

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«ДНІПРОВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»**



**ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНИЙ ФАКУЛЬТЕТ
Кафедра електроенергетики**

Г.С. Олішевський

**Методичні рекомендації
до виконання індивідуальних завдань
з дисципліни «Технічна термодинаміка та тепломасообмін»
для студентів спеціальності
141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка**

Дніпро
НТУ «ДП»
2019

Олішевський Г.С.

Методичні рекомендації до виконання індивідуальних завдань з дисципліни «Технічна термодинаміка та тепломасообмін» для студентів спеціальності 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка / Г.С. Олішевський; М-во освіти і науки України, Нац. техн. ун-т. «Дніпровська політехніка». – Дніпро: НТУ «ДП», 2019. – 36 с.

Автор:

Г.С. Олішевський, канд. техн. наук, доц.

Затверджено методичною комісією за спеціальністю 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка (протокол № 19/20-1 від 11.09.2019 р.) за поданням кафедри електроенергетики (протокол № 1 від 04.09.2019 р.)

Методичні рекомендації призначено для виконання індивідуальних завдань з дисципліни «Технічна термодинаміка та тепломасообмін» студентами спеціальності 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

Орієнтовано на активізацію навчальної діяльності бакалаврів та закріплення практичних знань з даної дисципліни.

Відповідальний за випуск виконуючий обов'язки завідувача кафедри електроенергетики В.М. Рогоза, канд. техн. наук, проф.

ЗМІСТ

Вступ.....	4
Методичні рекомендації з теми "Термодинамічні процеси ідеальних газів".....	5
Методичні рекомендації з теми "Термодинамічні процеси водяної пари".....	8
Індивідуальне завдання № 1 "Термодинамічні процеси та цикли ідеальних газів" "Термодинамічні процеси водяної пари" "Процеси витікання газів та парів".....	10
Індивідуальне завдання № 2 "Теплообмінні апарати".....	24
Список рекомендованої літератури.....	31
Питання до складання екзамену (заліку).....	31

ВСТУП

Мета даних методичних рекомендацій – забезпечення самостійного вивчення основних розділів таких дисциплін як "Термодинаміка", "Теоретичні основи теплотехніки", "Технічна термодинаміка та тепломасообмін", "Енергетичні установки" для формування у студентів стійких знань і умінь виконувати широке коло основних теплотехнічних розрахунків.

Методичні рекомендації складаються із двох індивідуальних завдань з основних тем термодинаміки та тепломасообміну. Перше завдання відповідає вивченню головних законів термодинаміки, термодинамічних процесів і витікання ідеальних та реальних газів. У другому завданні розглянуто основи розрахунку теплообмінних апаратів.

Кожне завдання супроводжується докладними методичними рекомендаціями щодо алгоритму розв'язання, а також відповідним довідковим матеріалом, поданим у табличній формі. До кожного завдання додається широкий набір вихідних даних.

Для самостійної проробки студентами теоретичного матеріалу нижче вказується література, наявна в достатній кількості в бібліотеці університету.

Порядок знаходження свого варіанту завдання

Кожен студент отримує тризначний номер свого варіанту, наприклад **№203**. Це означає, що для **ІНДИВІДУАЛЬНОГО ЗАВДАННЯ №1** слід відшукати **Базовий варіант №2**, який відповідає першій цифрі номера варіанту, і у відповідній таблиці виписати вихідні дані, які відповідають номеру цього варіанту. В свою чергу для **ІНДИВІДУАЛЬНОГО ЗАВДАННЯ №2** слід звертати увагу лише на дві останні цифри номеру варіанта, в нашому прикладі це **03**, що відповідає варіанту **№03**.

МЕТОДИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ З ТЕМИ ТЕРМОДИНАМІЧНІ ПРОЦЕСИ ІДЕАЛЬНИХ ГАЗІВ

Примітка. У варіантах теплоємності вважати як такі, що не залежать від температури та тиску і розраховувати їх на підставі таблиці приблизних значень мольних теплоємностей (табл. 1.1).

Приблизні значення масових теплоємностей визначати за формулою

$$c = \frac{\mu c}{\mu},$$

де відповідні мольні теплоємності брати з табл. 1.1.

Таблиця 1.1

Приблизні значення мольних теплоємностей

Гази	Мольні теплоємності, $\frac{\text{кДж}}{\text{кмоль К}}$		Показник адиабати $k = \frac{\mu c_p}{\mu c_v} = \frac{c_p}{c_v}$
	μc_v	μc_p	
Одноатомні	12,5	20,8	1,67
Двоатомні	20,8	29,1	1,4
Трьох та багатоатомні	29,1	37,4	1,29

Відсутні параметри стану рекомендується знаходити за допомогою рівняння стану

$$p V = M R T,$$

де R – газова стала конкретного газу, що знаходиться за формулою $R = \frac{8314}{\mu}$; V – об'єм, м^3 ; M – маса газу, кг ; μ – молекулярна маса газу, кг/кмоль .

Таблиця 1.2

Співвідношення параметрів термодинамічних процесів

Ізохорний	Ізотермічний	Ізобарний
$\frac{p_2}{p_1} = \frac{T_2}{T_1}$	$p_1 v_1 = p_2 v_2$	$\frac{v_2}{v_1} = \frac{T_2}{T_1}$
Адіабатний		
$\frac{p_2}{p_1} = \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^k$	$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^{k-1}$	$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{k-1}{k}}$
Політропний		
$\frac{p_2}{p_1} = \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^m$	$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^{m-1}$	$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{m-1}{m}}$

Також відсутні параметри стану можна знайти із відповідних співвідношень для різних процесів, наведених у табл. 1.2.

У табл. 1.2 наведено параметр стану, який називається питомим об'ємом. Він визначається за формулою

$$v = \frac{V}{M} .$$

Показник політропи m у політропному процесі можна визначити за формулою

$$m = \frac{\ln \frac{p_2}{p_1}}{\ln \frac{v_1}{v_2}} .$$

Зміну калоричних параметрів, а також теплоту та роботу у термодинамічних процесах ідеальних газів визначають за формулами, що наведені у табл. 1.3.

Таблиця 1.3

Основні залежності термодинамічних процесів ідеального газу

Ізохорний	Ізобарний	Ізотермічний
$\Delta U_{1-2} = M c_v (T_2 - T_1) ;$	$\Delta U_{1-2} = M c_v (T_2 - T_1) ;$	$\Delta U_{1-2} = 0 ;$
$\Delta I_{1-2} = M c_p (T_2 - T_1) ;$	$\Delta I_{1-2} = M c_p (T_2 - T_1) ;$	$\Delta I_{1-2} = 0 ;$
$\Delta S_{1-2} = M c_v \ln \frac{T_2}{T_1} ;$	$\Delta S_{1-2} = M c_p \ln \frac{T_2}{T_1} ;$	$\Delta S_{1-2} = M R \ln \frac{v_2}{v_1} ;$
$L_{1-2} = 0 ;$	$L_{1-2} = M p_1 (v_2 - v_1) ;$	$\Delta L_{1-2} = M T_1 R \ln \frac{v_2}{v_1} ;$
$Q_{1-2} = \Delta U_{1-2} .$	$Q_{1-2} = \Delta U_{1-2} + L_{1-2} = \Delta I_{1-2} .$	$Q_{1-2} = L_{1-2} .$
Адіабатний		Політропний
$\Delta U_{1-2} = M c_v (T_2 - T_1) ;$		$\Delta U_{1-2} = M c_v (T_2 - T_1) ;$
$\Delta I_{1-2} = M c_p (T_2 - T_1) ;$		$\Delta I_{1-2} = M c_p (T_2 - T_1) ;$
$\Delta S_{1-2} = 0 ;$		$\Delta S_{1-2} = M c_v \frac{m-k}{m-1} \ln \frac{T_2}{T_1} ;$
$L_{1-2} = \frac{M R}{k-1} (T_1 - T_2) ;$		$L_{1-2} = \frac{M R}{m-1} (T_1 - T_2) ;$
$Q_{1-2} = 0 .$		$Q_{1-2} = \Delta U_{1-2} + L_{1-2} .$

Приклади задач для самопідготовки до екзамену

2 м³ азоту ($\mu=28$ кг/кмоль) при абсолютному тиску 2 бар і температурі 33 °С ізотермічно стискаються в 2 рази. Визначити початковий і кінцевий питомі об'єми газу, кількість відведеної теплоти, роботу стиску та зміну внутрішньої енергії. Зобразити процес у $p - v$ та $T - s$ діаграмах.

Об'єм 1 кг повітря ($\mu=29$ кг/кмоль) при адіабатному стиску в циліндрі дизеля зменшується в 4 рази. Початкова температура повітря 35 °С, а початковий тиск 1 бар. Визначити температуру і тиск повітря після стиску, зміну його внутрішньої енергії та роботу стиску. Зобразити процес у $p - v$ та $T - s$ діаграмах.

2 кг повітря ($\mu=29$ кг/кмоль) при тиску 0,3 МПа і температурі 18 °С політропно стискається в 3,2 рази з показником політропи $m=1,3$. Визначити усі відсутні параметри стану на початку та наприкінці процесу, зміну внутрішньої енергії, роботу і теплоту процесу. Побудувати графіки процесу в $p - v$ та $T - s$ координатах.

