):

$$\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2} \quad (7)$$

или $\frac{v_1}{T_1} = \frac{v_2}{T_2} \quad (7а)$

8. Изохорный процесс ($V = const, v = const$):

$$\frac{P_1}{T_1} = \frac{P_2}{T_2} \quad (8)$$

9. Адиабатный процесс ($Q = 0$) подчиняется уравнению Пуассона:

$$P_1 V_1^k = P_2 V_2^k, \quad (9)$$

где k – показатель адиабат.

10. Первый закон термодинамики:

$$Q = \Delta U + L, \quad (10)$$

где Q – количество теплоты, подведенное или отданное от термодинамической системы; $\Delta U = U_2 - U_1$ – изменение внутренней энергии (U_1, U_2 – внутренняя

энергия в начале и в конце процесса); L – работа, совершенная системой над внешними телами ($L > 0$) или совершенная над системой ($L < 0$).

Первый закон термодинамики в дифференциальной форме:

$$\delta Q = dU + \delta L, \quad (10a)$$

или

$$\delta Q = dU + p dV. \quad (10b)$$

11. Закон Дальтона для смеси идеальных газов:

$$P = P_1 + P_2 + \dots + P_N = \sum_{i=1}^N P_i, \quad (11)$$

где P_i – парциальное давление i -го газа; P – давление смеси газов. Парциальное давление каждого газа можно найти с помощью его объемной доли (r_i) в смеси:

$$P_i = P \frac{V_i}{V} = r_i P \quad (11a)$$

12. Уравнение Ван-дер-Ваальса для реальных газов:

$$\left(P + \frac{a}{v^2}\right)(V - b) = RT, \quad (12)$$

где a, b – виральные коэффициенты.

13. Изотермический коэффициент сжатия:

$$\beta_m = -\frac{1}{V} \left(\frac{\partial V}{\partial P}\right)_m. \quad (13)$$

14. Коэффициент термического расширения:

$$\alpha_p = \frac{1}{V} \left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_p \quad (14)$$

15. Термический коэффициент давления (коэффициент тепловой упругости):

$$\gamma_m = \frac{1}{P} \left(\frac{\partial P}{\partial T}\right)_V \quad (15)$$

или $\gamma_m = \frac{1}{P} \frac{\alpha_p}{\beta_T} \quad (15a)$

Для идеальных газов

$$\alpha_p = \beta_T = \frac{1}{T} = \frac{1}{273,15} \quad (15b)$$

16. Энтальпия термодинамической системы:

$$H = U + P \cdot V \quad (16)$$

Удельная энтальпия (энтальпия, отнесенная к 1 кг.)

$$h = u + p \cdot v, \quad (16a)$$

где u – удельная внутренняя энергия.

Удельная теплота q при постоянном давлении равна изменению удельной энтальпии в процессе:

$$q_p = h_2 - h_1 \quad (16b)$$

17. Теплоемкость тела:

$$C = \frac{\delta Q}{dT} \quad (17)$$

18. Удельная теплоемкость вещества:

$$c = \frac{\delta q}{dT} = \frac{1}{m} \frac{\delta Q}{dT} = \frac{C}{m} \quad (18)$$

19. Молярная теплоемкость вещества:

$$\bar{c} = \mu c = \mu \frac{\delta q}{dT} = \frac{\mu}{m} \frac{\delta Q}{dT} \quad (19)$$

20. Средняя теплоемкость:

$$c_m = \frac{q}{T_2 - T_1} = \frac{\int_{T_1}^{T_2} c dT}{T_2 - T_1} \quad (20)$$

21. Теплоемкость при постоянном объеме (изохорная теплоемкость):

$$c_V = \left(\frac{\delta q}{dT}\right)_V = \left(\frac{dU}{dT}\right)_V \quad (21)$$

22. Теплоемкость при постоянном давлении (изобарная теплоемкость):

$$c_P = \left(\frac{\delta q}{dT}\right)_P = \left(\frac{dU}{dT}\right)_P \quad (22)$$

23. Уравнение Майера:

$$c_P - c_V = R \quad (23)$$

24. Показатель адиабаты:

$$k = \frac{c_P}{c_V} = \frac{i+2}{i}, \quad (24)$$

где i – число степеней свободы.

25. Уравнение политропы:

$$PV^n = const, \quad (25)$$

или

$$P_1 V_1^n = P_2 V_2^n, \quad (25a)$$

где n – показатель политропы.

26. Теплоемкость в политропном процессе ($c = const$):

$$c_n = c_V \frac{n-k}{n-1} \quad (26)$$

27. Для обратного адиабатного процесса $\delta q = 0$ ($\delta Q = 0$):

$$dS = \frac{\delta Q}{T} = 0, \quad (27)$$

$$\text{откуда } S = const, \quad (27a)$$

где S – энтропия системы.

28. Изменение энтропии в общем случае:

$$\begin{aligned} S_2 - S_1 &= c_V \ln \frac{T_2}{T_1} + R \ln \frac{V_2}{V_1} = c_P \ln \frac{T_2}{T_1} - R \ln \frac{P_2}{P_1} \\ &= c_P \ln \frac{V_2}{V_1} + c_V \ln \frac{P_2}{P_1} \end{aligned} \quad (28)$$

29. Второй закон термодинамики (неравенство Клаузиуса):

$$T dS \geq dU + p dV \quad (29)$$

30. Термический КПД теплового двигателя:

$$\eta_t = \frac{Q_1 - |Q_2|}{Q_1} = 1 - \frac{|Q_2|}{Q_1}, \quad (30)$$

где Q_1 – количество теплоты, подводимое к рабочему телу; Q_2 – количество теплоты, отведенное от рабочего тела.

