

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ ВИЩИЙ НАВЧАЛЬНИЙ ЗАКЛАД
«ДОНЕЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ»
Кафедра електричної інженерії

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ
для виконання індивідуальної та самостійної роботи
з дисципліни

«ТЕПЛОТЕХНІЧНІ ПРОЦЕСИ ТА УСТАНОВКИ»

та

«ТЕПЛОТЕХНІЧНІ ПРОЦЕСИ В ТЕХНІЧНИХ СИСТЕМАХ»

для студентів денної та заочної форм навчання
технічних спеціальностей

Покровськ-2020

УДК 621.18
М 54

Методичні вказівки для виконання індивідуальної та самостійної роботи з дисципліни **Теплотехнічні процеси та установки та Теплотехнічні процеси в технічних системах** для студентів денної та заочної форм навчання технічних спеціальностей / уклад. О.М. Любименко . – Покровськ : ДонНТУ, 2020 . – 78 с.

У Методичних вказівках надано рекомендації до самостійної роботи студентів при вивченні дисципліни «Теплотехнічні процеси та установки» та «Теплотехнічні процеси в технічних системах», а також до виконання індивідуальних домашніх завдань; перелік рекомендованої літератури; вимоги до оформлення та захисту домашніх завдань; вихідні дані.

Наведені приклади розв'язування основних типів задач і завдань, які розраховуються при виконанні практичної роботи. Наведені довідкові дані.

Методичні вказівки можуть бути використані студентами денної та заочної форми навчання інженерних спеціальностей напряму теплоенергетика.

Укладачі : Любименко О.М., доц., к.ф.-м.н., доц. кафедри електричної інженерії

Рецензент: Штепа О.А. доц., к.т.н., доц. кафедри електронної техніки

Відповідальний за випуск
завідувач кафедри

Колларов О.Ю., доц., к.т.н., доц.
кафедри електричної інженерії

Затверджено навчально-методичним відділом ДонНТУ,
протокол № 9 від 24.03.2020 року

Розглянуто на засіданні кафедри електричної інженерії,
протокол № 11 від 03.03.2020 року

© Донецький національний
технічний університет, 2020

ЗМІСТ

вступ.....	4
1. Вимоги до виконання, оформлення, та оцінювання індивідуальних завдань	6
2. Розрахунково - графічне завдання 1	9
2.1 Розрахунок термодинамічних процесів суміші ідеальних газів	9
2.2 Розрахунок циклів паросилових установок.....	12
2.3 Розрахунок циклів холодильних установок	16
2.4 Розрахунок циклів газових установок.....	17
3. Розрахунково- графічне завдання 2.....	20
3.1 Стаціонарна теплопровідність. Розрахунок теплопередачі через багатошарову плоску стінку	20
3.2 Нестационарна теплопровідність. розрахунок динаміки нагріву (охолодження) тіла при граничних умовах ііі роду	24
3.3. Розрахунок спалення палива.....	27
4. Організація самостійної роботи та вказівки для самостійної роботи.....	29
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	59
ДОДАТОК А. Приклад оформлення титульного листа	60
ДОДАТОК Б. Вихідні дані до Завдання № 1	61
ДОДАТОК В. Вихідні дані до Завдання № 2	65
ДОДАТОК Г. Значення газової постійної та теплоємності для різних речовин ...	69
ДОДАТОК Д. Середні масові ізохорні теплоємності c_{9m} , кДж/(кг·К), в інтервалі температур від 0 до t	70
ДОДАТОК Е. Середні масові ізобарні теплоємності c_{pm} , кДж/(кг·К), в інтервалі температур від 0 до t	72
ДОДАТОК Ж. Насичена пара фреону-12 (CCl_2F_2)	74
ДОДАТОК К. h_s – діаграма водяної пари	75
ДОДАТОК Л. Термодинамічні властивості води та водяної пари у стані насичення (по тисках) [2, таблиця II-II].....	76
ДОДАТОК М. Термодинамічні властивості води та перегретої пари [2, таблиця II-III].....	77

ВСТУП

Теплота використовується у всіх областях діяльності людини. Для встановлення найбільш раціональних способів його використання, аналізу економічності робочих процесів теплових установок і створення нових, найбільш досконалих типів теплових агрегатів необхідна розробка теоретичних основ теплотехніки.

