

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»

**МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ
ДО САМОСТІЙНОЇ РОБОТИ СТУДЕНТІВ ТА ВИКОНАННЯ
РОЗРАХУНКОВО-ГРАФІЧНИХ ЗАВДАНЬ**

З КУРСУ «ТЕХНІЧНА ТЕРМОДИНАМІКА»

для студентів спеціальностей:

142 «Енергетичне машинобудування»,
144 «Теплоенергетика» всіх форм навчання

Харків 2020

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ
ДО САМОСТІЙНОЇ РОБОТИ СТУДЕНТІВ ТА ВИКОНАННЯ
РОЗРАХУНКОВО-ГРАФІЧНИХ ЗАВДАНЬ

З КУРСУ «ТЕХНІЧНА ТЕРМОДИНАМІКА»

для студентів спеціальностей:

142 «Енергетичне машинобудування»,
144 «Теплоенергетика» всіх форм навчання

Затверджено
редакційно-видавничою
радою університету,
протокол № 1 від 19.02.2020 р.

Харків
НТУ «ХПІ»
2020

Методичні вказівки до самостійної роботи студентів та виконання розрахунково-графічних завдань з курсу «Технічна термодинаміка» для студентів спеціальностей: 142 «Енергетичне машинобудування», 144 «Теплоенергетика» всіх форм навчання / уклад. Ярошенко Т. І., Єна С.В. — Харків: НТУ «ХП», 2020. — 25 с.

Укладачі: Т. І. Ярошенко, С. В.Єна

Рецензент Т. М. Пугачова

Кафедра теплотехніки та енергоефективних технологій

ВСТУП

Дисципліна «Технічна термодинаміка» вимагає систематичного і послідовного вивчення, тобто вивчається студентами-заочниками шляхом самостійної роботи над підручниками і навчальними посібниками, список яких наведений наприкінці даних методичних вказівок. Оглядові лекції, що читають студентам-заочникам по основних розділах курсу, носять допоміжний характер і не замінюють самостійної роботи над навчальною літературою. Тому для виконання контрольних робіт студентові заочної форми навчання необхідно вивчити теоретичний матеріал, відповісти письмово на контрольні питання і вирішити відповідні розрахунково-графічні завдання.

Завдання на контрольну роботу для студентів очної та заочної форм навчання складається з трьох індивідуальних розрахунково-графічних завдань і з двох питань до кожного завдання. Відповіді на питання повинні бути короткими, але вичерпними, з графіками, схемами і рисунками, якщо це необхідно.

Номер варіанта завдання відповідає номеру студента за списком у журналі групи.

При цьому слід дотримуватися наступних правил:

1. Пояснювальна записка повинна бути оформлена чітко і акуратно, розбірливим почерком або на комп'ютері. На титульному аркуші необхідно вказати назву роботи, номер варіанта, групу, прізвище та ініціали.

2. Вихідні дані до розрахункового завдання мають бути виписані повністю згідно з номером варіанта.

3. Обчислення повинні супроводжуватися пояснювальним текстом з найменуванням величин, які обчислюються, і розмірністю в системі СІ.

4. Пояснювальна записка супроводжується зображеннями термодинамічних циклів або процесів, які побудовані в термодинамічних координатах (діаграмах), що вказані в завданні.

Роботи, в яких перераховані вище умови не виконані, до розгляду не приймаються.

Завдання 1. Розрахунок газової суміші

Аналіз продуктів згоряння палива показав такий об'ємний склад: r_{CO_2} , r_{H_2O} , r_{O_2} , r_{N_2} (у %). Визначити масовий склад вхідних у суміш газів: g_{CO_2} , g_{H_2O} , g_{O_2} , g_{N_2} ; молекулярну масу суміші, газову постійну суміші й окремих компонентів; щільність суміші й окремих компонентів; парціальні тиски газів; кількості тепла, що віддаються 1кг і 1м³ газової суміші в процесах з постійним тиском і з постійним об'ємом і при нормальних умовах.

Вихідні дані до завдання та номери контрольних питань наведені у таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 – Вихідні дані до завдання 1 та номери питань

Варіант	$r_{CO_2},\%$	$r_{H_2O},\%$	$r_{O_2},\%$	$r_{N_2},\%$	$t_1, ^\circ C$	$t_2, ^\circ C$	№ питань
1	12	7	3	78	1000	320	1, 6
2	11	6	3	80	1400	350	2, 7
3	12	7	5	76	1250	250	3, 8
4	10	5	4	81	1320	330	4, 16
5	13	5	5	77	1200	340	5, 17
6	15	7	1	77	1320	320	9, 4
7	10	6,5	6,5	77	1100	330	10, 5
8	13	5	4	78	1300	350	11, 6
9	12	5	9	74	1260	200	12, 7
10	14	3	6	77	900	220	13, 8
11	17	5	4	74	1520	300	14, 4
12	10	4	10	76	1300	330	15, 1
13	13	8	4	75	1400	330	16, 2
14	14	3	5	78	1300	320	17, 5
15	14	3	7	76	1400	340	1, 8
16	10	5	6	79	1500	340	2, 6
17	11	4	4	81	1250	250	3, 7
18	12	5	7	76	1400	310	4, 17
19	13	6	3	78	1000	330	5, 16
20	14	6	4	76	1200	340	9, 7

Методичні вказівки до виконання завдання 1

Масовий склад суміші перераховують через об'ємні частки за формулою

$$g_i = \frac{r_i \cdot \mu_i}{\sum_{i=1}^n r_i \cdot \mu_i}, \quad (1.1)$$

де μ_i – молекулярна маса компонента газової суміші, що знаходиться за таблицею додатка А; n – число компонентів суміші.