31. Термический КПД цикла Карно:

$$\eta_t = \frac{T_1 - T_2}{T_1} = 1 - \frac{T_2}{T_1} \quad (31)$$

32. Основные параметры цикла двигателя внутреннего сгорания (ДВС):

$$\text{а) степень сжатия: } \varepsilon = \frac{V_1}{V_2} = \frac{v_1}{v_2}; \quad (32a)$$

б) степень повышения давления (изохорный подвод тепла)

$$\lambda = \frac{P_3}{P_2}; \quad (32b)$$

в) степень изобарного расширения (степень предварительного расширения)

$$\rho = \frac{V_4}{V_3} = \frac{v_4}{v_3}. \quad (32b)$$

33. Термический КПД цикла ДВС:

а) цикл с подводом тепла при $V = const$ (цикл Отто)

$$\eta_t = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{k-1}} \quad (33a)$$

б) цикл с подводом тепла при $P = const$ (цикл Дизеля)

$$\eta_t = 1 - \frac{\rho^k - 1}{k(\rho - 1)\varepsilon^{k-1}} \quad (33б)$$

в) цикл со смешанным подводом тепла $V = const$ и $P = const$ (цикл Тринклера)

$$\eta_t = 1 - \frac{\lambda \rho^k - 1}{\varepsilon^{k-1}(\lambda - 1) + k\lambda(\rho - 1)} \quad (33в)$$

34. Индикаторная мощность ДВС:

$$N_i = \frac{P_i V_h n Z}{10^3 \tau}, \quad (34)$$

где n – число оборотов коленчатого вала; τ – число тактов двигателя; V_h – рабочий объем; P_i – индикаторное давление; Z – число цилиндров двигателя.

35. Эффективная мощность ДВС:

$$N_e = \eta_m N_i, \quad (35)$$

где η_m – механический КПД двигателя.

36. Индикатор КПД ДВС:

$$\eta_i = \frac{N_i}{B Q_n^p}, \quad (36)$$

где B – расход топлива; Q_n^p – низшая теплота сгорания топлива.

37. Уравнение теплопроводности:

$$Q = \lambda \frac{t_{cm}' - t_{cm}''}{\delta} F \tau, \quad (37)$$

где Q – количество теплоты, проходящее через твердую стенку; t_{cm}' , t_{cm}'' – температуры передней и задней поверхности стенки соответственно; δ – толщина стенки; F – площадь поверхности стенки; τ – время; λ – коэффициент теплопроводности стенки.

38. Плотность теплового потока:

$$q = \lambda \frac{t_{cm}' - t_{cm}''}{\delta} \quad (38)$$

39. Термическое сопротивление стенки:

$$R = \frac{\delta}{\lambda} \quad (39)$$

Для многослойной стенки

$$R = \sum_{i=1}^N \frac{\delta_i}{\lambda_i} \quad (39a)$$

40. Уравнение теплообмена между твердой стенкой и жидкостью (газом):

$$Q = \alpha (t_1 - t_{cm}') F \tau, \quad (40)$$

где α – коэффициент теплоотдачи; t_1 – температура жидкости (газа).

41. Теплообмен от одной жидкости (газа) к другой через твердую стенку:

$$Q = k (t_1 - t_2) F \tau, \quad (41)$$

где k – коэффициент теплопередачи: $k = \frac{1}{\frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2}}$, $(41a)$

где $\frac{1}{\alpha_1}$ и $\frac{1}{\alpha_2}$ – термические сопротивления веществ перед и за стенкой; $\frac{\delta}{\lambda}$ – термическое сопротивление самой стенки.

42. Плотность теплового потока для теплопередачи вещества:

$$q = k(t_1 - t_2). \quad (42)$$

Примеры решения задач

Пример 1. Азот массы $m = 4$ кг, находящийся в сосуде под поршнем при давлении $P_1 = 120$ кПа и температуре $t_1 = 27^\circ\text{C}$, сжимается в 2 раза. Найти конечные параметры газа, считая его идеальным, а также: работу сжатия, изменения внутренней энергии и количество теплоты в процессе. Рассмотреть следующие варианты процесса: а) изотермический; б) адиабатный; в) политропный (показатель политропы $n = 1,5$).

а) Воспользуемся уравнением (7)

$$V_1 = \frac{mRT_1}{P_1};$$

Удельную газовую постоянную R для азота найдем по формуле: $R = \frac{\bar{R}}{M}$

$$R = \frac{8,314}{0,028} \approx 297 \frac{\text{Дж}}{\text{кг К}}$$

Тогда $V_1 = \frac{4 \cdot 297 \cdot 300}{120 \cdot 10^3} \approx 2,97 \text{ м}^3$.

Конечный объем $V_2 = \frac{V_1}{2} = 1,485 \text{ м}^3$.

Конечное давление определим используя закон (6) для изотермического процесса:

$$P_2 = \frac{P_1 V_1}{V_2}; \quad P_2 = 120 \cdot 10^3 \cdot 2 = 240 \cdot 10^3 \text{ Па} = 240 \text{ кПа}.$$

Работа изотермического сжатия:

$$L = P_1 V_1 \ln \frac{V_2}{V_1} = -120 \cdot 10^3 \cdot 2,97 \cdot 0,693 \approx -247 \cdot 10^3 \text{ Дж} = -247 \text{ кДж}.$$

Изменение внутренней энергии, очевидно, равно $\Delta U = 0$.

Тогда количество теплоты, отведенное в процессе:

$$Q = \Delta U + L = L = -247 \text{ кДж}.$$

б) Для нахождения конечного давления воспользуемся уравнением Пуассона (9):

$$P_1 V_1^k = P_2 V_2^k;$$

откуда $P_2 = P_1 \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^k$.