Розрізняють два принципово різних напрямки використання теплоти - енергетичне і технологічне. При енергетичному використанні, теплота перетворюється в механічну роботу, за допомогою якої в генераторах створюється електрична енергія, зручна для передачі на відстань. Теплоту при цьому отримують спалюванням палива в котельних установках або безпосередньо в двигунах внутрішнього згоряння. При технологічному - теплота використовується для спрямованої зміни властивостей різних тіл (розплавлення, затвердіння, зміни структури, механічних, фізичних, хімічних властивостей).

Освоєння дисципліни дозволить майбутнім інженерам забезпечити необхідний рівень для описання технологічних процесів, проектування режиму роботи, обробки деталей та інструментів з урахуванням впливу теплових явищ, що їх супроводжують.

Завдання дисципліни навчити теоретичним та практичним навичкам розрахунків енергетичних установок та тепло масо обмінних систем, надати уявлення про проблеми, які виникають перед розробниками технологічних – та теплових установок.

У результаті вивчення дисципліни студент повинен

знати:

-теплофізичні особливості технологічних систем та види і шляхи енергії, що використовують;

- основні положення теорії теплопровідності, конвекційного та радіаційного теплообміну, теплообміну при зміні агрегатного стану рідини;

- напрямки схематизації теплових задач та методи їх розв'язання;

вміти:

- проводити розрахунок процесів теплообміну для певних задач технологічних апаратів.
- обґрунтовано обирати режимні параметри агрегатів, у яких має місце тепло масообмін різноманітних речовин.
- проводити розрахунок тепло та масообміну в технологічних установках, де він має місце.

1. ВИМОГИ ДО ВИКОНАННЯ, ОФОРМЛЕННЯ, ТА ОЦІНЮВАННЯ ІНДИВІДУАЛЬНИХ ЗАВДАНЬ

Індивідуальні домашні завдання (ДЗ) охоплюють усі розділи, та складається з двох завдань. Номер варіанта завдання та номер завдання задає викладач. При виконанні ДЗ студент повинен знати відповідний теоретичний матеріал. Для виконання ДЗ необхідне користуватися відповідними довідниками, посилання на які надані у рекомендаціях до кожного ДЗ.

Текстова частина ДЗ виконується на листах одностороннього білого паперу формату А4. Першою сторінкою текстової частини є титульний лист, приклад оформлення якого надано у Додатку А. Другою та третьою сторінками є лист завдання, на якому повинні бути написані постановки задач з вихідними даними варіанта студента. Номер варіанта задає викладач. Усі сторінки ДЗ, окрім першої, повинні бути пронумеровані та скріплені степлером (включаючи графічну частину). Перша сторінка (титульний лист) не нумерується, але враховується.

Графічна частина:

Завдання 1 виконується на ксерокопії h_s -діаграми водяної пари, схеми установок,

PV -, TS - діаграми – на білому папері;

Завдання 2 – на міліметровому папері формату А4.

Вихідні дані для виконання завдання № 1 і № 2 надані у Додатках Б і В відповідно.

Кожне ДЗ складається з декількох частин, тому варто кожну частину починати з нової сторінки і нумерувати.

Наприклад, 1 РОЗРАХУНОК ТЕРМОДИНАМІЧНИХ ПРОЦЕСІВ СУМІШІ ІДЕАЛЬНИХ ГАЗІВ.