2 кг гелію ($\mu=4$ кг/кмоль) з тиском 2,7 бар і температурою 35 °С ізобарно розширюється в 2 рази, після чого ізотермічно стискається в 3 рази. Визначити відсутні параметри стану на початку та наприкінці кожного процесу, а також сумарні роботу та теплоту даних процесів. Зобразити процеси в $p - v$ та $T - s$ діаграмах.

5 м³ азоту ($\mu=28$ кг/кмоль) при надлишковому тиску 2 бар і температурі 35 °С ізохорно нагрівають до температури 150 °С. Дослідити газовий термодинамічний процес. Зобразити процес у $p - v$ та $T - s$ діаграмах. Атмосферний тиск прийняти рівним 1 бар.

2 м³ аргону ($\mu=40$ кг/кмоль) при надлишковому тиску 3 бар і температурі 20 °С ізобарно нагрівають до температури 120 °С. Дослідити газовий термодинамічний процес. Зобразити процес у $p - v$ та $T - s$ діаграмах. Атмосферний тиск прийняти рівним 1 бар.

МЕТОДИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ З ТЕМИ ТЕРМОДИНАМІЧНІ ПРОЦЕСИ ВОДЯНОЇ ПАРИ

Методичні рекомендації

Усі параметри пари в характерних точках процесів визначаються за $i - s$ діаграмою водяної пари. Початкову точку процесу на $i - s$ діаграмі знаходять на перетині двох відповідних ізоліній за умовами задачі. Далі знаходять інші параметри пари, спостерігаючи – які відповідні параметрам ізолінії (ізотерми, ізобари, ізохори і т.ін.) проходять через дану точку або поблизу неї. Термодинамічні процеси проводять із початкової точки процесу по ізолінії, яка відповідає тому чи іншому термодинамічному процесу (ізотермі, ізобарі, адіабаті і т.ін.) до перетину з ізолінією, що відповідає параметру, заданому за умовами задачі.

Такий параметр стану, як питома внутрішня енергія знаходять за формулою

$$u = i - p v .$$

Основні формули щодо розрахунку роботи, теплоти та зміни внутрішньої енергії у парових термодинамічних процесах наведені у табл. 1.4.

Таблиця 1.4

Основні залежності парових термодинамічних процесів

Процес	Питома зміна внутрішньої енергії, Дж/кг	Питома робота, Дж/кг	Питома теплота, Дж/кг
Ізохорний	$\Delta u_{1-2} = u_2 - u_1$	$l_{1-2} = 0$	$q_{1-2} = \Delta u_{1-2}$
Ізобарний		$l_{1-2} = q_{1-2} - \Delta u_{1-2} = p_1 (v_2 - v_1)$	$q_{1-2} = \Delta i_{1-2} = i_2 - i_1$
Ізотермічний		$l_{1-2} = q_{1-2} - \Delta u_{1-2}$	$q_{1-2} = T_1 (s_2 - s_1)$
Адiabатний		$l_{1-2} = -\Delta u_{1-2}$	$q_{1-2} = 0$

Приклади задач для самопідготовки до екзамену

Водяна пара тиском 7 бар і температурою 270 °С адіабатно розширюється до ступеня сухості $x=0,95$, після чого ізотермічно розширюється до тиску 0,2 бар. Визначити стан водяної пари і всі її параметри в характерних точках процесів, а також зміну внутрішньої енергії, роботу і кількість теплоти процесів. Зобразити процеси в $i - s$, $p - v$, $T - s$ координатах.

Водяна пара тиском 5 бар і ступенем сухості $x=0,93$ ізобарно розширюється до стану сухої насиченої пари, після чого ізотермічно розширюється до тиску 2 бар. Визначити стан водяної пари і всі її параметри в характерних точках процесів, а також зміну внутрішньої енергії, роботу і кількість теплоти процесів. Зобразити процеси в $i - s$, $p - v$, $T - s$ координатах.

Водяна пара тиском 50 бар і температурою 340 °С ізотермічно розширюється до тиску 15 бар, після чого ізобарно нагрівається до температури 450 °С. Визначити стан водяної пари і всі її параметри в характерних точках процесів, а також зміну внутрішньої енергії, роботу і кількість теплоти процесів. Зобразити процеси в $i - s$, $p - v$, $T - s$ координатах.

Водяна пара тиском 26 бар і температурою 330 °С ізобарно нагрівається до температури 410 °С, після чого ізотермічно розширюється до тиску 6 бар. Визначити стан водяної пари і всі її параметри в характерних точках процесів, а також зміну внутрішньої енергії, роботу і кількість теплоти процесів. Зобразити процеси в $i - s$, $p - v$, $T - s$ координатах.

Водяна пара тиском 9 бар і ступенем сухості $x=0,89$ ізохорно нагрівається до температури 340 °С, після чого ізотермічно стискується до тиску 45 бар. Визначити стан водяної пари і всі її параметри в характерних точках процесів, а також зміну внутрішньої енергії, роботу і кількість теплоти процесів. Зобразити процеси в $i - s$, $p - v$, $T - s$ координатах.

Водяна пара тиском 1,6 бар і температурою 260 °С ізобарно охолоджується до ступеня сухості $x=0,9$, після чого ізохорно нагрівається до температури 310 °С. Визначити стан водяної пари і всі її параметри в характерних точках процесів, а також зміну внутрішньої енергії, роботу і кількість теплоти процесів. Зобразити процеси в $i - s$, $p - v$, $T - s$ координатах.

ІНДИВІДУАЛЬНЕ ЗАВДАННЯ № 1
ТЕРМОДИНАМІЧНІ ПРОЦЕСИ ТА ЦИКЛИ ІДЕАЛЬНИХ ГАЗІВ
ТЕРМОДИНАМІЧНІ ПРОЦЕСИ ВОДЯНОЇ ПАРИ
ПРОЦЕСИ ВИТІКАННЯ ГАЗІВ ТА ПАРІВ

Методичні рекомендації

5.1. При розв'язанні **задачі № 1** для дослідження термодинамічних процесів ідеальних газів слід використовувати методичні рекомендації, що були наведені вище. Для визначення основних параметрів циклів ідеальних газів нижче наведені такі залежності:

$$\Delta u_{\text{ц}} = \Delta u_{1-2} + \Delta u_{2-3} + \Delta u_{3-1} , \quad (5.1)$$

$$l_{\text{ц}} = l_{1-2} + l_{2-3} + l_{3-1} , \quad (5.2)$$

$$q_{\text{ц}} = q_{1-2} + q_{2-3} + q_{3-1} , \quad (5.3)$$

$$\Delta i_{\text{ц}} = \Delta i_{1-2} + \Delta i_{2-3} + \Delta i_{3-1} , \quad (5.4)$$

$$\Delta s_{\text{ц}} = \Delta s_{1-2} + \Delta s_{2-3} + \Delta s_{3-1} . \quad (5.5)$$

Для визначення термічного ККД циклу слід використовувати формулу

$$\eta_t = \frac{l_{\text{ц}}}{q_{\text{підв}}} , \quad (5.6)$$

де $q_{\text{підв}}$ – питома теплота, що була підведена до робочого тіла за увесь цикл, Дж/кг.

Середні температури підводу та відводу теплоти за цикл визначають за такими формулами:

$$T_{\text{ср.підв}} = \frac{q_{\text{підв}}}{\Delta s_{\text{підв}}} , \quad (5.7)$$

$$T_{\text{ср.відв}} = \frac{q_{\text{відв}}}{\Delta s_{\text{відв}}} , \quad (5.8)$$

де $q_{\text{відв}}$ – питома теплота, що була відведена від робочого тіла за увесь цикл, Дж/кг; $\Delta s_{\text{підв}}$ – сумарна зміна ентропії у процесах, до яких підводилася теплота в циклі, $\frac{\text{Дж}}{\text{кг К}}$; $\Delta s_{\text{відв}}$ – сумарна зміна ентропії у процесах, від яких

відводили теплоту в циклі, $\frac{\text{Дж}}{\text{кг К}}$.

Таким чином, також можна визначити термічний ККД циклу за формулою

$$\eta_t = 1 - \frac{T_{\text{ср.відв}}}{T_{\text{ср.підв}}} . \quad (5.9)$$

5.2. При розв'язанні **задачі № 2** для дослідження термодинамічних процесів водяної пари слід використовувати методичні рекомендації, що були наведені вище.

5.3. При розв'язанні **задачі № 3** спочатку слід визначити відношення абсолютного тиску газу за соплом (p_2) до відповідного тиску перед соплом (p_1)

$$\beta = \frac{p_2}{p_1} . \quad (5.10)$$

Далі величину β порівнюють з величиною критичного співвідношення тисків

$$\beta_{кр} = \frac{p_{2кр}}{p_1} . \quad (5.11)$$

Величина $\beta_{кр}$ залежить від атомності газу та його стану, відповідні значення критичних співвідношень тисків наведені у табл. 1.5.

Таблиця 1.5

Властивості або стан газів	$\beta_{кр}$
Одноатомні гази	0,487
Двоатомні гази та повітря	0,528
Трьохатомні та багатоатомні гази	0,546
Перегріта пара	0,546
Насичена волога пара	0,577

При обґрунтуванні доцільної форми каналу сопла слід пам'ятати, що:

- для $\beta \geq \beta_{кр}$ слід використовувати конічні та циліндричні сопла;
- для $\beta < \beta_{кр}$ слід використовувати комбіноване сопло (сопло Лавалю), яке дозволяє при цій умові отримати надзвуковий режим витікання газу.

Нижче у табл. 1.6 наведені режими витікання на різних формах каналів сопел в залежності від співвідношення β та $\beta_{кр}$.