Так как азот (N_2) является 2-атомной молекулой, то $k = 1,4$, следовательно

$$P_2 = 120 \cdot 10^3 \cdot 2^{1,4} = 316,7 \cdot 10^3 \text{ Па} = 316,7 \text{ кПа}.$$

Конечную температуру найдем из уравнения состояния:

$$T_2 = \frac{P_2 V_2}{mR}; \quad T_2 = \frac{316,7 \cdot 10^3 \cdot 1,485}{4 \cdot 297} \approx 396 \text{ К}.$$

Работа адиабатного сжатия:

$$L = \frac{P_1 V_1}{k-1} \cdot \left(1 - \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{k-1}\right)$$

Произведем вычисления:

$$L = \frac{120 \cdot 10^3 \cdot 2,97}{1,4-1} (1 - 2^{0,4}) = -285 \text{ кДж}.$$

Изменение внутренней энергии (для адиабатного процесса $Q=0$):

$$\Delta U = -L = 285 \text{ кДж}.$$

в) Конечный объем газа, очевидно, равен:

$$V_2 = \frac{V_1}{2,5} = 1,485 \text{ м}^3.$$

Конечное давление найдем из соотношения:

$$\frac{P_2}{P_1} = \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^n \text{ или } P_2 = P_1 \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^n, \text{ откуда } P_2 = 120 * 10^3 * 2^{1,5} \approx 339 \text{ кПа},$$

а конечную температуру из аналогичного соотношения:

$$\frac{T_1}{T_2} = \left(\frac{V_2}{V_1}\right)^{n-1} \text{ или } T_2 = T_1 \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{n-1}, \text{ откуда } T_2 = 300 * 2^{0,5} \approx 424 \text{ К}.$$

Работа политропного процесса (25 а):

$$L = \frac{P_1 V_1}{n-1} \left(1 - \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{n-1}\right).$$

Произведем вычисления:

$$L = \frac{120 * 10^3 * 2,97}{1,5 - 1} (1 - 2^{0,5}) \approx -295 * 10^3 \text{ Дж} = -295 \text{ кДж}.$$

Изменение внутренней энергии азота вычислим по формуле:

$$\Delta U = m c_v (T_2 - T_1),$$

где $c_v = \frac{R}{k-1}$ - изохорная теплоемкость азота.

Проведем вычисления:

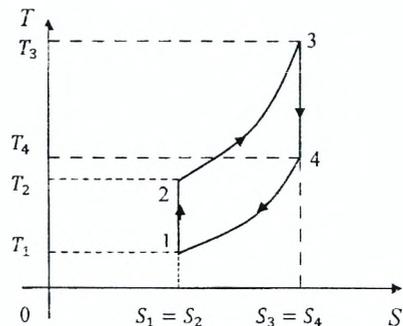
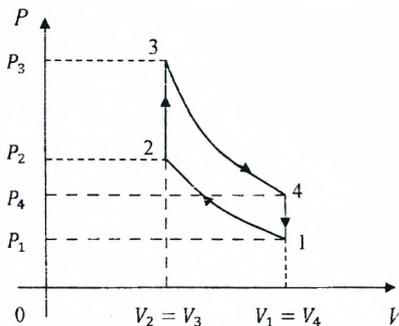
$$R = \frac{8,314}{28 * 10^{-3}} = 296,8 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} * \text{К}}; c_v = \frac{296,8}{1,4-1} = 742 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} * \text{К}};$$

$$\Delta U = 4 * 742 * (424 - 300) \approx 368 \text{ кДж}.$$

Из первого закона термодинамики (10) найдем количество теплоты:

$$Q = L + \Delta U, \text{ или } Q = -295 \text{ кДж} + 368 \text{ кДж} \approx 73 \text{ кДж}.$$

Пример 2.1. Для идеального цикла поршневого двигателя внутреннего сгорания с подводом теплоты при $V = const$ определить параметры в характерных точках, полезную работу, термический КПД цикла, подведенное и отведенное количество теплоты, если рабочее тело - двухатомный газ с молярной массой $M = 29 * 10^{-3} \frac{\text{кг}}{\text{моль}}$. Теплоемкость газа считать постоянной. Принять: $P_1 = 200 \text{ кПа}$; $T_1 = 300 \text{ К}$; степень сжатия $\epsilon = 3,8$, степень повышения давления $\lambda = 3,2$; масса газа $m = 1 \text{ кг}$. Цикл изобразить в (P, V) и (T, S) диаграммах.



Цикл с подводкой тепла при $V = const$ состоит из двух изохор (2→3 и 4→1) и двух адиабат (1→2 и 3→4). Изобразим цикл на диаграммах (P, V) и (T, S) .

Точка 1: $P_1 = 200 \text{ кПа}$; $T_1 = 300 \text{ К}$.

Объем V_1 газа найдем из уравнения состояния $V_1 = \frac{mRT_1}{P_1}$.

Газовая постоянная для данного газа:

$$R = \frac{8,314}{29 \cdot 10^{-3}} = 286,7 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$$

Тогда $V_1 = \frac{1 \cdot 286,7 \cdot 300}{200 \cdot 10^3} = 0,43 \text{ м}^3$.

Точка 2: Имеем $\varepsilon = \frac{V_1}{V_2} = 3,8$, откуда $V_2 = \frac{V_1}{3,8} = \frac{0,43}{3,8} \approx 0,11 \text{ м}^3$.

Температура в конце адиабатного сжатия:

$$T_2 = T_1 \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^{k-1}; T_2 = 300 \cdot 3,8^{0,4} \approx 512 \text{ К},$$

а давление в этой же точке:

$$P_2 = P_1 \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^k = 200 \cdot 10^3 \cdot 3,8^{1,4} \approx 1,3 \cdot 10^6 \text{ Па} = 1,3 \text{ МПа}.$$

Точка 3: Для изохорного процесса 2-3 имеем:

$$V_3 = V_2 = 0,11 \text{ м}^3; \frac{P_3}{P_2} = \lambda; \frac{T_3}{T_2} = \frac{P_3}{P_2} = \lambda,$$

Откуда:

$$P_3 = \lambda P_2 = 3,2 \cdot 1,3 \cdot 10^6 = 4,15 \cdot 10^6 \text{ Па} = 4,15 \text{ МПа}$$

и $T_3 = \lambda T_2 = 3,2 \cdot 512 \approx 1638 \text{ К}$.