Кожна частина закінчується окремою сторінкою, на яку виписуються результати розрахунку. Робота, оформлена не відповідно належним вимогам, на перевірку не приймається. Якщо робота виконана не вірно, або в роботі є помилки вона повертається на доопрацювання.

Максимальна кількість балів отриманих за розрахунково- графічну роботу (домашні завдання), визначається з робочої програми дисципліни. За вірно виконану розрахункову роботу студент має можливість отримати 10 балів, а саме:

За теоретичну частину – 2 балів;

За практичну частину – 5 балів;

захист розрахункової роботи – 3 балів.

«8 - 10 балів» «відмінно» - одержують роботи, в яких містяться самостійні висновки, дається самостійний аналіз фактичного матеріалу на основі глибоких знань літератури з даного предмету.

«5 – 7» «добре» - ставиться в тому випадку, коли в роботі допущені незначні розрахункові неточності.

«3 – 4» – «задовільно» - заслуговують роботи, в яких містяться окремі помилкові положення та не чітко висвітлені відповіді на запитання.

«0 – 3» – «не задовільно» - студент одержує у випадку, коли не може відповісти на запитання викладача, в розрахунках допущені грубі помилки, не володіє матеріалом роботи, не в змозі дати пояснення висновкам і теоретичним положенням даної проблеми. У цьому випадку студенту має бути надана можливість повторного захисту.

Захист і оцінка розрахункової роботи – це підведення підсумків самостійної роботи студента й одержання права допуску до екзамену (заліку) з дисципліни «Теплотехнічні процеси та установки» та «Теплотехнічні процеси в технічних системах».

Залік виставляється автоматично (тобто студент може не з'являтися на залік), якщо виконані та захищені на позитивні оцінки всі індивідуальні домашні завдання практичні або лабораторні роботи, відпрацьовані всі пропущені заняття (лекції, лабораторні, практичні) та отримані позитивні оцінки на практичних заняттях.

Відпрацьовування пропущених лекцій та практичних занять здійснюється під час консультацій та передбачає наявність теоретичного матеріалу у конспекті та позитивних усних відповідей на запитання викладача по даній темі. Тобто

студент повинен самостійно вивчити тему та вміти розв'язувати задачі. Для відпрацьовування пропущених практичних або лабораторних занять викладач назначає додатковий час консультацій.

Оцінки, отримані при виконанні індивідуального завдання та лабораторних (практичних) робіт, або під час проведення практичних занять, враховуються при виставленні заліку (екзамену). При отриманні незадовільної оцінки з будь-якого виду занять студенту назначається додаткова консультація (не більше двох на одне заняття) для перездачі.

2. РОЗРАХУНКОВО - ГРАФІЧНЕ ЗАВДАННЯ 1

Тема: «Розрахунок термодинамічних процесів суміші ідеальних газів, циклів паросилових, холодильних та газових установок». Вихідні дані надані у Додатку Б.

Завдання № 1 складається з чотирьох частин:

- 1 Розрахунок термодинамічних процесів суміші ідеальних газів.
- 2 Розрахунок циклів паросилових установок.
- 3 Розрахунок циклів холодильних установок.
- 4 Розрахунок циклів газових установок.

2.1 Розрахунок термодинамічних процесів суміші ідеальних газів

Суміш, що складається з m_1 кг азоту і m_2 кг водню, маючи початкові параметри - тиск $p_1 = 5$ МПа і температуру $t_1 = 27^\circ\text{C}$, розширюється при постійному тиску до об'єму $V_2 = a_1$; потім суміш розширюється в процесі $PV^k = \text{const}$ до об'єму $V_3 = b_2$. Визначити газову постійну суміші, її початковий об'єм V_1 , густину при нормальних умовах, параметри суміші в станах 2 і 3, зміну внутрішньої енергії, ентальпії, ентропії, тепло і роботу розширення в процесах 1-2 і 2-3. Показати процеси в pV – і TS – діаграмах. Врахувати залежність теплоємності від температури.