Уявну молекулярну масу суміші визначають за формулою, кг/кмоль

$$\mu_{см} = \sum_{i=1}^n r_i \cdot \mu_i. \quad (1.2)$$

Газову постійну суміші й окремих компонентів визначають за формулами, Дж/(кг К)

$$R_{см} = \frac{8314}{\mu_{см}}; \quad R_i = \frac{8314}{\mu_i}. \quad (1.3)$$

Густина суміші й окремих компонентів при нормальних фізичних умовах розраховується на підставі рівняння стану ідеального газу, кг/м³

$$\rho_{см} = \frac{1}{v_{см}} = \frac{p_H}{R_{см} \cdot T_H}, \quad \rho_i = \frac{1}{v_i} = \frac{p_H}{R_i \cdot T_H} \quad (1.4)$$

де $p_H = 1,013 \cdot 10^5$ Па; $T_H = 273$ К.

Парціальні тиски газів у суміші, мм рт. ст.

$$p_i = r_i \cdot p_{см}, \quad (1.5)$$

де $p_{см} = 760$ ммрт. ст.

Кількість теплоти, що віддається 1 кг газової суміші при охолодженні від t_1 до t_2 при постійному тиску, обчислюється за формулою, Дж/кг

$$q_p = t_2 \cdot \sum g_i c_{pm2i} - t_1 \cdot \sum g_i c_{pm1i}, \quad (1.6)$$

при постійному об'ємі

$$q_v = t_2 \cdot \sum g_i c_{vm2i} - t_1 \cdot \sum g_i c_{vm1i}, \quad (1.7)$$

де c_p і c_v – масові ізобарна й ізохорна теплоємності (додатки Б і В).

Кількість тепла, що віддається 1 м³ газової суміші при охолодженні від t_1 до t_2 при постійному тиску і постійному обсязі обчислюються аналогічно, Дж/м³

$$q'_p = t_2 \cdot \sum r_i c'_{pm2i} - t_1 \cdot \sum r_i c'_{pm1i}, \quad (1.8)$$

$$q'_v = t_2 \cdot \sum r_i c'_{vm2i} - t_1 \cdot \sum r_i c'_{vm1i}, \quad (1.9)$$

де c'_p і c'_v – об'ємні ізобарні й ізохорні теплоємності компонентів суміші (додатки Г і Д).

Правильність виконаних розрахунків можна перевірити за співвідношеннями:

$$Q_p = M \cdot q_p = V_n \cdot q'_p; \quad \frac{M}{V_n} = \frac{q'_p}{q_p} = \rho_{cm} \quad (1.10)$$

$$Q_v = M \cdot q_v = V_n \cdot q'_v; \quad \frac{M}{V_n} = \frac{q'_v}{q_v} = \rho_{cm} \quad (1.11)$$

Контрольні запитання до завдання 1

1. Що таке газова суміш? Обмеження, що стосуються на компонентів, з яких складається суміш газів? Наведіть приклади використання газових сумішей як робочих тіл.
2. Яка існує залежність між питомим об'ємом, густиною, молекулярною масою, газовою постійною та тиском газової суміші?
3. Яким чином можна задати склад газової суміші? Як здійснюється перерахунок одного складу суміші в інший?
4. Сформулюйте закон Дальтона для суміші газів.
5. Як записується закон Амага для суміші газів? Що таке приведений об'єм газу у суміші?
6. Як у загальному випадку визначається теплоємність робочого тіла? Дайте визначення середньої, істинної та питомої теплоємності.
7. Як співвідносяться ізобарна C_p й ізохорна C_v теплоємності для одного робочого тіла? Запишіть рівняння Майера. Що таке показник адіабати?
8. Як змінюється теплоємність робочого тіла зі збільшенням кількості атомів в молекулі? Чому дорівнює показник адіабати для одноатомних, двоатомних та багатоатомних (трьох і більше) газів?
9. Як визначити теплоємність суміші, якщо суміш задана масовими частками?
10. Як визначити теплоємність суміші, якщо суміш задана об'ємними частками?
11. Як визначити теплоємність суміші, якщо суміш задана мольними частками?
12. Як визначити газову постійну суміші, якщо суміш задана масовими частками?
13. Як визначити газову постійну суміші, якщо суміш задана об'ємними частками?
14. Чому молекулярну масу газової суміші називають середньою молекулярною масою? Як її обчислюють?
15. Що таке парціальний тиск газу у суміші? Як його обчислюють?
16. Як обчислити кількість теплоти, підведеної до газової суміші або відведеної від неї у будь-якому термодинамічному процесі, якщо маса суміші більше 1 кг й склад суміші задано масовими долями ?
17. Як обчислити кількість теплоти, підведеної до газової суміші або відведеної від неї у будь-якому термодинамічному процесі, якщо маса суміші більше 1 кг й склад суміші задано об'ємними долями ?

Завдання 2. Розрахунок термодинамічного циклу ідеального газу

Для процесів з повітрям: ізотермічного, ізохорного, адіабатного і ізобарного, які утворюють замкнутий цикл із заданими деякими параметрами, визначити:

- 1) параметри P, v, T і S у перехідних точках циклу;
- 2) роботу 1кг газу за цикл, як алгебраїчну суму робіт в окремих процесах циклу;
- 3) теж, як еквівалент алгебраїчної суми підведеного і відведеного тепла;
- 4) термічний ККД циклу.