Точка 4: Из рисунка видно, что $V_4 = V_1 = 0,43 \text{ м}^3$, а для адиабатного расширения имеем:

$$T_4 = T_3 \left(\frac{V_3}{V_4} \right)^{k-1} = T_3 \left(\frac{V_2}{V_1} \right)^{k-1}; T_4 = 1638 \cdot \left(\frac{1}{3,8} \right)^{0,4} \approx 960 \text{ К}.$$

Для давления P_4 в этом состоянии имеем: $\frac{P_4}{P_1} = \frac{T_4}{T_1}$, откуда $P_4 = P_1 \frac{T_4}{T_1}$

и $P_4 = 200 \cdot 10^3 \cdot \frac{960}{300} = 640 \cdot 10^3 \text{ Па} = 640 \text{ кПа}$.

Количество подведенного тепла:

$$Q_1 = mc_v(T_3 - T_2), \text{ где } c_v = \frac{R}{k-1} = \frac{286,7}{0,4} \approx 0,72 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$$

Тогда $Q_1 = 1 \cdot 0,72 \cdot (1638 - 512) \approx 807 \text{ кДж}$.

Соответственно, количество отведенного тепла $Q_2 = mc_v(T_4 - T_1)$,

или $Q_2 = 1 \cdot 0,72 \cdot (960 - 300) \approx 475 \text{ кДж}$.

Полезная работа за цикл $L = Q_1 - Q_2 = 807 \text{ кДж} - 475 \text{ кДж} = 332 \text{ кДж}$.

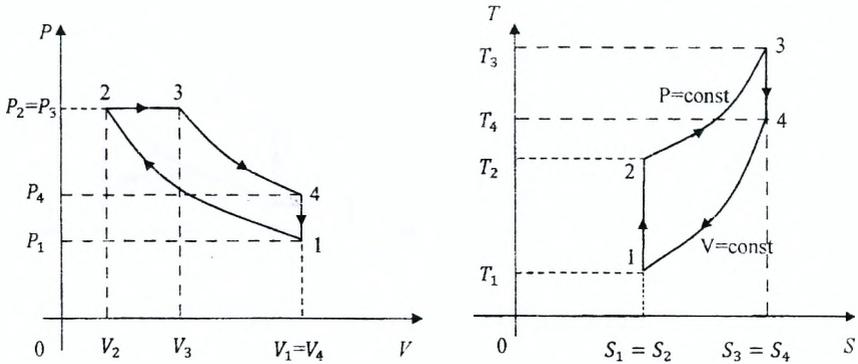
Термический КПД цикла: $\eta_t = \frac{L}{Q_1} = \frac{332}{807} = 0,41 \approx 41\%$

Проверим по другой формуле:

$$\eta_t = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{k-1}} = 1 - \frac{1}{3,8^{0,4}} \approx 0,41 = 41\%$$

Пример 2.2. Рассмотрим аналогичную задачу для цикла с подводкой тепла при $P = const$. Дано: $P_1 = 100 \text{ кПа}$; $T_1 = 300 \text{ К}$; $\varepsilon = 10$; $k = 1,4$; $m = 2 \text{ кг}$. Рабо-

чее тело – воздух. Теплоемкость считать постоянной. Степень изобарного расширения $\rho = 2$. Изобразить цикл в (P, V) и (T, S) диаграммах.



1→2 и 3→4 – адиабатные процессы, 2→3 – изобарный процесс, 4→1 – изохорный процесс.

Точка 1: $V_1 = \frac{mRT_1}{P_1} \approx 1,72 \text{ м}^3$.

Точка 2: $V_2 = \frac{V_1}{\varepsilon} \approx 0,17 \text{ м}^3$; $T_2 = T_1 \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{k-1} = T_1 \varepsilon^{k-1} \approx 754 \text{ К}$;

$$P_2 = P_1 \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^k = P_1 \varepsilon^k \approx 2,51 \text{ МПа}.$$

Точка 3: $\frac{T_2}{T_3} = \frac{V_2}{V_3} \rightarrow T_3 = T_2 \frac{V_3}{V_2} = T_2 \rho$; $T_3 = 754 * 2 = 1508 \text{ К}$;

$$V_3 = \rho V_2 = 0,34 \text{ м}^3$$
; $P_3 = P_2 = 2,51 \text{ МПа}.$

Точка 4: $V_4 = V_1 = 1,72 \text{ м}^3$; $P_4 = P_3 \left(\frac{V_3}{V_4}\right)^k$; $P_4 = 2,51 * 10^6 * \left(\frac{0,34}{1,72}\right)^{1,4} \approx$

260 кПа;

$$T_4 = T_1 \frac{P_4}{P_1} \Rightarrow T_4 \approx 779 \text{ К}.$$

Количество подведенного тепла:

$$Q_1 = mc_p(T_3 - T_2); c_p = \frac{Rk}{k-1} \approx 1,01 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} * \text{К}}; Q_1 \approx 1,52 * 10^6 \text{ Дж} = 1,52 \text{ МДж}.$$

Количество отведенного тепла:

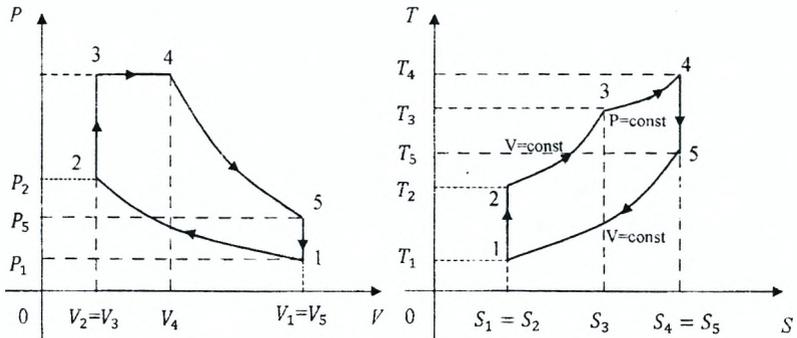
$$Q_2 = mc_v(T_4 - T_1); c_v = \frac{R}{k-1} = 0,72 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} * \text{К}}; Q_2 = 690 \text{ кДж}.$$