Вихідні дані надані у таблиці Б1 Додатку Б.

Послідовність виконання

Масові частки: азоту $g_{N_2} = \frac{m_{N_2}}{m_{cm}} = \frac{m_{N_2}}{m_{N_2} + m_{H_2}}$; водню $g_{H_2} = 1 - g_{N_2}$.

Уявна маса суміші

$$\mu_{cm} = \frac{1}{\frac{g_{N_2}}{\mu_{N_2}} + \frac{g_{H_2}}{\mu_{H_2}}},$$

де μ_{N_2}, μ_{H_2} – молекулярні маси компонентів, кг/кмоль [1, с. 312, або Додаток Г].

Газова постійна суміші ідеальних газів $R_{cm}=8314/\mu_{cm}$, Дж/(кг·К).

Об'єм суміші у початковому стані, визначений з рівняння стану

$$V_1 = \frac{m_{cm} \cdot R_{cm} \cdot T_1}{p_1}, \text{ м}^3.$$

Зверніть увагу: t_1 треба перевести у градуси Кельвіна, а тиск p_1 – у Паскалі.

Густина газової суміші при нормальних фізичних умовах $\rho_{cm}=\mu_{cm}/22,4$, кг/м³.

Визначення термічних параметрів станів 2 і 3 (для уникнення арифметичних помилок бажано шукати величини виражати через вихідні дані):

– процес 1-2 ізобарний. Стан 2: $p_2=p_1=5$ МПа; $V_2=a \cdot V_1$, м³;
 $T_2 = T_1 \frac{V_2}{V_1} = T_1 \cdot a$, К (°C).

– процес 2-3 адіабатний. Стан 3: $V_3=b \cdot V_2=b \cdot a \cdot V_1$, м³;
 $p_3 = p_2 \cdot \left(\frac{V_2}{V_3}\right)^k = p_2 \left(\frac{1}{b}\right)^k$, Па;
 $T_3 = T_2 \cdot \left(\frac{V_2}{V_3}\right)^{k-1} = T_2 \cdot \left(\frac{1}{b}\right)^{k-1}$, К (°C).

Зміна внутрішньої енергії:

– у процесі 1-2 $\Delta U_{1-2} = m_{cm} \cdot c_{vm}^{cm} \Big|_{t_1}^{t_2} \cdot (t_2 - t_1)$, кДж;

– у процесі 2-3 $\Delta U_{2-3} = m_{cm} \cdot c_{vm}^{cm} \Big|_{t_2}^{t_3} \cdot (t_3 - t_2)$, кДж,

де $c_{vm}^{cm} \Big|_{t_1}^{t_2}, c_{vm}^{cm} \Big|_{t_2}^{t_3}$ – середні масові ізохорні теплоємності суміші газів у відповідному діапазоні температур, кДж/(кг·К) [1, с. 314, або Додаток Д].

$$c_{vm}^{cm} = g_{N_2} \cdot c_{vm}^{N_2} + g_{H_2} \cdot c_{vm}^{H_2},$$

$c_{vm}^{N_2}, c_{vm}^{H_2}$ – середні масові ізохорні теплоємкості компонентів суміші газів у відповідному діапазоні температур (t_1 - t_2 , t_2 - t_3), кДж/(кг·К) [1, с. 314, або Додаток Д].

Таким чином, необхідне визначити $c_{vm}^{N_2}, c_{vm}^{H_2}$ у діапазоні температур (t_1 - t_2), та у діапазоні температур (t_2 - t_3). Середня масова ізохорна теплоємкість кожного компонента суміші визначається за формулами, кДж/(кг·К), [1, с. 314, або Додаток Д]:

$$c_{vm}|_{t_1}^{t_2} = \frac{c_{vm}|_0^{t_2} \cdot t_2 - c_{vm}|_0^{t_1} \cdot t_1}{t_2 - t_1}, \quad c_{vm}|_{t_2}^{t_3} = \frac{c_{vm}|_0^{t_3} \cdot t_3 - c_{vm}|_0^{t_2} \cdot t_2}{t_3 - t_2},$$

де $c_{vm}|_0^{t_i}$ – середні масові ізохорні теплоємкості компонентів суміші газів у відповідному діапазоні температур (0 - t_i), кДж/(кг·К) [1, с. 314, або Додаток Д] визначаються методом лінійної інтерполяції.