Таблиця 1.6

Режими витікання газу через різні форми каналів сопел

Тип сопла	$\beta > \beta_{кр}$	$\beta = \beta_{кр}$	$\beta < \beta_{кр}$
Конічне чи циліндричне	дозвуковий (докритичний)	Звуковий (критичний)	звуковий (критичний)
Комбіноване (сопло Лавалю)	дозвуковий (докритичний)	Звуковий (критичний)	надзвуковий (надкритичний)

Далі слід окремо розглядати процеси витікання ідеальних газів та процеси витікання реальних газів (парів) при визначенні теоретичної швидкості витікання та масової витрати газу.

5.3.1. Для визначення основних характеристик витікання ідеальних газів рекомендується використовувати формули, наведені нижче у табл. 1.7 – 1.9 відповідно до кожного режиму витікання.

Таблиця 1.7

Кінцеві параметри докритичного режиму витікання

Параметр	Формула
Швидкість витікання, м/с	$w = \sqrt{\frac{2k}{k-1} RT_1 \left(1 - \beta^{\frac{k-1}{k}}\right)}$
Масова витрата, кг/с	$M = f_{\text{вих}} \sqrt{\frac{2k}{k-1} \frac{p_1^2}{RT_1} \left(\beta^{\frac{2}{k}} - \beta^{\frac{k+1}{k}}\right)}$
Кінцевий тиск, Па	p_2
Кінцева температура, К	$T_2 = T_1 \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{k-1}{k}}$

$f_{\text{вих}}$ – площа вихідного перерізу сопла, м².

Таблиця 1.8

Кінцеві параметри критичного режиму витікання

Параметр	Формула
Швидкість витікання, м/с	$w_{\text{кр}} = \sqrt{\frac{2k}{k+1} RT_1}$
Масова витрата, кг/с	$M = M_{\text{max}} = f_{\text{вих}} \sqrt{\frac{2k}{k+1} \frac{p_1^2}{RT_1} \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{2}{k-1}}}$
Кінцевий тиск, Па	$P_2 = p_{2\text{кр}} = p_1 \beta_{\text{кр}}$
Кінцева температура, К	$T_2 = T_1 \beta_{\text{кр}}^{\frac{k-1}{k}}$

Таблиця 1.9

Кінцеві параметри надкритичного режиму витікання

Параметр	Формула
Швидкість витікання, м/с	$w = \sqrt{\frac{2k}{k-1} RT_1 \left(1 - \beta^{\frac{k-1}{k}}\right)}$
Масова витрата, кг/с	$M = f_{\text{вих}} \sqrt{\frac{2k}{k-1} \frac{p_1^2}{RT_1} \left(\beta^{\frac{2}{k}} - \beta^{\frac{k+1}{k}}\right)} = f_{\text{мін}} \sqrt{\frac{2k}{k+1} \frac{p_1^2}{RT_1} \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{2}{k-1}}}$
Кінцевий тиск, Па	p_2
Кінцева температура, К	$T_2 = T_1 \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{k-1}{k}}$

$f_{\text{мін}}$ – площа мінімального перерізу сопла Лавалю, м².

Варіанти задач

БАЗОВИЙ ВАРІАНТ № 1

Задача №1. Робоче тіло, що має властивості {1}... , з початковим надлишковим тиском {2}... бар і температурою {3}... °С адіабатно стискується в {4}... рази. Наступними процесами ізотермічного розширення та охолодження при постійному об'ємі газ повертається до початкового стану.

Якісно представити цикл у $p - v$, $T - s$ діаграмах і визначити:

а) основні параметри у кожній характерній точці циклу;
б) для кожного процесу і всього циклу – роботу, теплоту, зміну внутрішньої енергії, ентальпії й ентропії;

в) термічний ККД циклу;

г) середні температури підводу та відводу теплоти за цикл.

Скласти зведені таблиці:

а) основних параметрів у характерних точках циклу;

б) теплоти, роботи і зміни всіх калоричних параметрів у кожному процесі та за цикл.

Шаблон зведених таблиць основних параметрів циклу

Процеси	l , кДж/кг	q , кДж/кг	Δu , кДж/кг	Δi , кДж/кг	Δs , кДж/кг К
1 – 2					
2 – 3					
3 – 1					
За цикл					

№ точки	p , кПа	T , К	v , м ³ /кг
1			
2			
3			

Задача №2. Один кг водяної пари при температурі {5}... °С і надлишковому тиску {6}... бар адіабатно розширюється до ступеня вологості {7}... , після чого ізотермічно розширюється до стану сухої насиченої пари. Визначити основні параметри стану пари на початку та наприкінці кожного процесу, зміну внутрішньої енергії, роботу і кількість теплоти. Зобразити процеси в $i - s$, $p - v$, $T - s$ координатах.

Задача №3. Пара тиском {8}... бар і температурою {9}... °С дроселюється до тиску {10}... бар, після чого вона надходить до сопел парової турбіни, де адіабатно розширюється до тиску 1,2 бар. Обґрунтувати доцільну форму каналу сопла і визначити швидкість витікання, витрату та кінцеву температуру пари. Площа вихідного перерізу сопла {11}...мм². Зобразити процеси в $i - s$ діаграмі.

Примітка. У всіх задачах атмосферний тиск прийняти рівним 1 бар.

ВИХІДНІ ДАНІ ДО БАЗОВОГО ВАРІАНТА № 1

№ поз.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
№ вар.											
101	CO	4,2	92	1,5	290	50	0,10	30	340	15	200
102	O ₂	3,7	17	5,2	300	50	0,11	35	360	10	205
103	N ₂	3,2	72	1,7	320	45	0,12	40	370	9	210
104	He	2,7	37	5,3	280	45	0,05	50	380	8	215
105	Ar	2,1	52	5,0	350	30	0,06	33	330	12	220
106	H ₂	1,6	27	1,9	340	28	0,05	36	370	11	225
107	CO	1,2	32	4,9	330	26	0,04	39	380	30	230
108	CO ₂	0,8	12	1,8	290	20	0,11	45	300	20	235
109	SO ₂	0,4	22	4,7	270	18	0,12	32	400	16	240
110	CH ₄	1,2	82	1,7	250	15	0,03	34	410	18	245
111	NH ₃	4,1	27	2,3	240	14	0,15	36	420	20	250
112	CO	3,6	62	1,9	230	13	0,12	38	430	21	255
113	O ₂	3,1	47	2,2	220	10	0,09	40	450	22	260
114	N ₂	2,6	42	3,1	210	11	0,07	44	280	21	265
115	H ₂	2,0	17	2,9	250	6	0,05	46	300	22	270
116	CO	1,5	22	1,5	240	5	0,06	35	280	18	275
117	He	1,1	27	5,2	230	4	0,08	37	300	19	780
118	Ar	0,7	92	1,8	210	3	0,04	39	320	21	285
119	CO ₂	0,3	17	2,4	190	2,8	0,07	41	340	23	290
120	SO ₂	1,3	72	5,1	180	2,6	0,08	43	360	18	295
121	CH ₄	4,0	37	2,0	170	2,0	0,07	46	380	20	300
122	NH ₃	3,5	52	4,8	160	1,9	0,05	48	400	21	305
123	CO	3,0	27	1,9	190	1,4	0,04	50	420	23	310
124	O ₂	2,5	32	1,6	150	1,0	0,03	40	300	5	315
125	N ₂	1,9	47	5,2	140	0,8	0,02	38	320	7	310
126	H ₂	1,4	57	1,9	130	0,6	0,04	36	340	9	315
127	He	1,0	87	3,2	200	0,5	0,05	34	300	4	330
128	Ar	0,6	17	4,1	210	0,4	0,06	32	410	3	335
129	CO	0,9	22	3,7	300	15	0,02	28	400	5	340
130	SO ₂	1,4	12	3,5	270	13	0,04	26	410	6	345

БАЗОВИЙ ВАРІАНТ № 2

Задача №1. Робоче тіло, що має властивості $\{1\}...$, з початковим надлишковим тиском $\{2\}...$ бар і температурою $\{3\}...$ °С стискується з показником політропи $\{4\}...$ у $\{5\}...$ раз. Після цього відбувається ізобарне розширення газу до початкового об'єму і за рахунок ізохорного охолодження газ повертається до початкового стану.

Якісно представити цикл у $p - v$, $T - s$ діаграмах і визначити:

- а) основні параметри у кожній характерній точці циклу;
- б) для кожного процесу і всього циклу – роботу, теплоту, зміну внутрішньої енергії, ентальпії й ентропії;

в) термічний ККД циклу;

г) середні температури підводу та відводу теплоти за цикл.

Скласти зведені таблиці:

- а) основних параметрів у характерних точках циклу;
- б) теплоти, роботи і зміни всіх калоричних параметрів у кожному процесі та за цикл.

Шаблон зведених таблиць основних параметрів циклу

Процеси	l , кДж/кг	q , кДж/кг	Δu , кДж/кг	Δi , кДж/кг	Δs , $\frac{\text{кДж}}{\text{кг К}}$
1 – 2					
2 – 3					
3 – 1					
За цикл					

№ точки	p , кПа	T , К	v , м ³ /кг
1			
2			
3			

Задача №2. Один кг водяної пари зі ступенем сухості $\{6\}...$ і тиском $\{7\}...$ бар адіабатно стискується до стану сухої насиченої пари, після чого ізотермічно розширюється до початкового тиску. Визначити основні параметри стану пари на початку та наприкінці кожного процесу, зміну внутрішньої енергії, роботу і кількість теплоти. Зобразити процеси в $i - s$, $p - v$, $T - s$ координатах.