Работа за цикл: $L = Q_1 - Q_2 = 830 \text{ кДж}.$

КПД цикла: $\eta_t = \frac{L}{Q_1} = 0,55 = 55\%.$

Проверка: $\eta_t = 1 - \frac{\rho^{k-1}}{\varepsilon^{k-1}k(\rho-1)} \approx 0,55 = 55\%.$

Пример 2.3. Расчет цикла со смешанным подводом тепла (рабочее тело – воздух). Дано: $P_1 = 10^5 \text{ Па}$; $T_1 = 300 \text{ К}$; $\varepsilon = 7$; $\lambda = 2$; $\rho = 1,2$; $m = 2 \text{ кг}$; $k = 1,4$. Изобразить цикл на диаграммах (P, V) и (T, S) .



1→2 и 4→5 – адиабаты, 2→3 и 5→1 – изохоры, 3→4 – изобара.

Точка 1: $V_1 = \frac{mRT_1}{P_1} = 1,72 \text{ м}^3$.

Точка 2: $V_2 = \frac{V_1}{\epsilon} = 0,25 \text{ м}^3$; $T_2 = T_1 \epsilon^{k-1} = 653 \text{ К}$; $P_2 = P_1 \epsilon^k = 1,5 \text{ МПа}$.

Точка 3: $T_3 = T_2 \lambda = 1306 \text{ К}$; $V_3 = V_2 = 0,25 \text{ м}^3$; $P_3 = P_2 \lambda \approx 3 \text{ МПа}$.

Точка 4: $V_4 = V_3 \rho = 0,3 \text{ м}^3$; $T_4 = T_3 \rho = 1567 \text{ К}$; $P_4 = P_3 = 3 \text{ МПа}$.

Точка 5: $V_5 = V_1 = 1,72 \text{ м}^3$; $P_5 = P_4 \left(\frac{V_4}{V_5}\right)^k = 260 \text{ кПа}$; $T_5 = T_4 \left(\frac{V_4}{V_5}\right)^{k-1} \approx 780 \text{ К}$.

Количество подведенного тепла:

$$Q_1 = m \left(c_v(T_3 - T_2) + c_p(T_4 - T_3) \right);$$

$$Q_1 = 2 * (470 * 10^3 + 264 * 10^3) \approx 1,47 * 10^6 \text{ Дж} = 1,47 \text{ МДж}.$$

Количество отведенного тепла:

$$Q_2 = m c_v(T_5 - T_1); Q_2 = 2 * 0,72 * 480 * 10^3 \approx 0,7 * 10^6 \text{ Дж} = 0,7 \text{ МДж}.$$

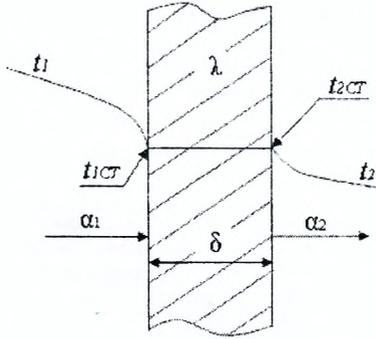
Работа цикла: $L = Q_1 - Q_2 \approx 770 \text{ кДж}$.

Термический КПД цикла: $\eta_t = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{Q_2}{Q_1} \approx 0,52 = 52\%$.

Проверка: $\eta_t = 1 - \frac{\lambda \rho^k - 1}{\epsilon^{k-1}(\lambda - 1 + k\lambda(\rho - 1))} \approx 0,53 = 53\%$.

Пример 3. Поверхность нагрева состоит из плоской стенки толщиной $\delta = 12 \text{ мм}$ и коэффициентом теплопроводности $\lambda = 60 \frac{\text{кВт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$. По одну сторону стенки течет горячая вода с температурой $t_1 = 150^\circ\text{C}$, а по другую: 1) вода с температурой $t_2 = 80^\circ\text{C}$; 2) воздух с температурой $t_2' = 40^\circ\text{C}$. Определить плотность теплового потока, коэффициент теплопередачи, а также температуры t_{1cm} и t_{2cm} на обеих поверхностях стенки.

Дано: 1) $\alpha_1 = 2 \frac{\text{кВт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$; $\alpha_2 = 1,6 \frac{\text{кВт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$; 2) $\alpha_1' = 2 \frac{\text{кВт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$; $\alpha_2' = 15 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$.



1) Коэффициент теплопередачи найдем по формуле (41а):

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda_{cm}} + \frac{1}{\alpha_2}};$$

$$k = \frac{1}{5 * 10^{-4} + 2 * 10^{-4} + 6,25 * 10^{-4}} = \frac{10^4}{13,25} \approx 755 \frac{Bm}{M^2 K}$$

Плотность теплового потока согласно (38):

$$q = k(t_1 - t_2); q = 755 * 70 \approx 53 \frac{\kappa Bm}{M^2}$$

Температуры на поверхностях стенки равны соответственно:

$$t_{1cm} = t_1 - q \frac{1}{\alpha_1}; t_{2cm} = t_1 - q \left(\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda_{cm}} \right) = t_2 + q \frac{1}{\alpha_2};$$

Произведем вычисления:

$$t_{1cm} = 150 - 53 * 10^3 * 5 * 10^{-4} \approx 123,5^\circ C;$$

$$t_{2cm} = 80 + 53 * 10^3 * 6,25 * 10^{-4} \approx 113^\circ C.$$

2) Так как по условию задачи $\alpha_2' \ll \alpha_1$, то очевидно $k \approx \alpha_1 = 15 \frac{Bm}{M^2 K}$.