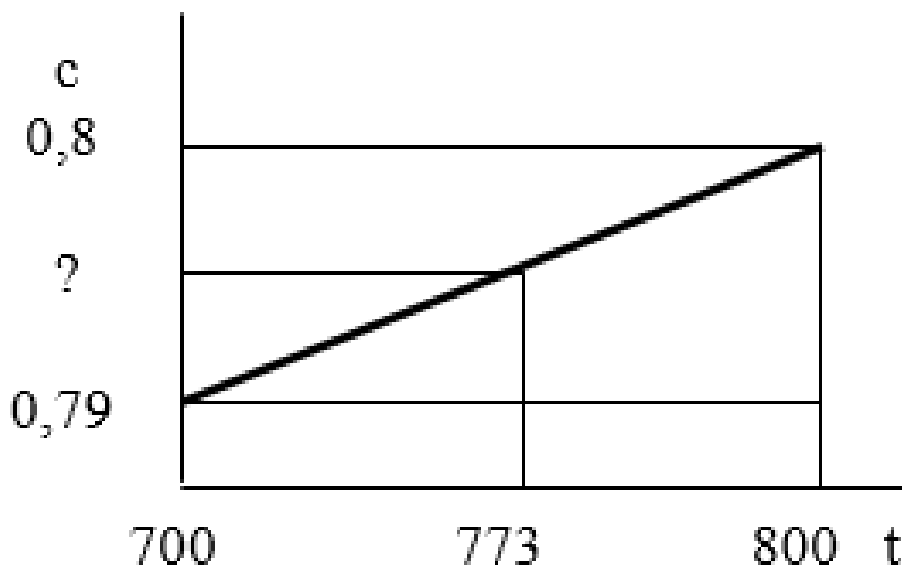


Рисунок 1 – Схема лінійної інтерполяції

Наприклад, $t_2=773^{\circ}\text{C}$. Тоді

$$\begin{aligned} c_{vm}^{N_2}|_0^{t_2} &= 0,79 + \frac{0,8 - 0,79}{800 - 700} \cdot (773 - 700) = \\ &= 0,7973 \text{ кДж/(кг·К)}. \end{aligned}$$

Зміна ентальпії:

– у процесі 1-2 $\Delta H_{1-2} = m_{\text{см}} \cdot c_{\text{pm}}^{\text{см}} \Big|_{t_1}^{t_2} \cdot (t_2 - t_1), \text{кДж};$

– у процесі 2-3 $\Delta H_{2-3} = m_{\text{см}} \cdot c_{\text{pm}}^{\text{см}} \Big|_{t_2}^{t_3} \cdot (t_3 - t_2), \text{кДж},$

де $c_{\text{pm}}^{\text{см}} \Big|_{t_1}^{t_2}, c_{\text{pm}}^{\text{см}} \Big|_{t_2}^{t_3}$ – середні масові ізобарні теплоємкості суміші газів у відповідному діапазоні температур, кДж/(кг·К) [1, с. 313, або Додаток Е].

$$c_{\text{pm}}^{\text{см}} = g_{\text{N}_2} \cdot c_{\text{pm}}^{\text{N}_2} + g_{\text{H}_2} \cdot c_{\text{pm}}^{\text{H}_2},$$

$c_{\text{pm}}^{\text{N}_2}, c_{\text{pm}}^{\text{H}_2}$ – середні масові ізобарні теплоємкості компонентів суміші газів у відповідному діапазоні температур (t_1 - t_2 , t_2 - t_3), кДж/(кг·К) [1, с. 313, або Додаток Е]. Визначаються аналогічно.