Зобразити даний цикл у $P - v$ та $T - S$ діаграмах у масштабі.

Вихідні дані до завдання № 2 приведені у таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Вихідні дані до завдання 2 : P (бар), v ($\text{м}^3/\text{кг}$), t ($^{\circ}\text{C}$).

Варіант	Початкові параметри	Параметри перехідних точок	№ питань
1	$P_1=1$ $t_1=27$	$P_2=4$ $P_3=12$	1, 9
2	$P_1=1$ $v_1=0,9$	$P_2=6$ $P_3=14$	2, 10
3	$P_1=1,2$ $t_1=77$	$v_2=0,4$ $P_3=12$	4, 11
4	$P_1=6$ $t_1=27$	$P_2=24$ $P_3=50$	5, 12
5	$P_1=4$ $t_1=27$	$P_2=12$ $t_3=600$	6, 13
6	$P_1=1,4$ $t_1=47$	$P_2=7$ $t_3=1280$	7, 3
7	$P_1=3$ $t_1=67$	$v_2=0,16$ $P_3=30$	8, 14
8	$P_1=1,1$ $t_1=30$	$P_2=5$ $t_3=700$	1, 15
9	$P_1=1,3$ $v_1=1,5$	$v_2=0,4$ $P_3=14$	4, 16
10	$P_1=1,5$ $v_1=1,5$	$v_2=0,66$ $P_3=15$	5, 17
11	$P_1=1,5$ $v_1=1,6$	$v_2=0,64$ $t_3=2800$	6, 18
12	$v_1=0,6$ $t_1=20$	$P_2=8$ $P_3=35$	8, 3
13	$v_1=0,5$ $t_1=30$	$P_2=7$ $P_3=14$	7, 9
14	$v_1=0,9$ $t_1=40$	$P_2=6$ $P_3=18$	1, 10
15	$P_1=1$ $t_1=50$	$P_2=3$ $P_3=9$	8, 11
16	$P_1=1,2$ $t_1=60$	$v_2=0,5$ $t_3=1600$	7, 12
17	$P_1=1,4$ $t_1=70$	$v_2=0,6$ $t_3=1550$	4, 13
18	$P_1=1,6$ $t_1=80$	$v_2=0,4$ $t_3=1620$	5, 14
19	$P_1=4$ $t_1=40$	$P_2=8$ $P_3=25$	6, 15
20	$P_1=5$ $t_1=20$	$P_2=12$ $P_3=30$	2, 16

Методичні вказівки до виконання завдання 2

Для виконання завдання варто скористатися рівняннями відповідних термодинамічних процесів, на перетині яких лежать характерні точки циклу (рисунок 2.1), а також рівнянням стану ідеального газу.

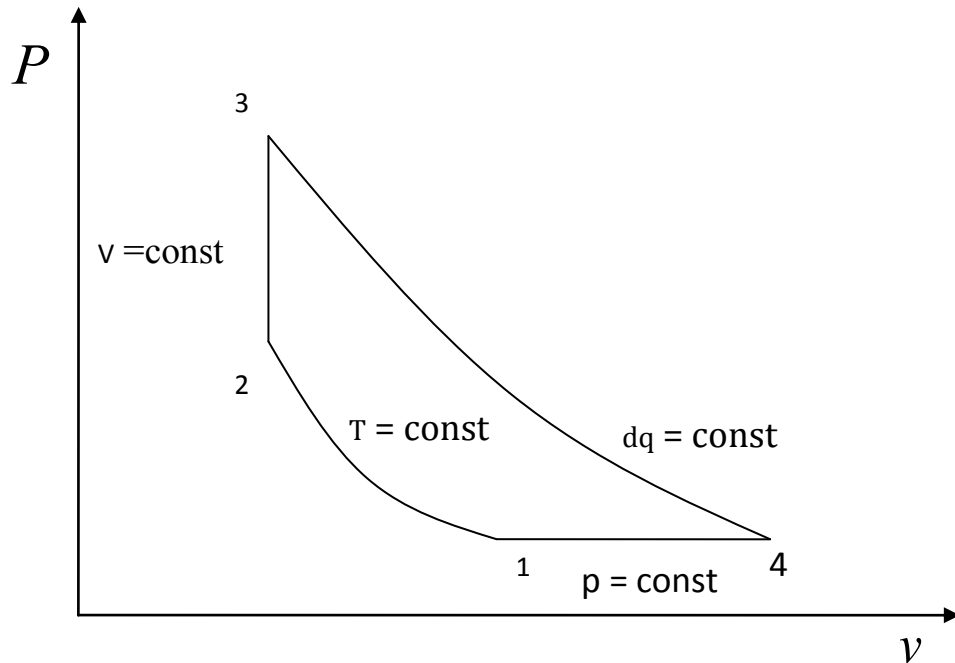


Рисунок 2.1 – Прямий цикл ідеальних газів

Наприклад, якщо для першої точки циклу за умовою задані тиск P_1 і температура T_1 , то питомий об'єм v_1 визначається виразом:

$$v_1 = \frac{R \cdot T_1}{P_1}. \quad (2.1)$$

Точка 2 лежить на перетині ізотерми 1–2 і ізохори 2–3, тому для переходу від точки 1 до точки 2 варто скористатися рівнянням ізотермічного процесу $T = \text{const}$, тобто $T_2 = T_1$.