Тогда: $q = k(t_1 - t_2); q = 15 * 110 = 1650 \frac{Bm}{M^2} = 1,65 \frac{\kappa Bm}{M^2}; t_{1cm}' \approx t_{2cm}' \approx t_1 = 150^\circ C.$

КОНТРОЛЬНАЯ РАБОТА

Задача 1. Считая теплоёмкость идеального газа зависящей от температуры, определить: параметры газа в начальном и конечном состояниях, изменение внутренней энергии, теплоту, участвующую в процессе, и работу расширения. Исходные данные, необходимые для решения задачи, выбрать из табл. 1.

Таблица 1.

Последняя цифра шифра	Процесс	$t_1, ^\circ\text{C}$	$t_2, ^\circ\text{C}$	Последняя цифра суммы шифра ст-та	Газ	$P_1, \text{МПа}$	$m, \text{кг}$
0	Изохорный	2400	400	0	N_2	1	2
1	Изобарный	2200	300	1	O_2	2	5
2	Адиабатный	2000	300	2	CO_2	3	5
3	Изохорный	1800	500	3	CO	4	4
4	Изобарный	1600	400	4	H_2	6	6
5	Адиабатный	1700	100	5	O_2	5	2
6	Изохорный	1900	200	6	CO_2	3	3
7	Изобарный	2100	500	7	H_2	4	4
8	Адиабатный	2300	300	8	CO	1	7
9	Изобарный	1500	100	9	N_2	7	2

Указание. Зависимость теплоёмкости от температуры дана в табл. V - XII уч-ка [4].

Задача 2(а). Для идеального цикла поршневого двигателя с подводом теплоты при $V = \text{const}$ определить параметры всех основных точек, полезную удельную работу, удельное количество подведённой и отведённой теплоты, термический КПД цикла Карно по условиям задачи, термический КПД цикла. Рабочее тело - воздух с газовой постоянной $R = 287 \text{ Дж}/(\text{кг К})$, показатель адиабаты $k = 1,4$. Теплоёмкость рабочего тела принять постоянной; $P_1 = 0,1 \text{ МПа}$; $T = 320 \text{ К}$. Степень сжатия ϵ и степень повышения давления λ выбрать из табл. 2 согласно варианту. Процесс Д.В.С. изобразить в PV и TS координатах.

Задача 2(б). Для идеального поршневого двигателя с подводом теплоты при $P = \text{const}$ определить параметры всех основных точек, полезную удельную работу, удельное количество подведённой и отведённой теплоты, термический КПД цикла Карно по условиям задачи, термический КПД цикла, если дано: $P_1 = 0,1 \text{ МПа}$; $T_1 = 350 \text{ К}$. Рабочее тело - воздух с газовой постоянной $R = 287 \text{ Дж}/(\text{кг К})$, показатель адиабаты $k = 1,4$. Теплоёмкость рабочего тела принять постоянной. Степень сжатия ϵ и степень изобарного расширения ρ выбрать из табл.2 согласно варианту. Процесс Д.В.С. изобразить в PV и TS координатах.

Задача 2 (в). В цикле поршневого двигателя со смешанным подводом теплоты начальное давление $P_1 = 0,1 \text{ МПа}$; начальная температура $t = 27^\circ\text{C}$. Степень сжатия ϵ и степень повышения давления λ , степень предварительного расширения ρ выбрать из табл.2 согласно своему варианту. Теплоёмкости принять постоянными: $c_v = 0,72 \text{ кДж}/(\text{кг К})$; $c_p = 1,01 \text{ кДж}/(\text{кг К})$. Показатель адиабаты $k = 1,4$. Определить параметры в характерных точках цикла, работу сжатия,

расширения и полезную, термический КПД цикла, удельное количество подведённой и отведённой теплоты, термический КПД цикла Карно по условию задачи. Процесс ДВС изобразить в PV и TS координатах.

Таблица 2.

Сумма букв фамилии студента	№ задачи	Сумма двух последних цифр шифра	Задача 2(б) $P=const$		Задача 2(а) $V=const$		Задача 2(в) $P=const; V=const$		
			ε	ρ	ε	λ	ε	λ	ρ
1	2(а)	10	16	2	4,00	3,00	12,0	1,4	1,6
2	2(в)	1	18	2,2	3,80	3,10	13,0	1,5	1,8
3	2(б)	2	20	2,4	3,60	3,20	12,7	1,8	1,9
4	2(а)	3	19	1,5	3,75	3,30	13,2	1,4	1,6
5	2(в)	4	17	1,6	4,10	3,00	14,1	1,3	1,6
6	2(б)	5	16	1,7	3,90	3,15	15,0	1,8	2,0
7	2(а)	6	14	1,8	3,70	3,60	14,0	1,7	1,8
8	2(в)	7	15	1,9	3,80	3,33	16,0	1,6	1,9
9	2(б)	8	20	2,1	4,00	3,60	13,0	1,4	1,7
10	2(а)	9	10	2,3	3,85	3,15	15,5	1,5	1,9

Примечание: если сумма букв фамилии студента больше 10-ти, необходимо вычесть число 10. Пример: фамилия студента Мирошниченко - 12 букв, $12-10=2$; т.о. вариант 2 - задача 2(в); также и для суммы двух последних цифр. Пример: сумма двух последних цифр шифра $2+9=11$, $11-10=1$.

Задача 3. Определить индикаторную и эффективную мощности четырёхтактного двигателя внутреннего сгорания по его конструктивным характеристикам, среднему индикаторному давлению P_i и индикаторному к.п.д. η_i . Определить также эффективный к. п. д. двигателя, часовой и эффективный удельный расход топлива (в граммах на киловатт-час), если известна низшая теплота сгорания топлива $Q_H^P = 43 \text{ МДж/кг}$.