Зміна ентропії:

– у процесі 1-2 $\Delta S_{1-2} = m_{\text{см}} c_{\text{pm}}^{\text{см}} \Big|_{t_1}^{t_2} \cdot \ln \frac{T_2}{T_1} = m_{\text{см}} c_{\text{pm}}^{\text{см}} \Big|_{t_1}^{t_2} \cdot \ln a, \text{кДж/К};$

– у процесі 2-3 $\Delta S_{2-3}=0.$

Тепло підводиться тільки у ізобарному процесі 1-2 $Q_{1-2}=\Delta H_{1-2}$, у адіабатному процесі 2-3 $Q_{2-3}=0.$

Робота, кДж:

– у ізобарному процесі 1-2 $L_{1-2}=p_1(V_2-V_1)=p_1 \cdot V_1(a-1)/10^3$

або $L_{1-2}=m_{\text{см}} \cdot R_{\text{см}}(T_2-T_1)=m_{\text{см}} \cdot R_{\text{см}} \cdot T_1(a-1)/10^3;$

– у адіабатному процесі 2-3 $L_{2-3} = -\Delta U_{2-3}.$

Розрахунки закінчуються перевіркою теплового балансу у відповідності із 1-м законом термодинаміки (кДж): $Q_{1-2}=\Delta U_{1-2}+L_{1-2}.$

2.2 Розрахунок циклів паросилових установок

Водяна пара з початковим тиском 5 МПа і ступенем сухості 0,9 надходить у пароперегрівач, де його температура підвищується на Δt , °С, потім дроселюється до тиску P_3 , МПа, з яким пара надходить до парової турбіни, де розширюється до тиску P_4 , кПа.

Визначити:

- параметри всіх станів; кількість тепла, що підведена до пари у пароперегрівачу;
- зміну внутрішньої енергії в процесі дроселювання;
- роботу розширення пари;
- термічний ККД циклу Ренкіна (без обліку роботи насоса);
- питому витрату пари, кг/(кВт·год.).

Визначити роботу турбіни та кінцеву ступінь сухості, якщо пара не дроселюється до тиску P_3 . Проаналізувати вплив процесу дроселювання та зробити висновки.

Задачу вирішити за допомогою таблиць водяної пари [2]. Усі процеси зобразити на ксерокопії h - s -діаграми (Додаток К). У текстовій частині представити схему паросилової установки, що працює за циклом Ренкіна, а також p - T – T - s – діаграми циклу. Вихідні дані надані у таблиці Б2 Додатку Б.

Послідовність виконання:

Визначення параметрів всіх станів. У текстовій частині повинні бути представлені довідкові (табличні) значення всіх параметрів.

Стан 1. Волога насичена пара характеризується шістьма параметрами: p , ϑ , t , h , s , x .

По заданих $p_1=5$ МПа та $x_1=0,9$ визначаються інші параметри за наступними формулами:

$$\vartheta_1 = \vartheta'_1 + x_1 (\vartheta''_1 - \vartheta'_1), \text{ м}^3/\text{кг};$$

$$h_1 = h'_1 + r_1 \cdot x_1, \text{ кДж/кг};$$

$$s_1 = s'_1 + \frac{r_1 \cdot x_1}{T_1}, \text{ кДж/(кг} \cdot \text{К)},$$

де $\vartheta'_1, \vartheta''_1, h'_1, r_1, s'_1, T_1$ – довідкові (табличні) значення визначаються по [2, табл. II-II] при $p_1=5$ МПа.

Зверніть увагу: у [2, табл. II-II] температура надана у градусах Цельсія (t , °C).