Задача №3. У резервуарі, заповненому киснем, підтримується надлишковий тиск $\{8\}...$ бар і температура $\{9\}...$ °С. Газ витікає через звужуюче сопло в середовище з абсолютним тиском 2,5 бар. Визначити швидкість витікання, витрату і кінцеву температуру кисню. Площа вихідного перерізу сопла дорівнює $\{10\}...$ мм². Витікання кисню вважати адіабатним.

Примітка. У всіх задачах атмосферний тиск прийняти рівним 1 бар.

ВИХІДНІ ДАНІ ДО БАЗОВОГО ВАРІАНТА № 2

№ поз.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
№ вар.										
201	SO ₂	0,1	27	1,27	1,3	0,96	0,3	3,5	70	150
202	CO	0,7	32	2,32	2,0	0,95	0,35	4,5	75	170
203	CO ₂	1,4	77	1,35	2,4	0,94	0,4	5,5	80	190
204	N ₂	2,0	97	1,26	2,9	0,93	0,5	6,5	85	210
205	Ar	2,6	22	1,23	3,2	0,93	0,6	7,5	90	230
206	He	3,2	37	1,33	1,5	0,90	1,0	9	95	250
207	SO ₂	3,7	32	1,34	1,9	0,91	1,2	11	100	270
208	NH ₃	4,2	42	1,21	1,1	0,92	1,4	12	105	290
209	O ₂	0,2	17	1,28	2,1	0,93	1,6	13	110	310
210	H ₂	0,8	37	1,30	2,5	0,94	1,8	14	115	330
211	CO	1,5	12	1,33	2,7	0,95	2,0	15	120	350
212	CH ₄	2,1	22	1,25	1,5	0,95	2,2	16	125	370
213	N ₂	2,7	17	1,17	1,2	0,94	2,4	17	130	390
214	SO ₂	3,3	37	1,33	2,8	0,90	2,6	18	135	410
215	Ar	3,8	42	1,32	2,5	0,89	3,0	19	140	430
216	O ₂	4,3	47	1,31	1,7	0,88	4,0	20	145	450
217	H ₂	4,5	37	1,24	1,4	0,87	5,0	21	120	165
218	NH ₃	0,3	22	1,18	2,1	0,86	6,0	22	140	185
219	He	0,9	42	1,19	1,6	0,85	7,0	23	160	205
220	CO	1,6	47	1,21	1,7	0,95	9,0	24	180	225
221	NH ₃	2,2	67	1,34	2,2	0,94	10	25	137	245
222	O ₂	2,8	52	1,30	2,4	0,93	11	26	147	265
223	N ₂	3,4	17	1,23	2,6	0,92	13	27	157	285
224	H ₂	3,9	32	1,17	1,8	0,91	14	28	167	305
225	SO ₂	4,4	37	1,15	1,7	0,90	15	29	179	325
226	CH ₄	4,6	42	1,30	1,3	0,89	16	30	180	345
227	Ar	0,4	87	1,35	1,8	0,88	17	10,5	93	150
228	He	1,0	57	1,29	2,3	0,87	18	11,5	98	180
229	CO	1,7	12	1,22	1,2	0,86	19	13,5	103	210
230	CO ₂	2,3	52	1,14	2,6	0,85	20	11,4	113	240

БАЗОВИЙ ВАРІАНТ № 3

Задача №1 . Робоче тіло, що має властивості {1}... , з початковим абсолютним тиском {2}... бар і температурою {3}... °С ізохорно нагрівається зі зміною тиску в {4}... рази. Потім відбувається ізотермічне розширення газу до початкового тиску, після чого ізобарним процесом газ повертається до початкового стану.

Якісно представити цикл у $p - v$, $T - s$ діаграмах і визначити:

а) основні параметри у кожній характерній точці циклу;
 б) для кожного процесу і всього циклу – роботу, теплоту, зміну внутрішньої енергії, ентальпії й ентропії;

в) термічний ККД циклу;

г) середні температури підводу та відводу теплоти за цикл.

Скласти зведені таблиці:

а) основних параметрів у характерних точках циклу;

б) теплоти, роботи і зміни всіх калоричних параметрів у кожному процесі та за цикл.

Шаблон зведених таблиць основних параметрів циклу

Процеси	l , кДж/кг	q , кДж/кг	Δu , кДж/кг	Δi , кДж/кг	Δs , кДж/ кг К
1 – 2					
2 – 3					
3 – 1					
За цикл					

№ точки	p , кПа	T , К	v , м ³ /кг
1			
2			
3			

Задача №2 . Один кг водяної пари тиском {5}... бар і температурою {6}... °С ізотермічно стискується до ступеня сухості {7}... , після цього продовжується адіабатний стиск до стану сухої насиченої пари. Визначити основні параметри стану пари на початку та наприкінці кожного процесу, зміну внутрішньої енергії, роботу і кількість теплоти. Зобразити процеси в $i - s$, $p - v$, $T - s$ координатах.

Задача №3 . Пар тиском {8}... бар і температурою {9}... °С дроселюється до тиску {10}... бар, після чого вона надходить до сопел парової турбіни, де адіабатно розширюється до тиску 0,05 бар. Обґрунтувати доцільну форму каналу сопла і визначити швидкість витікання, витрату та кінцеву температуру пари. Площа вихідного перерізу сопла {11}... мм². Зобразити процеси в $i - s$ діаграмі.

Примітка. У всіх задачах атмосферний тиск прийняти рівним 1 бар.

ВИХІДНІ ДАНІ ДО БАЗОВОГО ВАРІАНТА № 3

№ поз.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
№ вар.											
301	H ₂	0,6	52	1,7	0,3	100	0,95	30	330	12	160
302	N ₂	1,1	17	1,2	0,4	120	0,96	32	340	14	190
303	O ₂	1,6	22	1,8	0,5	150	0,94	40	350	28	220
304	He	2,2	32	2,1	0,5	200	0,93	42	355	26	250
305	CO ₂	2,7	37	1,6	0,7	110	0,98	45	310	30	280
306	Ar	3,2	42	1,3	0,9	150	0,92	37	320	25	310
307	H ₂	3,6	57	1,7	1,0	130	0,91	52	325	30	340
308	CO	4,0	87	2,1	1,0	180	0,93	54	340	25	370
309	SO ₂	4,4	22	2,3	1,6	160	0,96	48	360	24	400
310	N ₂	4,8	12	1,6	1,8	200	0,89	40	380	13	410
311	O ₂	0,7	52	1,6	2,0	150	0,87	35	390	15	460
312	CO	1,2	47	1,3	2,0	210	0,95	30	410	20	170
313	O ₂	2,7	67	1,9	3,0	170	0,93	28	420	25	180
314	Ar	2,3	22	2,0	3,0	200	0,93	24	425	12	190
315	N ₂	2,8	32	1,5	4,0	160	0,98	22	310	10	200
316	CO	3,3	42	1,4	5,0	180	0,99	20	320	12	210
317	CH ₄	3,7	52	1,8	5,0	190	0,90	18	320	6	220
318	O ₂	4,1	17	2,2	5,0	200	0,96	15	340	8	230
319	NH ₃	4,5	27	1,3	5,5	210	0,97	12	350	9	240
320	SO ₂	4,9	17	1,7	5,5	250	0,95	10	360	5	250
321	O ₂	0,8	27	1,4	6,0	190	0,98	13	370	7	260
322	CO	1,3	37	1,5	8,0	220	0,94	15	350	10	270
323	SO ₂	1,8	32	2,0	9,0	190	0,96	20	340	12	280
324	Ar	2,4	57	1,9	10	200	0,93	22	400	14	290
325	He	2,9	82	1,4	10	220	0,97	24	380	16	300
326	O ₂	3,4	37	1,5	11	210	0,93	26	370	10	310
327	CO	3,8	47	1,9	12	220	0,89	20	360	8	320
328	He	4,2	72	2,3	15	250	0,93	18	350	9	330
329	Ar	4,6	27	1,4	16	300	0,90	32	340	18	340
330	H ₂	5,0	37	1,8	17	240	0,85	34	330	17	350

БАЗОВИЙ ВАРІАНТ № 4

Задача №1. Робоче тіло, що має властивості {1}... , з початковим абсолютним тиском {2}... бар і температурою {3}... °С ізобарно охолоджується до температури {4}... °С. Далі нагріванням газу при постійному об'ємі тиск збільшується в три рази, а наступним політропним розширенням газ повертається до початкового стану.

Якісно представити цикл у $p - v$, $T - s$ діаграмах і визначити:

а) основні параметри у кожній характерній точці циклу;
 б) для кожного процесу і всього циклу – роботу, теплоту, зміну внутрішньої енергії, ентальпії й ентропії;

в) термічний ККД циклу;

г) середні температури підводу та відводу теплоти за цикл.

Скласти зведені таблиці:

а) основних параметрів у характерних точках циклу;

б) теплоти, роботи і зміни всіх калоричних параметрів у кожному процесі та за цикл.

Шаблон зведених таблиць основних параметрів циклу

Процеси	l , кДж/кг	q , кДж/кг	Δu , кДж/кг	Δi , кДж/кг	Δs , кДж/ кг К
1 – 2					
2 – 3					
3 – 1					
За цикл					

№ точки	p , кПа	T , К	v , м ³ /кг
1			
2			
3			

Задача №2. Один кг водяної пари при тиску {5}... бар і температурі {6}... °С адіабатно розширюється до стану сухої насиченої пари, після чого ізохорно підігрівається до температури {7}... °С. Визначити основні параметри стану пари на початку та наприкінці кожного процесу, зміну внутрішньої енергії, роботу і кількість теплоти. Зобразити процеси в $i - s$, $p - v$, $T - s$ координатах.