Якщо за умови задачі для точки 2 заданий тиск P_2 , то питомий об'єм v_2 можна визначити, скориставшись співвідношенням, м³/кг :

$$v_2 = \frac{p_1 \cdot v_1}{p_2}, \quad (2.2)$$

або

$$v_2 = \frac{R \cdot T_2}{p_2}, \quad (2.3)$$

де газову постійну для повітря треба взяти з додатка А, таблиця А.1.
Аналогічно розраховуються відсутні v і T параметри для точок 3 і 4.

Ентропію будь-якої точки циклу S_i (де $i=1,4$) обчислюють за будь-якою із трьох формул:

$$\left. \begin{aligned} S_i &= c_p \cdot \ln \frac{T_i}{T_H} - R \cdot \ln \frac{p_i}{p_H} \\ S_i &= c_v \cdot \ln \frac{T_i}{T_H} + R \cdot \ln \frac{v_i}{v_H} \\ S_i &= c_p \cdot \ln \frac{v_i}{v_H} + c_v \cdot \ln \frac{p_i}{p_H} \end{aligned} \right\}, \quad (2.4)$$

де $c_v = \frac{R}{k-1}$ – ізохорна і $c_p = k c_v$ – ізобарна теплоємності повітря

(k – з додатка Б, таблиця Б.1); $v_H = \frac{R \cdot T_H}{p_H}$.

Робота зміни об'єму, Дж/кг :

- для ізотермічного процесу $l_{1-2} = p_1 v_1 \ln \frac{v_2}{v_1}; \quad (2.5)$

- для ізохорного процесу $l_{2-3} = 0; \quad (2.6)$

- для адіабатного процесу $l_{3-4} = \frac{R}{k-1} (T_3 - T_4); \quad (2.7)$

- для ізобарного процесу $l_{4-1} = p_4 (v_1 - v_4). \quad (2.8)$

Робота циклу обчислюється як алгебраїчна сума робіт в окремих процесах циклу

$$l_{\text{ц}} = l_{1-2} + l_{2-3} + l_{3-4} + l_{4-1}. \quad (2.9)$$

Кількість приведенного або відведеного тепла, Дж/кг

- для ізотермічного процесу $q_{1-2} = l_{1-2}; \quad (2.10)$

- для ізохорного процесу $q_{2-3} = c_v (T_3 - T_2); \quad (2.11)$

- для адіабатного процесу $q_{3-4} = 0; \quad (2.12)$

- для ізобарного процесу $q_{4-1} = c_p (T_1 - T_4). \quad (2.13)$

Робота циклу як еквівалент алгебраїчної суми підведеної і відведеної кількості теплоти

$$q_{\text{ц}} = q_{1-2} + q_{2-3} + q_{3-4} + q_{4-1}. \quad (2.14)$$

Термічний ККД циклу

$$\eta_t = \frac{l_{\text{ц}}}{q_{\text{підв.}}}, \quad (2.15)$$

де $q_{\text{підв}}$ – підведена кількість теплоти в циклі.

Контрольні запитання до завдання 2

1. Що таке ідеальний газ? Як записують рівняння Клапейрона і рівняння Менделєєва- Клапейрона? Поясніть сенс величин, що входять до вказаних рівнянь.

2. Чому дорівнює газова постійна конкретного газу і універсальна газова постійна?

3. Що таке термодинамічний процес? Приведіть основні різновиди термодинамічних процесів.

4. Що розуміється під внутрішньою енергією? Від чого залежить зміна внутрішньої енергії ідеального газу?

5. Сформулюйте сутність першого закону термодинаміки, напишіть математичні вираження першого закону через зміну внутрішньої енергії.

6. Наведіть другу форму запису першого закону термодинаміки (через ентальпію). Від чого залежить зміна ентальпії в термодинамічному процесі?

7. Що таке технічна робота і робота розширення? Дайте аналітичні вираження і графічне зображення в P - V координатах.

8. Дайте поняття ентропії як функції стану. Чому дорівнює зміна ентропії в будь-якому термодинамічному процесі? Як графічно зображується теплота процесу?

9. Дайте визначення політропних процесів. Доведіть, що ізохорний, ізобарний та адіабатний процеси є частковими випадками політропного процесу.

10. Як записується рівняння I закону термодинаміки для ізохорного процесу? Напишіть співвідношення для початкових та кінцевих параметрів процесу. Як обчислити зміну ентропії у процесі?

11. Як записується рівняння I закону термодинаміки для ізобарного процесу? Напишіть співвідношення для початкових та кінцевих параметрів процесу. Як обчислити зміну ентропії у процесі?

12. Як записується рівняння I закону термодинаміки для ізотермічного процесу? Напишіть співвідношення для початкових та кінцевих параметрів процесу. Як обчислити зміну ентропії у процесі?

13. Як записується рівняння I закону термодинаміки для адіабатного процесу? Напишіть співвідношення для початкових і та кінцевих параметрів процесу. Як обчислити зміну ентропії у процесі?

14. Що таке теплоємність? Від чого вона залежить? Чому дорівнює теплоємність в ізотермічному і в адіабатному процесі?

15. Де розташовані процеси на P - V діаграмі, які мають від'ємну теплоємність? Дайте графічні пояснення.

16. Що таке круговий процес або цикл? Які бувають цикли?