Стан 2. Волога насичена пара перегрівается у пароперегрівачі. Треба знати, що цей процес здійснюється при постійному тиску $p_1=p_2=5$ МПа. На виході з пароперегрівача перегріта пара характеризується п'ятьма параметрами: p_2 , ϑ_2 , t_2 , h_2 , s_2 . По двох відомих параметрах $p_1=p_2=5$ МПа і $t_2=t_1+\Delta t$ визначаються інші довідкові (табличні) значення [2, табл. II-III], використовуючи метод лінійної інтерполяції.

Стан 3. Треба пам'ятати, що у процесі дроселювання ентальпія пари не змінюється, тобто $h_2=h_3$. У стані 3 пара перегріта, її параметри (t_3 , ϑ_3 , s_3) визначаються по двох відомих параметрах: p_3 та h_3 [2, табл. II-III]], використовуючи метод лінійної інтерполяції.

Стан 4. Перегріта пара з тиском p_3 надходить до парової турбіни, де відбувається її адіабатне розширення з отриманням корисної механічної роботи, яка перетворюється на електричну енергію у електрогенераторі, що підключений до турбіни і утворює турбогенераторну установку. На виході з турбіни розширена пара має низький тиск p_4 і є вологою насиченою. Якщо не враховувати втрати механічної енергії у турбіні, процес адіабатного розширення пари можна вважати оборотним, тобто ізоентропним ($s_3=s_4$).

Для визначення параметрів ϑ_4 та h_4 спочатку треба визначити величину ступені сухості x_4 . Для цього за заданим значенням p_4 , кПа, з [2, табл. II-II] необхідно виписати значення наступних величин: t_4 , ϑ'_4 , ϑ''_4 , h'_4 , r_4 , s'_4 . По відомому $s_4=s_3$ визначається x_4 , а потім ϑ_4 та h_4 по наступних формулах:

$$s_4 = s'_4 + \frac{r_4 \cdot x_4}{T_4},$$

$$\text{звідки } x_4 = (s_4 - s'_4) \cdot \frac{T_4}{r_4};$$

$$\vartheta_4 = \vartheta'_4 + x_4 (\vartheta''_4 - \vartheta'_4), \text{ м}^3/\text{кг};$$

$$h_4 = h'_4 + r_4 \cdot x_4, \text{ кДж/кг}.$$

Кількість тепла, підведена у пароперегрівачі в процесі 1-2:

$$q_2=h_2-h_1, \text{ кДж/кг}.$$

Зміна внутрішньої енергії в процесі дроселювання 2-3:

$$\Delta u_{2-3} = p_2 \vartheta_2 - p_3 \vartheta_3, \text{ кДж/кг.}$$

Зверніть увагу: щоб визначити Δu_{2-3} у кДж/кг, треба перевести тиски p_2 та p_3 у кПа.

У процесі дроселювання 2-3 температура перегрітої пари декілька зменшується, тому величина Δu_{2-3} повинна бути негативною (тобто зі знаком “-”).

Робота розширення пари у турбіні:

$$\ell_{3-4} = h_3 - h_4, \text{ кДж/кг.}$$

Термічний ККД циклу Ренкіна (без обліку роботи насоса):

$$\eta = \frac{h_3 - h_4}{h_3 - h'_4}.$$

Питома витрата пари:

$$d = \frac{3600}{l_{3-4}}, \text{ кг/(кВт·год.)}.$$

Якщо дроселювання пари не відбувалося, робота розширення пари у турбіні:

$$\ell_{2-3} = h_2 - h_5, \text{ кДж/кг,}$$

де h_5 – визначається по відомих p_4 та s_2 [2, табл. II-II] аналогічно визначенню параметрів стану 4, тобто ($s_5 = s_2$),

$$x_5 = (s_2 - s'_4) \cdot \frac{T_4}{r_4};$$

$$h_5 = h'_4 + r_4 \cdot x_5, \text{ кДж/кг.}$$

У кінці частини необхідно порівняти величини ℓ_{3-4} та ℓ_{2-5} , а також x_4 та x_5 і проаналізувати вплив процесу дроселювання з точки зору отримання найбільшої ступені сухості пари на виході з турбіни, що забезпечує їй сприятливі гідрогазодинамічні умови роботи.