Задача №3. Пара тиском {8}... бар і температурою {9}... °С дроселюється до тиску {10}... бар, після чого вона надходить до сопел парової турбіни, де адіабатно розширюється до тиску 0,04 бар. Обґрунтувати доцільну форму каналу сопла і визначити швидкість витікання, витрату та кінцеву температуру пари. Площа мінімального перерізу сопла Лаваля {11}... мм². Зобразити процеси в $i - s$ діаграмі.

Примітка. У всіх задачах атмосферний тиск прийняти рівним 1 бар.

ВИХІДНІ ДАНІ ДО БАЗОВОГО ВАРІАНТА № 4

№ поз.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
№ вар.											
401	NH ₃	2,8	127	12	80	320	380	20	250	15	150
402	CH ₄	3,6	152	17	75	350	390	25	260	15	160
403	SO ₂	4,6	317	97	70	300	370	30	270	25	170
404	CO ₂	0,8	187	27	50	300	400	35	280	25	180
405	H ₂	1,4	352	87	50	320	450	15	290	10	200
406	CO	2,8	262	82	50	350	500	20	300	15	210
407	Ar	3,6	357	32	45	270	350	25	310	20	220
408	He	4,4	297	77	45	300	430	30	320	25	230
409	N ₂	4,4	322	17	40	280	340	35	330	30	240
410	O ₂	1,8	282	12	40	300	420	40	340	35	250
411	CO	3,0	417	22	40	400	300	20	250	15	260
412	O ₂	4,2	517	37	35	280	350	15	260	10	270
413	He	4,6	812	87	35	300	450	20	270	15	280
414	Ar	0,6	152	22	35	400	300	25	280	20	290
415	SO ₂	1,4	227	47	30	250	320	30	290	25	300
416	CH ₄	1,8	317	37	30	300	350	35	300	30	310
417	NH ₃	5,0	252	22	30	400	250	40	310	35	320
418	H ₂	1,2	372	42	28	310	340	60	320	50	330
419	CO	2,4	477	37	27	320	370	15	330	10	340
420	O ₂	3,4	337	67	25	270	300	20	340	15	350
421	N ₂	4,4	252	52	25	300	330	25	350	20	360
422	Ar	4,8	197	17	22	250	270	30	360	25	370
423	He	1,2	242	22	20	230	280	35	370	30	380
424	SO ₂	1,6	342	32	20	250	300	40	380	35	390
425	CH ₄	3,2	387	37	20	300	250	15	210	10	400
426	CO	4,0	412	42	19	250	270	20	220	15	410
427	H ₂	4,8	512	57	17	260	300	25	230	20	420
428	CO ₂	1,4	637	52	16	230	240	30	310	20	430
429	N ₂	2,6	337	87	15	250	350	35	320	25	440
430	CO	3,6	262	22	13	240	330	40	340	35	450

БАЗОВИЙ ВАРІАНТ № 5

Задача №1. Робоче тіло, що має властивості {1}... , з початковим надлишковим тиском {2}... МПа і температурою {3}... °С ізобарно нагрівається до температури {4}... °С. Далі при політропному розширенні з показником політропи {5}... температура газу знижується до початкової, після чого ізотермічним стиском газ повертається до початкового стану.

Якісно представити цикл у $p - v$, $T - s$ діаграмах і визначити:

а) основні параметри у кожній характерній точці циклу;
 б) для кожного процесу і всього циклу – роботу, теплоту, зміну внутрішньої енергії, ентальпії й ентропії;

в) термічний ККД циклу;

г) середні температури підводу та відводу теплоти за цикл.

Скласти зведені таблиці:

а) основних параметрів у характерних точках циклу;

б) теплоти, роботи і зміни всіх калоричних параметрів у кожному процесі та за цикл.

Шаблон зведених таблиць основних параметрів циклу

Процеси	l , кДж/кг	q , кДж/кг	Δu , кДж/кг	Δi , кДж/кг	Δs , $\frac{\text{кДж}}{\text{кг К}}$
1 – 2					
2 – 3					
3 – 1					
За цикл					

№ точки	p , кПа	T , К	v , м ³ /кг
1			
2			
3			

Задача №2. Один кг водяної пари зі ступенем вологості {6}... і тиском {7}... бар ізобарно підігрівається до стану сухої насиченої пари, після чого ізотермічно розширюється до тиску {8}... бар. Визначити основні параметри стану пари на початку та наприкінці кожного процесу, зміну внутрішньої енергії, роботу і кількість теплоти. Зобразити процеси в $i - s$, $p - v$, $T - s$ координатах.

Задача №3. Повітря з резервуару постійним тиском {9}... бар і температурою {10}... °С витікає в атмосферу через запобіжний клапан (циліндричне сопло) перерізом {11}... мм². Визначити швидкість витікання, витрату і кінцеву температуру повітря. Зовнішній тиск прийняти рівним 1 бар. Процес розширення повітря вважати адіабатним. Повітря вважати двоатомним газом ($\mu=29$ кг/кмоль).

Примітка. У всіх задачах атмосферний тиск прийняти рівним 1 бар.

ВИХІДНІ ДАНІ ДО БАЗОВОГО ВАРІАНТА № 5

№ поз.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
№ вар.											
501	CO	0,1	12	152	1,10	0,03	0,3	0,1	2	40	150
502	SO ₂	0,2	97	317	1,40	0,04	0,4	0,1	4	60	155
503	H ₂	0,3	17	187	1,12	0,05	0,5	0,1	6	80	160
504	CO ₂	0,4	92	352	1,31	0,06	1,1	0,2	8	100	165
505	Ar	0,5	22	262	1,15	0,07	1,3	0,2	10	120	170
506	CH ₄	0,6	87	357	1,32	0,08	2,0	0,3	12	140	175
507	O ₂	0,7	27	297	1,21	0,09	2,5	0,4	16	160	180
508	He	0,8	82	322	1,14	0,10	2,9	0,4	18	130	185
509	CO	0,9	32	282	1,15	0,11	3,0	0,5	20	150	190
510	NH ₃	1,1	77	417	1,16	0,12	3,5	0,5	22	170	195
511	CO ₂	1,2	37	517	1,11	0,13	4,0	0,8	24	140	200
512	N ₂	1,5	72	482	1,17	0,14	5,0	0,8	26	165	205
513	CO	1,6	42	152	1,18	0,15	6,0	1,0	28	170	210
514	O ₂	1,8	67	227	1,19	0,16	8,0	1,2	30	175	220
515	Ar	2,0	47	317	1,20	0,17	7,0	1,6	3	45	230
516	SO ₂	2,2	62	252	1,21	0,18	9,0	1,1	5	50	240
517	H ₂	2,4	52	372	1,13	0,19	10	1,5	7	55	250
518	CO	2,6	77	477	1,22	0,20	11	1,6	9	60	260
519	N ₂	2,5	57	337	1,23	0,20	12	2,0	11	70	270
520	CO ₂	2,3	72	252	1,24	0,12	13	2,0	13	75	280
521	H ₂	2,1	17	197	1,25	0,13	15	2,2	15	80	290
522	SO ₂	1,5	92	242	1,26	0,14	16	3,5	17	85	300
523	N ₂	1,7	22	342	1,14	0,15	17	4,0	19	90	305
524	He	1,9	87	387	1,27	0,16	18	3,2	21	95	310
525	NH ₃	2,1	52	412	1,28	0,17	20	4,5	23	100	315
526	N ₂	2,3	77	327	1,29	0,18	22	4,5	25	105	320
527	O ₂	2,5	57	337	1,30	0,19	26	5,0	27	110	325
528	CO	2,6	72	262	1,31	0,20	28	5,5	29	80	330
529	H ₂	2,4	52	272	1,12	0,03	30	5,0	5	90	335
530	O ₂	2,2	62	317	1,32	0,04	35	4,0	10	100	340

ІНДИВІДУАЛЬНЕ ЗАВДАННЯ № 2 ТЕПЛООБМІННІ АПАРАТИ

Задача №1

Визначити коефіцієнт теплопередачі та площу поверхні нагрівання теплообмінника типу "труба в трубі", що працює за прямоточною та протиточною схемами, якщо вода, що нагріває, надходить із температурою t'_1 і витратою $G_1 = G_A$ по кільцевому каналу між трубами діаметром d_3 та d_2 . А вода, що нагрівається від температури t'_2 до температури t''_2 , рухається по центральній трубі з внутрішнім діаметром d_1 і має витрату $G_2 = G_B$. Величину коефіцієнта, що враховує втрати теплоти крізь зовнішню поверхню теплообмінника, прийняти рівною $\eta=0,95$. За результатами розрахунків побудувати графіки зміни температури теплоносіїв за довжиною теплообмінника для прямоточної та протиточної схем, а також подати схеми відповідних теплообмінних апаратів.

Вихідні дані наведені у табл. 2.3.