Диаметр цилиндра D , среднюю скорость поршня c_m , число цилиндров z , отношение хода поршня к диаметру цилиндра S/D , среднее индикаторное давление P_i , индикаторный к.п.д. η_i , а также механический к.п.д. η_m , необходимые для решения задачи, выбрать из табл. 3.

Таблица 3.

Последняя цифра шифра	D , мм	c_m , м/сек	S/D	Последняя цифра суммы шифра ст-та	P_i бар	z	η_i	η_m
0	80	5,5	1,05	0	6,2	2	0,28	0,78
1	82	6,0	1,10	1	6,5	4	0,25	0,85
2	85	6,5	0,95	2	6,8	6	0,30	0,80
3	88	7,0	1,15	3	7,0	8	0,32	0,79
4	90	7,5	1,20	4	7,2	2	0,34	0,82
5	92	8,0	0,90	5	7,5	4	0,36	0,87
6	95	8,5	1,25	6	7,8	6	0,33	0,84
7	100	9,0	1,08	7	8,0	8	0,38	0,81
8	105	7,2	1,22	8	8,2	4	0,35	0,86
9	98	8,2	1,12	9	8,5	6	0,37	0,83

Задача 4. Определить количество теплоты, рассеиваемой водяным радиатором с наружной поверхности F_2 , если толщина стенок латунных трубок радиатора $\delta_{тр}=0.2$ мм, коэффициент теплоотдачи с внутренней (жидкостной) стороны a_1 с наружной воздушной стороны a_2 , отношение площади наружной поверхности к внутренней $F_2/F_1=4$, средняя температура жидкости в радиаторе $t_{ж.ср}=85^\circ\text{C}$, средняя температура воздуха в радиаторе $t_{в.ср}=55^\circ\text{C}$.

Определить, насколько изменится теплорассеивающая способность радиатора, если внутренняя поверхность радиатора будет покрыта слоем накипи толщиной $\delta_n=0.1$ мм; $\lambda_n=1,4 \text{ Вл/м}^2\text{ }^\circ\text{C}$; а наружная - слоем влажной пыли толщиной $\delta_p=0,1$ мм; $\lambda_p=0,2 \text{ Вл/м}^2\text{ }^\circ\text{C}$. Коэффициент теплопроводности латунных трубок $\lambda_{тр}=100 \text{ Вл/м}^2\text{ }^\circ\text{C}$. Данные к решению задачи выбрать из табл.5.

Таблица 4.

Сумма букв фамилии студента	Площадь наружной поверхности F_2 (м ²)	Последняя цифра шифра ст-та	Коэффициент теплоотдачи a_1 (Вл/м ² °C)	Пред-последняя цифра шифра	Коэффициент теплоотдачи a_2 (Вл/м ² °C)
10	28	0	8310	9	117
1	30	1	8320	8	119
2	32	2	8380	7	118
3	29	3	8360	6	115
4	28	4	8400	5	120
5	30	5	8500	4	125
6	29	6	8350	3	110
7	27	7	8250	2	114
8	32	8	8270	1	113
9	30	9	8300	0	112

Примечание: если сумма букв фамилии студента больше 10-ти, необходимо вычесть число 10 и по оставшемуся числу определить площадь наружной поверхности. Пример: фамилия студента Мирославский – 12 букв, $12 - 10 = 2$; т.о. вариант 2. Площадь $F_2 = 32\text{ м}^2$.

Задача 5. Определить средний коэффициент теплоотдачи и тепловой поток к стенке трубы, в которой при давлении $P = 1$ бар протекает воздух, если известны диаметр трубы d , длина трубы l , расход массы воздуха G , средняя температура воздуха $t_{воз}$ и средняя температура стенки трубы t_c .

Данные, необходимые для решения задачи, выбрать из табл.5.

Таблица 5.

Последняя цифра шифра	d , мм	l , м	Последняя цифра суммы шифра ст-та	G , кг/сек	t_c , °C	$t_{воз}$, °C
0	50	10,0	0	0,15	200	400
1	60	5,0	1	0,12	150	300
2	80	8,0	2	0,17	170	350
3	75	7,5	3	0,20	230	500
4	100	8,5	4	0,16	210	450
5	80	6,0	5	0,18	180	320
6	60	7,0	6	0,13	220	470
7	120	8,2	7	0,14	150	340
8	90	9,5	8	0,20	180	420
9	70	5,5	9	0,19	205	480

Указание. Задачу рекомендуется решать по формуле для продольного течения в трубах:

$Nu = 0,021 Re^{0,8} Pr^{0,43}$ (при $l/d > 50$), где за определяющую температуру принята средняя температура жидкости, а за определяющий размер – диаметр трубы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Техническая термодинамика и теплопередача / В.В. Нащокин. – М.: Высшая школа, 1980.
2. Основы теплопередачи / М.А. Михеев, И.М. Михеева. – М.: Энергия, 1977.
3. Теплотехника / М.М. Хазен, Г.А. Матвиевский. – М.: Высшая школа, 1981.
4. Сборник задач по технической термодинамике / О.М. Рабинович. М., Машиностроение, 1986.
5. Задачник по теплопередаче / Е.А. Краснощёков. – М.: Энергия, 1980.
6. Сборник задач по теплотехнике / Г.П. Панкратов. – М.: Высшая школа, 1986.
7. Автомобильные двигатели / С.Н.Богданов [и др.]. – М.: Машиностроение, 1987.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Таблица П1

Физические параметры сухого воздуха при давлении 101,3 кПа

$t, ^\circ\text{C}$	$10^2 \lambda, \text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$	$10^6 \nu, \text{м}^2/\text{с}$	P_r
0	2,44	13,28	0,707
100	3,21	23,13	0,688
200	3,94	34,85	0,680
300	4,60	48,33	0,674
400	5,21	63,09	0,678
500	5,75	79,38	0,687
600	6,23	96,89	0,699
700	6,71	115,4	0,706
800	7,19	134,8	0,713
900	7,64	155,1	0,717
1000	8,08	177,1	0,719