17. Що таке термічний ККД прямого циклу? Які значення він може набувати?

18. Які заходи обумовлюють підвищення термічного ККД? Чи можливо отримати термічний ККД циклу теплового двигуна більший за термічний ККД циклу Карно?

Завдання 3. Термодинамічні процеси водяної пари

За заданими двома початковими параметрами водяної пари визначити інші початкові параметри, а також знайти кінцеві параметри для заданого процесу. Визначити зміни внутрішньої енергії, фізичної ексергії, виконану роботу і кількість підведеного або віднятого тепла для 1 кг робочого тіла. Розв'язання задачі проілюструвати h - S – діаграмою. Вихідні дані: P (бар), v (м³/кг), t (°C), h (кДж/кг), S (кДж/кг К) до завдання наведені у табл. 3.1, номери контрольних запитань наведені у табл. 3.2.

Таблиця 3.1 – Вихідні дані до завдання 3

Варі ант	Початкові параметри		Кінцеві параметри			
			Ізохора	Ізобара	Ізотерма	Адіабата
1	$P_1 = 10$	$t_1 = 300$	$t_2 = 350$	$h_2 = 3500$	$h_2 = 2900$	$P_2 = 1$
2	$P_1 = 20$	$t_1 = 340$	$S_2 = 6,4$	$S_2 = 7,2$	$P_2 = 4$	$t_2 = 140$
3	$P_1 = 10$	$t_1 = 260$	$t_2 = 300$	$S_2 = 7,5$	$P_2 = 2$	$t_2 = 100$
4	$P_1 = 60$	$x_1 = 0,9$	$t_2 = 280$	$t_2 = 320$	$P_2 = 0,9$	$x_2 = 0,8$
5	$P_1 = 60$	$t_1 = 350$	$S_2 = 6,0$	$S_2 = 5,7$	$h_2 = 2800$	$x_2 = 0,95$
6	$P_1 = 16$	$t_1 = 300$	$x_2 = 1,0$	$x_2 = 0,86$	$S_2 = 7,5$	$h_2 = 2900$
7	$P_1 = 8$	$x_1 = 0,96$	$t_2 = 270$	$t_2 = 320$	$h_2 = 2500$	$h_2 = 2100$
8	$P_1 = 6$	$t_1 = 175$	$t_2 = 440$	$x_2 = 0,95$	$P_2 = 3$	$P_2 = 1$
9	$P_1 = 16$	$x_1 = 0,96$	$S_2 = 5,6$	$t_2 = 250$	$S_2 = 7,0$	$P_2 = 3$
10	$P_1 = 4$	$x_1 = 0,8$	$x_2 = 1,0$	$t_2 = 160$	$S_2 = 8,0$	$h_2 = 2500$
11	$P_1 = 20$	$t_1 = 400$	$x_2 = 0,95$	$h_2 = 3000$	$P_2 = 29$	$P_2 = 0,5$
12	$P_1 = 0,05$	$x_1 = 0,8$	$h_2 = 2500$	$t_2 = 50$	$S_2 = 8,0$	$v_1 = 35$
13	$P_1 = 14$	$h_1 = 2600$	$h_1 = 3200$	$t_2 = 320$	$S_2 = 6,4$	$h_2 = 2100$
14	$P_1 = 0,04$	$x_1 = 0,75$	$S_2 = 7,8$	$x_2 = 1,0$	$P_2 = 0,015$	$h_2 = 2100$
15	$P_1 = 0,06$	$x_1 = 0,8$	$t_2 = 100$	$h_2 = 2500$	$P_2 = 0,02$	$h_2 = 3000$
16	$P_1 = 125$	$t_1 = 520$	$h_1 = 2850$	$t_2 = 350$	$v_2 = 0,3$	$v_2 = 1,2$
17	$P_1 = 90$	$t_1 = 480$	$t_2 = 540$	$x_2 = 0,95$	$P_2 = 30$	$h_2 = 2100$

Таблиця 3.2 – Номери контрольних запитань до завдання 3

Варіант	Питання	Варіант	Питання
1	1, 14	10	10, 2
2	2, 15	11	11, 14
3	3, 16	12	12, 15
4	4, 17	13	13, 16
5	5, 11	14	9, 12
6	6, 14	15	12, 17
7	7, 15	16	13, 5
8	8, 16	17	4, 14
9	9, 17	18	5, 15

Методичні вказівки до виконання завдання 3

При виконанні завдання використовується h – S діаграма водяної пари (додаток Ж). Кожна точка на діаграмі характеризується наступними параметрами P , v , t , h , S й x . Таким чином, якщо початкова точка задана параметрами P_1 і t_1 , то визначивши положення точки 1 на перетині ізобари P_1 й ізотерми t_1 слід визначити: v_1 – по ізохорі, що проходить через дану точку; h_1 – по осі ординат; S_1 – по осі абсцис і x_1 – по лінії сталої сухості, що проходить через точку 1.

Для визначення кінцевих параметрів для кожного з чотирьох заданих процесів потрібно пройти з точки **1** по лінії процесу до перетину з лінією, обумовленою заданим параметром. Наприклад, якщо для кінцевої точки ізохорного процесу задана температура t_2 , то для знаходження точки 2 необхідно з точки 1 пройти лінією $v = \text{const}$ до перетину з ізотермою $t_2 = \text{const}$.