Задача №2

Визначити коефіцієнт теплопередачі та площу поверхні нагрівання теплообмінника типу "труба в трубі", що працює за прямоточною та протиточною схемами, якщо вода, що нагрівається від температури t'_2 до температури t''_2 , рухається по кільцевому каналу між трубами діаметром d_3 та d_2 з витратою $G_2 = G_A$. А вода, що нагріває, надходить із температурою t'_1 і витратою $G_1 = G_B$ по центральній трубі з внутрішнім діаметром d_1 . Величину коефіцієнта, що враховує втрати теплоти крізь зовнішню поверхню теплообмінника, прийняти рівною $\eta=0,91$. За результатами розрахунків побудувати графіки зміни температури теплоносіїв за довжиною теплообмінника для прямоточної та протиточної схем, а також подати схеми відповідних теплообмінних апаратів.

Вихідні дані наведені у табл. 2.3.

Примітка. При оформленні індивідуального завдання необхідно на початку навести вихідні дані свого варіанта у формі табл. 2.3.

Методичні рекомендації

При вирішенні поставленого завдання слід дотримуватися послідовності, що подана нижче [2].

1. Знайти температуру води, що нагріває, на виході із апарату (t''_1) за допомогою рівняння теплового балансу, яке визначає кількість теплоти, що передається Q , Вт

$$\eta G_1 c_{p1} (t'_1 - t''_1) = G_2 c_{p2} (t''_2 - t'_2) = Q, \quad (2.1)$$

де c_{p1} та c_{p2} – це масові ізобарні теплоємності, відповідно, для води, що нагріває (індекс "1") та для води, що нагрівається (індекс "2"), $\frac{\text{Дж}}{\text{кг К}}$.

Слід звернути увагу на те, що коефіцієнт η множиться до того боку рівняння (2.1), у якому знаходяться параметри теплоносія, що межує з навколишнім середовищем. У даному випадку в рівнянні (2.1) наведено приклад, де в кільцевому каналі тече вода, що нагріває.

На цьому першому кроці можна прийняти $c_{p1} \approx c_{p2} = 4190 \frac{\text{Дж}}{\text{кг К}}$. Але в подальших розрахунках слід визначити теплоємності та інші параметри для кожного теплоносія залежно від його середньої температури (табл. 2.2).

2. Визначити середні температури теплоносіїв для води, що нагріває, за формулою

$$t_1 = \frac{t'_1 + t''_1}{2};$$

та для води, що нагрівається, за формулою

$$t_2 = \frac{t'_2 + t''_2}{2}.$$

Відповідно цим температурам із табл. 2.2 виписуються фізичні властивості для кожного теплоносія: c_p , λ (коефіцієнт теплопровідності), ρ (густина), μ (динамічна в'язкість).

Коефіцієнти Прандтля для кожного теплоносія слід обов'язково розрахувати за формулою

$$\text{Pr} = \frac{\mu c_p}{\lambda}. \quad (2.2)$$

Примітка. Відтепер і надалі у всіх формулах слід самостійно розставляти індекси "1" та "2" відповідно того, параметри якого теплоносія розглядаються – того, що нагріває чи того, що нагрівається.

3. Визначити середні швидкості руху теплоносіїв – для води, що тече по центральній трубі

$$w = \frac{4G}{\rho \pi d_1^2}, \text{ м/с};$$

– для води, що тече по кільцевому каналу

$$w = \frac{4G}{\rho \pi (d_3^2 - d_2^2)}, \text{ м/с}.$$

4. Визначити критерії Рейнольдса для кожного теплоносія

– для води, що тече по центральній трубі

$$Re = \frac{\rho w d_1}{\mu};$$

– для води, що тече по кільцевому каналу

$$Re = \frac{\rho w d_{ек}}{\mu},$$

де $d_{ек} = d_3 - d_2$ – еквівалентний діаметр кільцевого каналу, м.

5. Визначити коефіцієнти тепловіддачі для кожного теплоносія
– для води, що тече по центральній трубі

$$\alpha = \frac{Nu \lambda}{d_1}, \frac{Вт}{м^2 К};$$

– для води, що тече по кільцевому каналу

$$\alpha = \frac{Nu \lambda}{d_{ек}}, \frac{Вт}{м^2 К}.$$

Критерії Нусельта (Nu) для кожного теплоносія визначають за критеріальним рівнянням, що відповідає умовам поставлених завдань

$$Nu = 0,021 Re^{0,8} Pr^{0,43} \left(\frac{Pr}{Pr_{ст}} \right)^{0,25} \varepsilon_1.$$

Коефіцієнт $\varepsilon_1 = 1$ при $\frac{l}{d} > 50$, де l – довжина труби, м. Ці значення відповідають умовам поставлених завдань.

$Pr_{ст}$ – визначається за формулою (2.2), де параметри для цієї формули беруть із табл. 2.2 за середньою температурою стінки труби. Ця температура розраховується за формулою

$$t_{ст} = \frac{t_1 + t_2}{2}.$$

6. Коефіцієнт теплопередачі для теплообмінного апарату визначають за формулою

$$k = \frac{1}{\frac{1}{d_1 \alpha_m} + \frac{1}{2 \lambda_{ст}} \ln \frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{d_2 \alpha_j}}, \frac{Вт}{м К},$$

де $m \neq j$, $m = 1, 2$, $j = 1, 2$ і значення цих індексів приймаються в залежності від місця знаходження теплоносія, що нагріває та теплоносія, що

нагрівається; $\lambda_{ст}$ – коефіцієнт теплопровідності матеріалу стінки труби, береться із табл. 2.1.

7. Визначити середній логарифмічний напір теплообмінного апарату

– для прямої схеми

$$\Delta t_{cp} = \frac{(t'_1 - t'_2) - (t''_1 - t''_2)}{\ln \frac{t'_1 - t'_2}{t''_1 - t''_2}}, \text{ } ^\circ\text{C};$$

– для схеми протитоку

$$\Delta t_{cp} = \frac{(t'_1 - t''_2) - (t''_1 - t'_2)}{\ln \frac{t'_1 - t''_2}{t''_1 - t'_2}}, \text{ } ^\circ\text{C}.$$

8. Лінійна густина теплового потоку визначається

$$q_l = \pi k \Delta t_{cp}, \text{ Вт/м.}$$

9. Площа поверхні нагрівання теплообмінного апарату

$$F = \pi d_1 l, \text{ м}^2,$$

де довжина труби теплообмінника визначається за формулою

$$l = \frac{Q}{q_l}, \text{ м.}$$

Таблиця 2.1

Фізичні властивості деяких матеріалів

Матеріал	ρ , кг/м ³	λ , Вт/(м К)
Сталь 20	7830	51
Сталь 45	7830	47,8
Алюміній	2700	204
Мідь	8930	390
Латунь	8500	120
Цинк	7150	113
Чавун	7220	63

Таблиця 2.2

Фізичні параметри води

t , °C	c_p , кДж/(кг К)	λ , Вт/(м К)	ρ , кг/м ³	μ , Па с	Pr
0	4,212	0,551	999,87	178,8 10^{-5}	13,67
10	4,191	0,575	999,73	130,5 10^{-5}	9,52
20	4,183	0,599	998,23	100,4 10^{-5}	7,02
30	4,174	0,618	995,67	80,1 10^{-5}	5,42
40	4,174	0,634	992,24	65,3 10^{-5}	4,31
50	4,174	0,648	988,07	54,9 10^{-5}	3,54
60	4,178	0,659	984,24	47,0 10^{-5}	2,98
70	4,187	0,668	977,81	40,60 10^{-5}	2,55
80	4,195	0,675	971,83	35,5 10^{-5}	2,21
90	4,208	0,680	965,34	31,5 10^{-5}	1,95
100	4,220	0,683	958,38	28,2 10^{-5}	1,75
110	4,233	0,685	951	25,9 10^{-5}	1,60
120	4,250	0,686	945,4	23,7 10^{-5}	1,47
130	4,266	0,686	934,8	21,8 10^{-5}	1,36
140	4,287	0,685	926,1	20,1 10^{-5}	1,26
150	4,312	0,684	916,9	18,6 10^{-5}	1,17
160	4,346	0,683	907,4	17,4 10^{-5}	1,10
170	4,379	0,679	897,3	16,3 10^{-5}	1,05
180	4,417	0,675	886,9	15,3 10^{-5}	1,00
190	4,459	0,670	876	14,4 10^{-5}	0,96
200	4,505	0,663	863	13,6 10^{-5}	0,93
220	4,614	0,645	848	12,5 10^{-5}	0,89
240	4,756	0,628	839	11,5 10^{-5}	0,87