Таблица П2

Мольные теплоёмкости газов по данным молекулярно-кинетической теории

Газы	$\mu_{C_v}, \text{Дж}/(\text{моль}\cdot\text{К})$	$\mu_{C_p}, \text{Дж}/(\text{моль}\cdot\text{К})$
Одноатомные	12,5	20,8
Двухатомные	20,8	29,1
Трёх- и многоатомные	29,1	37,4

Таблица П3

Средние изобарные мольные теплоёмкости некоторых газов, $\kappa\text{Дж}/(\text{кмоль}\cdot\text{К})$

$t, ^\circ\text{C}$	Воздух	Кислород O_2	Азот N_2	Водород H_2	Водяной пар H_2O	Окись уг- лерода CO	Углекислый газ CO_2
0	29,073	29,274	29,115	28,617	33,499	29,123	35,860
100	29,153	29,538	29,144	29,935	33,741	29,178	38,112
200	29,299	29,931	29,228	29,073	34,188	29,303	40,059
300	29,521	30,400	29,383	29,123	34,575	29,517	41,755
400	29,789	30,878	29,601	29,186	35,090	29,789	43,250
500	30,095	31,334	29,864	29,249	35,630	30,099	44,573
600	30,405	31,761	30,149	29,316	36,195	30,426	45,758
700	30,723	32,150	30,451	29,408	36,789	30,752	46,813
800	31,028	32,502	30,748	29,517	37,392	31,070	47,763
900	31,321	32,825	31,037	29,647	38,008	31,376	48,617
1000	31,598	33,118	31,313	29,789	38,619	31,665	49,392
1200	32,109	33,633	31,828	30,107	39,825	32,192	50,740
1400	32,565	34,076	32,293	30,467	40,976	32,653	51,858
1600	32,967	34,474	32,699	30,832	42,056	33,051	52,800
1800	33,319	34,834	33,055	31,192	43,070	33,402	53,604
2000	33,641	35,169	33,373	31,548	43,995	33,708	54,290
2200	33,296	35,483	33,658	31,891	44,853	33,980	54,881
2400	34,185	35,785	33,909	32,222	45,645	34,223	55,391

Таблица П4

Физические и термодинамические параметры воздуха

P , бар	t_n , °C	v' , м ³ /кг	v'' , м ³ /кг	ρ , кг/м ³	i' , кДж/кг	i'' , кДж/кг	r , кДж/кг	s' , кДж/(кг град)	s'' , кДж/(кг град)
14	195,04	0,0011488	0,1408	7,102	830,0	2789,7	1959,7	2,2841	6,4699
16	201,36	0,0011587	0,1238	8,080	858,3	2793,5	1935,2	2,3437	6,4201
18	207,10	0,0011678	0,1104	9,055	884,2	2796,5	1212,3	2,3975	6,3794
20	212,36	0,0011768	0,09961	10,04	903,6	2799,2	1890,7	2,4471	6,3411
24	221,77	0,0011932	0,08324	12,01	951,8	2801,8	1850,0	2,5346	6,2727
28	230,04	0,0012088	0,0742	14,00	990,2	2803,1	1812,8	2,6101	6,2129
30	233,83	0,0012164	0,06663	15,01	1009,4	2803,1	1794,7	2,6455	6,1859
35	242,54	0,0012344	0,05706	17,53	1049,8	2802,8	1753,0	2,7251	6,1249
40	250,33	0,0912520	0,04977	20,09	1087,5	2800,6	1713,2	2,7965	6,0689
50	263,91	0,0012858	0,03943	25,36	1154,2	2793,9	1639,6	2,9210	5,9739
60	275,56	0,0013185	0,03243	30,84	1213,9	2784,4	1570,5	3,0276	5,8894
70	285,80	0,0013510	0,02738	36,53	1267,6	2772,3	1504,7	3,1221	5,8143
80	294,98	0,0013838	0,02352	42,52	1317,3	2758,6	1441,2	3,2079	5,7448
90	303,31	0,0014174	0,02049	48,80	1363,9	2742,6	1378,8	3,2866	5,6783
100	310,96	0,0014522	0,01803	55,47	1407,9	2724,8	1316,9	3,3601	5,6147
110	318,04	0,0014886	0,01597	62,62	1450,2	2705,2	1255,0	3,4297	5,5528
120	324,64	0,001527	0,01426	70,15	1491,1	2684,6	1193,5	3,4966	5,4930
130	330,81	0,001568	0,01278	78,22	1531,3	2662,3	1131,1	3,5606	5,4333
140	336,63	0,001611	0,01149	87,04	1570,8	2637,9	1067,0	3,6233	5,3731
160	347,32	0,001710	0,009319	107,3	1649,6	2581,7	932,1	3,7456	5,2478
180	356,96	0,001839	0,007505	133,2	1732,2	2510,6	778,4	3,8708	5,1054
200	365,71	0,00203	0,00586	170,5	1826,8	2410,3	583,4	4,0147	4,9280
220	373,7	0,00273	0,00367	272,5	2016,0	2168,0	152,0	4,3030	4,5910

Составители

Кандилян Генрик Серезаевич
Чугунов Сергей Владимирович

**Методические указания
и контрольные задания
по курсу “Термодинамика и
теплопередача”**

Ответственный за выпуск: Кандилян Г.С.

Редактор: Строкач Т.В.

Компьютерная верстка: Кармаш Е.Л.

Корректор: Никитчик Е.В.

Подписано к печати 16.12.2010 г. Формат 60×84 $\frac{1}{16}$. Гарнитура Times New Roman. Усл. печ. л. 1,16. Уч. изд. л. 1,25. Заказ № 1228. Тираж 100 экз. Отпечатано на ризографе учреждения образования «Брестский государственный технический университет». 224017, г. Брест, ул. Московская, 267