Зміна внутрішньої енергії Δu , виконана робота l та кількість підведеного або віднятого тепла q в кожному процесі визначається за рівнянням першого закону термодинаміки

$$q = \Delta u + l, \quad (3.1)$$

де $\Delta u = u_2 - u_1$.

Абсолютне значення внутрішньої енергії для будь якої точки процесу визначається співвідношенням

$$u_i = h_i - p_i v_i. \quad (3.2)$$

Кількість тепла q , що бере участь в ізотермічному процесі, визначається зміною ентропії:

$$q = T \Delta S. \quad (3.3)$$

Таким чином, розрахункові формули можна звести у таблиці 3.3.

Таблиця 3.3. Розрахункові формули для термодинамічних процесів

Процес	Зміна внутрішньої енергії	Робота	Кількість тепла
ізохора	$\Delta u = h_2 - h_1 - v(p_2 - p_1)$	$l = 0$	$q = \Delta u$
ізобара	$\Delta u = h_2 - h_1 - p(v_2 - v_1)$	$l = p(v_2 - v_1)$	$q = h_2 - h_1$
ізотерма	$\Delta u = h_2 - h_1 - (p_2 v_2 - p_1 v_1)$	$l = q - \Delta u$	$q = T(S_2 - S_1)$
адіабата	$\Delta u = h_2 - h_1 - (p_2 v_2 - p_1 v_1)$	$l = -\Delta u$	$q = 0$

Контрольні запитання до завдання 3

1. Укажіть сфери використання водяної пари як робочого тіла. Якою буває водяна пара?

2. Укажіть, чим відрізняються реальні тіла від ідеального газу. Запишіть рівняння Ван - дер Ваальса. Порівняйте його з рівнянням стану ідеального газу.

3. На P - v , T - S та h - S діаграмах нанесіть лінії, що характеризують ізобарний процес вироблення перегрітої водяної пари. Дайте необхідні пояснення.

4. Чим відрізняється суха насичена пара від вологої насиченої і перегрітої? Як визначається ступінь сухості пари, в якому інтервалі значень вона змінюється?

5. Наведіть фазову діаграму речовини. Які фазові області розділяє нижня прикордонна крива? Які фазові області розділяє верхня прикордонна крива?

6. На границі яких фазових областей знаходиться критична точка? Що таке критичний стан речовини? Наведіть значення критичних параметрів для водяної пари.

7. Яку величину називають теплотою пароутворення? Чому дорівнює теплота пароутворення у критичній точці?

8. Який фазовий перехід називають сублімацією? Який фазовий перехід називають плавленням? Який фазовий перехід називають твердінням? Надайте графічні пояснення на термодинамічній діаграмі в $P-v$ або $T-S$ координатах.

9. Який фазовий перехід називається кипінням? Який фазовий перехід називається конденсацією? Надайте графічні пояснення на термодинамічній діаграмі в $P-v$ або $T-S$ координатах.

10. Яка термодинамічна діаграма використовується при виконанні розрахунків з водяною парою? У чому полягають переваги цієї діаграми порівнянні з іншими? Наведіть робочу частину діаграми. Які лінії на ній нанесено?

11. Чому дорівнює зміна внутрішньої енергії водяної пари в ізотермічному процесі? Порівняйте з ідеальним газом.

12. Як визначають за $h-S$ діаграмою водяної пари температуру точки, що знаходиться в області вологої пари? Надайте графічні пояснення.

13. Як визначають за $h-S$ діаграмою водяної пари ентальпію рідини у стані кипіння?

14. У чому полягає процес дроселювання? Як змінюються параметри потоку при дроселюванні (тиск, швидкість, ентальпія і питомий об'єм)? Що відбувається з температурою потоку при дроселюванні водяної пари?

15. Дослідите процес дроселювання водяної пари за $h-S$ діаграмою. Що відбувається при дроселюванні сухої насиченої пари? Як змінюється працездатність водяної пари при дроселюванні?

16. Який термодинамічний процес описує витікання водяної пари? Як можна визначити швидкість і витрату водяної пари? Надайте графічну інтерпретацію процесу витікання у $h-S$ координатах.

17. Чим відрізняється реальний (дійсний) процес витікання водяної пари від теоретичного? Що таке швидкісний коефіцієнт і коефіцієнт втрат енергії? Надайте графічну інтерпретацію дійсного процесу витікання у $h-S$ координатах.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

Основна

1. Кириллин В. А. Техническая термодинамика / В. А. Кириллин, В.В. Сычев, А. Е. Шейдлин. – Москва: Энергия, 1974. – 447 с.
2. Техническая термодинамика : учеб. пособие для вузов / В. И. Крутов и др./ под ред. В. И. Крутова. – Москва: Высшая школа, 1991. – 344 с.
3. Бурлянда О. Ф. Технічна термодинаміка – / О.Ф. Бурлянда, Київ.: Техніка, 2001. – 320 с.

Додаткова

4. Сборник задач по технической термодинамике / Андрианова Т. Н., Дзампов Б. В., Зубарев В. Н., Ремизов С. А. – Москва: , 1981. – 206 с.
5. Рабинович О. М. Сборник задач по технической термодинамике / О. М. Рабинович. Москва: Машиностроение, 1973. – 344 с.