Таблиця 2.3

Вихідні дані до індивідуального завдання № 2

№ варіанта	Матеріал стінки труби	d_1 / d_2 , мм	d_3 , мм	G_A , кг/с	G_B , кг/с	t'_1 , °C	t'_2 , °C	t''_2 , °C	№ задачі
01	Сталь 20	34 / 40	50	0,55	0,6	105	15	55	1
02	Сталь 45	35 / 41	54	0,71	0,83	110	5	48	1
03	Алюміній	51 / 57	70	0,65	0,85	115	12	50	1
04	Мідь	47 / 54	68	1,12	0,45	120	13	45	2
05	Латунь	47 / 53	66	0,91	1,61	130	8	47	1
06	Цинк	37 / 43	58	0,81	0,51	125	10	52	2
07	Сталь 20	35 / 42	57	0,95	1,35	118	12	51	1
08	Чавун	49 / 55	71	1,11	1,8	135	18	58	1
09	Латунь	34 / 40	56	1,31	1,95	140	15	60	1
10	Сталь 45	51 / 57	74	1,21	1,9	145	20	93	2
11	Цинк	34 / 40	50	0,65	1,4	135	21	53	1
12	Сталь 20	35 / 41	54	0,61	0,93	128	12	80	2
13	Чавун	51 / 57	70	0,75	0,95	125	18	63	1
14	Латунь	47 / 54	68	1,2	1,31	130	35	77	1
15	Сталь 45	47 / 53	66	0,84	1	145	10	79	2
16	Сталь 20	37 / 43	58	0,61	1,26	115	25	51	1
17	Сталь 45	35 / 42	57	0,75	1,2	120	15	50	1
18	Алюміній	49 / 55	71	0,9	1,82	115	22	84	2
19	Мідь	34 / 40	56	1,1	0,7	135	24	65	2
20	Латунь	51 / 57	74	1,1	2	110	18	48	1
21	Чавун	35 / 42	57	0,91	1,75	115	12	78	2
22	Латунь	49 / 55	71	1,18	2,21	138	24	63	2
23	Сталь 45	34 / 40	56	1,11	0,78	129	10	59	2
24	Сталь 20	51 / 57	74	1,05	2,03	115	23	51	1
25	Сталь 45	34 / 40	50	0,72	0,99	128	39	88	2
26	Алюміній	35 / 41	54	0,55	0,89	109	19	52	1
27	Мідь	51 / 57	70	0,66	0,87	124	3	72	2
28	Латунь	47 / 54	68	1	0,9	121	12	60	2
29	Цинк	47 / 53	66	0,79	1,09	120	13	53	1
30	Сталь 20	37 / 43	58	0,82	1	140	25	87	2

Таблица 2.4

Насичена водяна пара за тиском

p, бар	t _н , °C	v'', м ³ /кг	i', кДж/кг	i'', кДж/кг	s', кДж/(кг К)	s'', кДж/(кг К)
0,010	6,92	129,9	29,32	2513	0,1054	8,975
0,015	13,038	87,90	54,75	2525	0,1958	8,827
0,020	17,514	66,97	73,52	2533	0,2609	8,722
0,025	21,094	54,24	88,50	2539	0,3124	8,642
0,030	24,097	45,66	101,04	2545	0,3546	8,576
0,035	26,692	39,48	111,86	2550	0,3908	8,521
0,040	28,979	34,81	121,42	2554	0,4225	8,473
0,045	31,033	31,13	130,00	2557	0,4507	8,431
0,050	32,88	28,19	137,83	2561	0,4761	8,393
0,060	36,18	23,74	151,50	2567	0,5207	8,328
0,070	39,03	20,53	163,43	2572	0,5591	8,274
0,080	41,54	18,10	173,9	2576	0,5927	8,227
0,090	43,79	16,20	183,3	2580	0,6225	8,186
0,10	45,84	14,68	191,9	2584	0,6492	8,149
0,11	47,72	13,40	199,7	2588	0,6740	8,116
0,12	49,45	12,35	207,0	2591	0,6966	8,085
0,13	51,07	11,46	213,8	2594	0,7174	8,057
0,14	52,58	10,69	220,1	2596	0,7368	8,031
0,15	54,00	10,02	226,1	2599	0,7550	8,007
0,20	60,08	7,647	251,4	2609	0,8321	7,907
0,25	64,99	6,202	272,0	2618	0,8934	7,830
0,30	69,12	5,226	289,3	2625	0,9441	7,769
0,40	75,88	3,994	317,7	2636	1,0261	7,670
0,50	81,35	3,239	340,6	2645	1,0910	7,593
0,60	85,95	2,732	360,0	2653	1,1453	7,531
0,70	89,97	2,364	376,8	2660	1,1918	7,479
0,80	93,52	2,087	391,8	2665	1,2330	7,434
0,90	96,72	1,869	405,3	2670	1,2696	7,394
1,00	99,64	1,694	417,4	2675	1,3026	7,360
1,1	102,32	1,550	428,9	2679	1,3327	7,328
1,2	104,81	1,429	439,4	2683	1,3606	7,298
1,3	107,14	1,325	449,2	2687	1,3866	7,271
1,4	109,33	1,236	458,5	2690	1,4109	7,246
1,5	111,38	1,159	467,2	2693	1,4336	7,223
1,6	113,32	1,091	475,4	2696	1,4550	7,202
1,7	115,17	1,031	483,2	2699	1,4752	7,182
1,8	116,94	0,9773	490,7	2702	1,4943	7,163
1,9	118,62	0,9290	497,9	2704	1,5126	7,145
2,0	120,23	0,8854	504,8	2707	1,5302	7,127
2,1	121,78	0,8459	511,4	2709	1,5470	7,111
2,2	123,27	0,8098	517,8	2711	1,5630	7,096
2,3	124,71	0,7768	524,0	2713	1,5783	7,081

СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Буляндра О. Ф. Технічна термодинаміка / О. Ф. Буляндра. – Київ: Техніка, 2006. – 319 с.
2. Бабич О.С. Технічна термодинаміка / О. С. Бабич, М. М. Беляєв. – Дніпропетровськ, 1995. – 264 с.
3. Бордюженко О. М. Основи термодинаміки, теплотехніка та теплотехнічне обладнання / О. М. Бордюженко, В. Л. Шестаков. – Рівне: НУВГП, 2008. – 224 с.
4. Драганов Б. Х. Теплотехніка / Б. Х. Драганов, А. А. Долінський, А. В. Міщенко, Є. М. Письменний. – Київ: Інкос, 2005. – 503 с.
5. Бакка М. Т. Технічна термодинаміка в прикладах і задачах / М. Т. Бакка, В. С. Редчиць, І. С. Редчиць. – Житомир: ЖІПІ, 2001. – 175 с.

ПИТАННЯ ДО СКЛАДАННЯ ЕКЗАМЕНУ (ЗАЛІКУ)

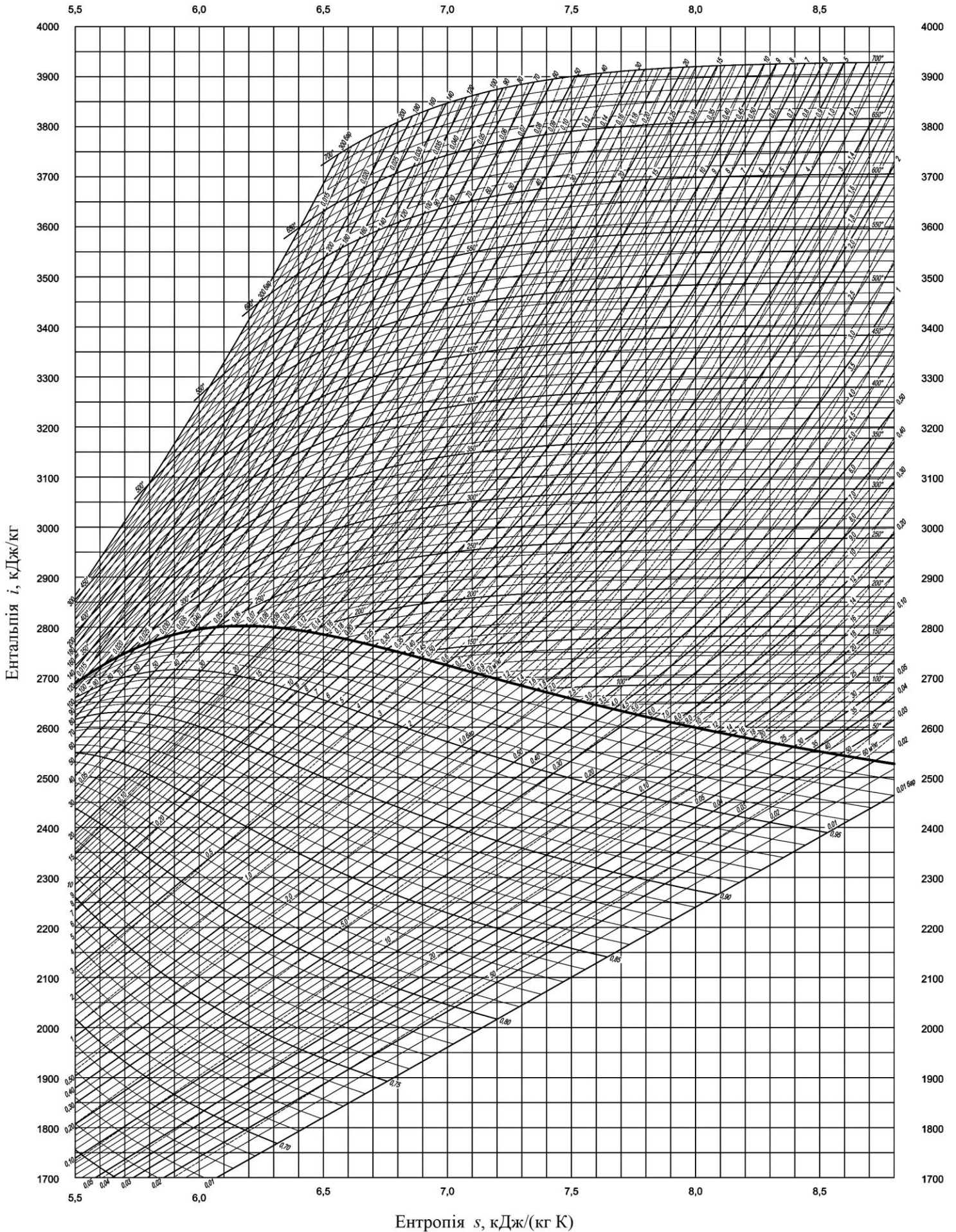
1. Технічна термодинаміка. Основні поняття та означення.
2. Поняття термодинамічної системи, класифікація термодинамічних систем.
3. Основні термодинамічні параметри стану робочого тіла.
4. Рівняння стану ідеальних газів.
5. Робота, як спосіб передачі енергії, вивести формулу.
6. Теплота, як спосіб передачі енергії, основні способи визначення теплоти.
7. Поняття теплоємності газів, класифікація в залежності від одиниці вимірювання кількості речовини. Перерахування одних теплоємностей в інші.
8. Теплоємності ідеальних газів, рівняння Майєра.
9. Теплоємності реальних газів, істинна теплоємність. Середня теплоємність, вивести вираз для лінійної залежності від температури.
10. Суміші ідеальних газів, парціальний тиск, парціальний об'єм.
11. Закон Дальтона. Закон Амага.
12. Масові, об'ємні та мольні частки компонентів газових сумішей, зв'язок між ними.
13. Середня молекулярна маса та газова стала газової суміші.
14. Рівняння стану для суміші ідеальних газів. Навести вирази для складових рівняння.
15. Теплоємності газових сумішей (масові, об'ємні, мольні).
16. Вивести перший закон термодинаміки.
17. Калоричні параметри стану, вивести вираз для зміни внутрішньої енергії ідеальних газів.
18. Калоричні параметри стану, вивести вираз для зміни ентальпії ідеальних газів.
19. Калоричні параметри стану, вивести вираз для зміни ентропії ідеальних газів.
20. Проаналізувати ізохорний термодинамічний процес.
21. Проаналізувати ізобарний термодинамічний процес.
22. Проаналізувати ізотермічний термодинамічний процес.