ДОДАТКИ

Додаток А. Фізичні постійні деяких газів

Газ	Хімічна формула	Молекулярна маса μ , $\frac{\text{Кг}}{\text{КМОЛЬ}}$	Газова постійна R , $\frac{\text{Дж}}{\text{Кг} \cdot \text{К}}$
Кисень	O_2	32	259,8
Азот	N_2	28,026	296,6
Повітря	-	28,96	287,04
Вуглекислий газ	CO_2	44,01	188,9
Водяна пара	H_2O	18,016	461,5

Додаток Б. Середня масова теплоємність газів при постійному тиску, кДж/(кг К)

$t, ^\circ\text{C}$	O_2	N_2	CO_2	H_2O
0	0,9148	1,0304	0,8148	1,8594
100	0,9232	1,0316	0,8658	1,8728
200	0,9353	1,0346	0,9102	1,8937
300	0,9500	1,0400	0,9487	1,9192
400	0,9651	1,0475	0,9826	1,9477
500	0,9793	1,0567	1,0128	1,9778
600	0,9927	1,0668	1,0396	2,0092
700	1,0048	1,0777	1,0639	2,0419
800	1,0157	1,0881	1,0852	2,0754
900	1,0258	1,0982	1,1045	2,1097
1000	1,0350	1,1078	1,1225	2,1436
1100	1,0434	1,1170	1,1384	2,1771
1200	1,0509	1,1258	1,1530	2,2106
1300	1,0580	1,1342	1,1660	2,2429
1400	1,0647	1,1422	1,1782	2,2743
1500	1,0714	1,1497	1,1895	2,3048
1600	1,0773	1,1584	1,1995	2,3346
1700	1,0831	1,1631	1,2091	2,3630
1800	1,0886	1,1690	1,2179	2,3907
1900	1,0940	1,1748	1,2259	2,4166
2000	1,0990	1,1803	1,2334	2,4422

**Додаток В. Середня масова теплоємність газів при постійному
об'ємі, кДж/(кг К)**

<i>t</i>, °C	O₂	N₂	CO₂	H₂O
0	0,6548	0,7352	0,6259	1,3980
100	0,6632	0,7365	0,6770	1,4114
200	0,6753	0,7394	0,7214	1,4323
300	0,6900	0,7448	0,7599	1,4574
400	0,7051	0,7524	0,7938	1,4863
500	0,7193	0,7616	0,8240	1,5160
600	0,7327	0,7716	0,8508	1,5474
700	0,7448	0,7821	0,8746	1,5805
800	0,7557	0,7926	0,8964	1,6140
900	0,7658	0,8030	0,9157	1,6483
1000	0,7750	0,8127	0,9332	1,6823
1100	0,7834	0,8219	0,9496	1,7158
1200	0,7913	0,8307	0,9638	1,7488
1300	0,7984	0,8390	0,9772	1,7815
1400	0,8051	0,8470	0,9893	1,8129
1500	0,8114	0,8541	1,0006	1,8434
1600	0,8173	0,8612	1,0107	1,8728
1700	0,8231	0,8675	1,0203	1,9016
1800	0,8286	0,8738	1,0291	1,9293
1900	0,8340	0,8792	1,0371	1,9552
2000	0,8390	0,8847	1,0446	1,9804

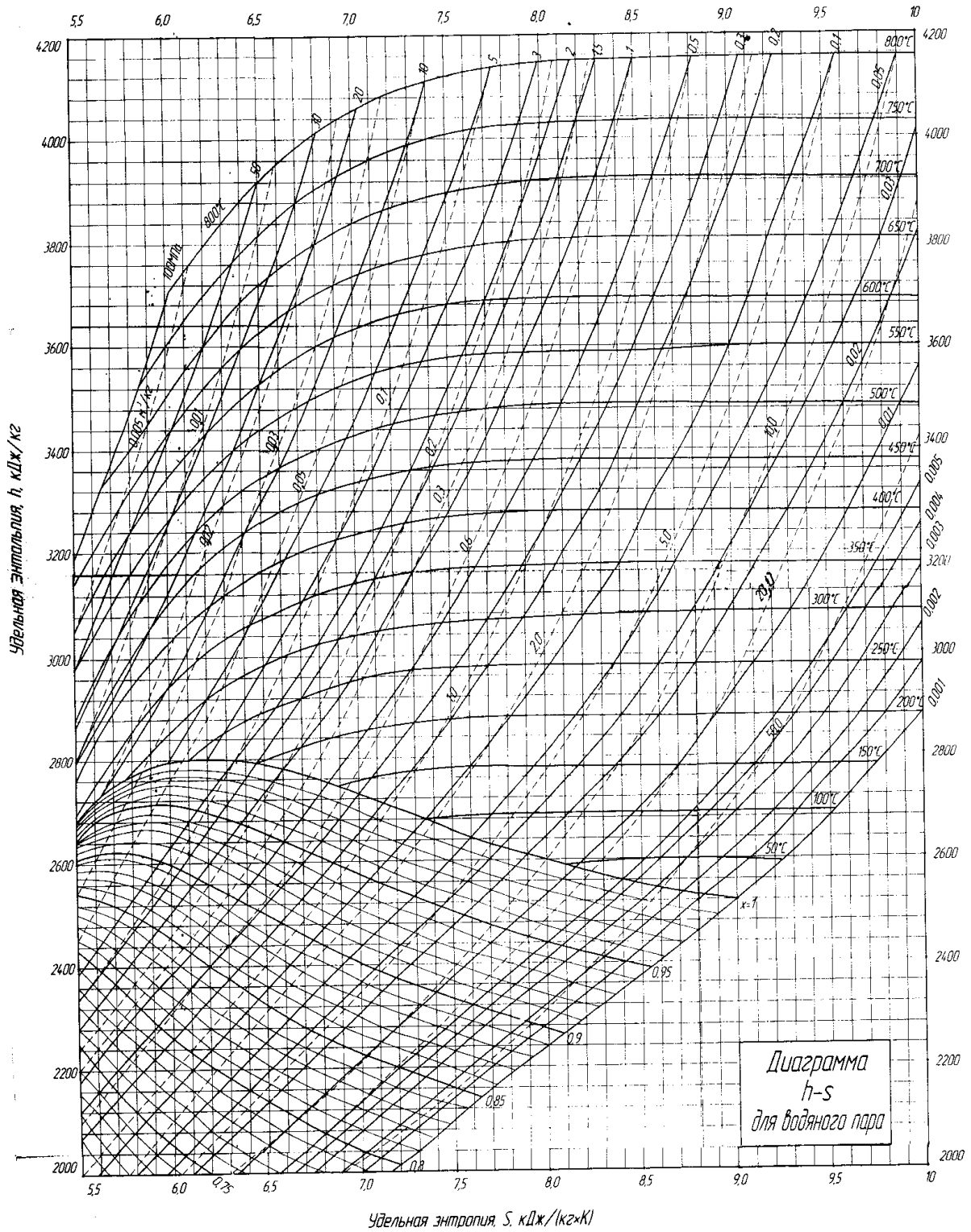
Додаток Г. Середня об'ємна теплоємність газів при постійному тиску, кДж/(м³ К)