23. Проаналізувати адіабатний термодинамічний процес.
24. Проаналізувати політропний термодинамічний процес.
25. Поняття термодинамічного циклу. Основна класифікація циклів. Розкрити причини необоротності у термодинамічних процесах.
26. Прямі цикли, основні поняття та визначення, критерій ефективності.
27. Зворотні цикли, основні поняття та визначення, критерій ефективності.
28. Основні умови неперервного перетворення теплоти у роботу. Поняття вічного двигуна другого роду.
29. Сутність другого закону термодинаміки, основні визначення.
30. Вивести інтеграл Клаузіуса для оборотних кругових процесів.
31. Вивести інтеграл Клаузіуса для необоротних кругових процесів.
32. Навести та пояснити математичний вираз другого закону термодинаміки для розімкнених процесів.
33. Ексергія. Вивести вираз Gu – Стодоли.
34. Прямий цикл Карно, основні залежності та властивості.
35. Зворотний цикл Карно, основні залежності та властивості.
36. Еквівалентний цикл Карно, основні залежності та властивості.
37. Регенеративний цикл Карно, основні залежності та властивості.
38. Особливості термодинаміки реальних газів, рівняння стану реальних газів.
39. Основні властивості киплячої води. Основні типи парів.
40. $p - v$ та $T - s$ діаграма водяної пари, основні поняття, області та лінії.
41. Ізохорний паровий термодинамічний процес, основні залежності та діаграми ($p - v$, $T - s$, $i - s$).
42. Ізобарний паровий термодинамічний процес, основні залежності та діаграми ($p - v$, $T - s$, $i - s$).
43. Ізотермічний паровий термодинамічний процес, основні залежності та діаграми ($p - v$, $T - s$, $i - s$).
44. Адіабатний паровий термодинамічний процес, основні залежності та діаграми ($p - v$, $T - s$, $i - s$).
45. Вивести перший закон термодинаміки для потоку газу.
46. Розпоряджувана робота та робота проштовхування потоку газу, основні визначення та залежності.
47. Основні режими витікання газу та основні форми каналів сопел, що відповідають цим режимам.
48. Вивести формули швидкості витікання та масової витрати ідеального газу через конічне сопло.
49. Дроселювання газів та парів, основні поняття та діаграми.
50. Основні складові котельної установки, схема.
51. Схеми та принцип дії жаротрубних та димогарних котлів.
52. Схема та принцип дії горизонтального водотрубного котла.
53. Схема та принцип дії одnobарабанного водотрубного котла.
54. Поняття котлів з природною та примусовою циркуляцією, прямоточні котли.

- 55.Топки, загальна класифікація.
- 56.Цикл Отто у P-V та T-S діаграмах. Особливості та основні характеристики циклу, галузь застосування.
- 57.Цикл Дизеля у P-V та T-S діаграмах. Особливості та основні характеристики циклу, галузь застосування.
- 58.Цикл Трінклера у P-V та T-S діаграмах. Особливості та основні характеристики циклу, галузь застосування.
- 59.Тепловий баланс котельного агрегату, ККД котла.
- 60.Теплові втрати котла, витрати палива.
- 61.Цикл Ренкіна у P-V та T-S діаграмах, схема установки, що працює за циклом Ренкіна .
- 62.Цикл паротурбінної установки з проміжним перегріванням пари в P-V та T-S діаграмах, схема установки, що працює за цим циклом.
- 63.Шляхи підвищення ефективності роботи паросилових установок, термічний ККД для основних варіантів конструкцій паросилових установок.
- 64.Теплофікаційний цикл Ренкіна у T-S діаграмі, схема установки, та його особливості, коефіцієнт використання теплоти.
- 65.Вологе повітря, основні параметри вологого повітря.
- 66.i – d діаграма вологого повітря, основні процеси вологого повітря на i – d діаграмі.
- 67.Теплопровідність, рівняння Фур'є в загальному диференційному вигляді.
- 68.Коефіцієнт теплопровідності, що характеризує, як і від чого залежить.
- 69.Регенераційний цикл Ренкіна у T-S діаграмі, схема установки, та його особливості.
- 70.Вивести рівняння теплопровідності крізь плоску одношарову та багатошарову стінки.
- 71.Вивести рівняння теплопровідності крізь циліндричну одношарову та багатошарову стінки.
- 72.Поняття конвективного теплообміну, види конвекції, тепловіддача.
- 73.Закон Н'ютона-Ріхмана, коефіцієнт тепловіддачі, від яких величин залежить.
- 74.Вивести рівняння теплопередачі крізь плоску .одношарову та багатошарову стінки.
- 75.Вивести рівняння теплопередачі крізь циліндричну .одношарову та багатошарову стінки.
- 76.Поняття та математичне вираження коефіцієнта теплопередачі для плоскої стінки, повний термічний опір теплопередачі.
- 77.Поняття та математичне вираження лінійного коефіцієнта теплопередачі для циліндричної стінки, повний лінійний термічний опір теплопередачі.
- 78.Теорія подібності, застосування в тепломасообміні. Основні види подібності.
- 79.Теореми про подібність.
- 80.Поняття критерія подібності. Основні критерії подібності, що використовуються в конвекційному теплообміні.

- 81.Поняття критерія Нусельта, його застосування.
- 82.Поняття критеріального рівняння, область застосування.
- 83.Поняття визначального геометричного розміру, визначальної температури, еквівалентного діаметра прохідного перерізу каналу.
- 84.Променистий теплообмін, основні поняття. Особливості випромінювання газів.
- 85.Поняття потоків монохроматичного та інтегрального випромінювання. Густина інтегрального випромінювання, спектральна інтенсивність випромінювання.
- 86.Рівняння енергетичного балансу променистої енергії, яка падає на тіло. Коефіцієнти поглинання, відзеркалювання, пропускання.
- 87.Випромінювання тіла у необмежений простір, який має визначену температуру.
- 88.Теплообмін випромінюванням для двох пласких паралельних поверхонь із розташованими між ними екранами.
- 89.Поняття абсолютно чорного тіла. Ефективне та результуюче випромінювання.
- 90.Закон Планка.
- 91.Закон Стефана-Больцмана. Поняття сірого тіла.
- 92.Закон Кіргофа. Поняття ступеня чорноти тіла.
- 93.Закон Ламберта. Поняття кутової густини випромінювання та яскравості випромінювання.
- 94.Випромінювання між двома пластинами (сірими тілами), розділених прозорим середовищем.
- 95.Випромінювання між двома тілами, одне із яких знаходиться в порожнині другого.
- 96.Складний теплообмін.
- 97.Теплообмінні апарати, загальна класифікація.
- 98.Регенеративні теплообмінні апарати, схема.
- 99.Рекуперативні теплообмінні апарати, схема.
100. Класифікація рекуперативних теплообмінних апаратів.
101. Основні види теплового розрахунку теплообмінних апаратів, основні розрахункові рівняння.
102. Контактні теплообмінні апарати, схема.
103. Поняття “водяного еквіваленту” та середнього температурного напору.
104. Порівняльний аналіз прямої та протитечійної схем рекуперативних теплообмінних апаратів.
105. Визначення середньологарифмічного температурного напору для прямої схеми теплообмінника “труба в трубі”.
106. Визначення середньологарифмічного температурного напору для протитечійної схеми теплообмінника “труба в трубі”.
107. Визначення середнього температурного напору теплообмінного апарату для більш складних схем руху теплоносіїв.

i, s діаграма водяної пари



Олішевський Геннадій Сергійович

**Методичні рекомендації
до виконання індивідуальних завдань**
з дисципліни «Технічна термодинаміка та тепломасообмін»
для студентів спеціальності
141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

Видано в редакції автора

НТУ «Дніпровська політехніка»
49005, м. Дніпро, просп.. Д. Яворницького, 19.