$t, ^\circ\text{C}$	O_2	N_2	CO_2	H_2O
0	1,3059	1,2946	1,5998	1,4943
100	1,3176	1,2958	1,7003	1,5052
200	1,3352	1,2996	1,7873	1,5223
300	1,3561	1,3067	1,8627	1,5424
400	1,3775	1,3163	1,9297	1,5654
500	1,3980	1,3276	1,9887	1,5897
600	1,4168	1,3402	2,0411	1,6148
700	1,4344	1,3536	2,0884	1,6412
800	1,4499	1,3670	2,1311	1,6680
900	1,4645	1,3796	2,1692	1,6957
1000	1,4775	1,3917	2,2035	1,7229
1100	1,4892	1,4034	2,2349	1,7501
1200	1,5005	1,4143	2,2638	1,7769
1300	1,5106	1,4252	2,2898	1,8028
1400	1,5202	1,4348	2,3136	1,8280
1500	1,5294	1,4440	2,3354	1,8527
1600	1,5378	1,4528	2,3555	1,8761
1700	1,5462	1,4612	2,3743	1,8996
1800	1,5541	1,4687	2,3915	1,9213
1900	1,5617	1,4758	2,4074	1,9423
2000	1,5692	1,4825	2,4221	1,9628

Додаток Д. Середня об'ємна теплоємність газів при постійному об'ємі, кДж/(м³ К)

<i>t</i> , °С	O₂	N₂	CO₂	H₂O
0	0,9349	0,9236	1,2288	1,1237
100	0,9466	0,9249	1,3293	1,1342
200	0,9642	0,9286	1,4164	1,1514
300	0,9852	0,9357	1,4918	1,1715
400	1,0065	0,9454	1,5587	1,1945
500	1,0270	0,9567	1,6178	1,2188
600	1,0459	0,9692	1,6701	1,2439
700	1,0634	0,9826	1,7174	1,2703
800	1,0789	0,9960	1,7601	1,2971
900	1,0936	1,0086	1,7982	1,3247
1000	1,1066	1,0207	1,8326	1,3519
1100	1,1183	1,0325	1,8640	1,3791
1200	1,1296	1,0434	1,8929	1,4059
1300	1,1396	1,0542	1,9188	1,4319
1400	1,1493	1,0639	1,9427	1,4570
1500	1,1585	1,0731	1,9644	1,4817
1600	1,1669	1,0819	1,9845	1,5052
1700	1,1752	1,0902	2,0034	1,5286
1800	1,1832	1,0978	2,0205	1,5504
1900	1,1907	1,1049	2,0365	1,5713
2000	1,1978	1,1116	2,0511	1,5918

Додаток Е. $h-s$ -діаграма водяної пари



ЗМІСТ

ВСТУП.....	3
ЗАВДАННЯ № 1. Розрахунок газової суміші.....	4
ЗАВДАННЯ №2.Розрахунок термодинамічного циклу ідеального газу.....	8
ЗАВДАННЯ № 3. Термодинамічні процеси водяної пари.....	13
СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ.....	17
ДОДАТОК А.....	18
ДОДАТОК Б.....	19
ДОДАТОК В.....	20
ДОДАТОК Г.....	21
ДОДАТОК Д.....	22
ДОДАТОК Е.....	23

Навчальне видання

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

**до самостійної роботи студентів та виконання розрахунково -
графічних завдань**

з курсу «Технічна термодинаміка» для студентів спеціальностей:
«Енергетичне машинобудування», «Теплоенергетика» всіх форм навчання

Укладачі ЯРОШЕНКО Тетяна Іванівна
ЄНА Світлана Василівна

Відповідальний за випуск проф. Антон ГАНЖА
Роботу до видання рекомендував проф. Юрій РОМАШОВ

В авторській редакції

План 2019 р., поз. 17

Підп. до друку 03.12.2020.

Гарнітура Таймс. Ум. друк. арк.

Електронна версія