2.3 Розрахунок циклів холодильних установок

Пара фреона-12 при температурі t_1 надходить у компресор, де ізоентропно стискується до тиску, при котрому його температура стає рівної t_2 , а сухість пари $x_2=1$. З компресора фреон надходить у конденсатор, де при постійному тиску звертається в рідину, після чого розширюється в дроселі до температури $t_4=t_1$. Визначити холодильний коефіцієнт установки; масову витрату фреону, а також теоретичну потужність приводу компресора, якщо холодопродуктивність установки Q . Зобразити схему установки і її цикл у TS – координатах. Вихідні дані надані у таблиці Б3 Додатку Б.

Послідовність виконання

Питома холодопродуктивність визначається за формулою:

$$q_2=r_1(x_1-x_4), \text{ кДж/кг},$$

де r_1 – теплота пароутворення при t_1 , кДж/кг [1, с.319, або Додаток Ж];

x_1, x_4 – ступені сухості пари фреону, які визначаються за формулами:

$$s_1 = s_2 = s_2'' = s_1' + x_1 \cdot (s_1'' - s_1'),$$

$$x_1 = \frac{s_2'' - s_1'}{s_1'' - s_1'};$$

$$h_4 = h_3' = h_1' + x_4 \cdot r_1,$$

$$x_4 = \frac{h_3' - h_1'}{r_1},$$

де s_1', s_1'', h_1' – визначаються при t_1 [1, с.319, або Додаток Ж];

s_2'', h_3' – при t_2 [1, с.319, Додаток Ж].

Теплота, що відводиться від хладоагенту у конденсаторі:

$$q_1 = h_2 - h_3 = h_2'' - h_3', \text{ кДж/кг},$$

h_2'' – визначається при t_2 [1, с.319, або Додаток Ж].

Робота, витрачена у циклі:

$$\ell_{\text{ц}}=q_1-q_2, \text{ кДж/кг.}$$

Холодильний коефіцієнт:

$$\varepsilon = \frac{q_2}{l_{\text{ц}}}.$$

Масова витрата фреону:

$$G=Q/q_2, \text{ кг/с.}$$

Теоретична потужність приводу компресора: $N_0=Q/\varepsilon, \text{ кВт.}$

2.4 Розрахунок циклів газових установок

Початкові параметри повітря, що надходить у компресор газотурбінної установки (ГТУ) зі спаленням палива при $P=\text{const}$, $P_1=0,1 \text{ МПа}$ і $t_1, ^\circ\text{C}$. Ступінь підвищення тиску в компресорі β . У компресорі робиться адіабатний стиск повітря. Температура газів перед турбіною t_3 . Витрата повітря через компресор G .

Визначити параметри всіх крапок ідеального циклу ГТУ; підведене і відведене тепло; термічний ККД ГТУ; роботу циклу; теоретичні потужності турбіни, компресора і всієї ГТУ; параметри всіх крапок дійсного циклу (з обліком необоротності процесів розширення і стиску в турбіні і компресорі), прийнявши внутрішні відносні ККД турбіни $\eta_{\text{oi}}^{\text{т}}$ і компресора $\eta_{\text{oi}}^{\text{к}}$. Визначити також внутрішній ККД ГТУ і дійсні потужності турбіни, компресора і всієї ГТУ. Представити відкриту схему ГТУ та обидва цикли в TS-координатах. Теплоємкість повітря прийняти постійною і рівною $c_p=1,005 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{К)}$.

Вихідні дані надані у таблиці Б4 Додатку Б.

Послідовність виконання

Визначення температур t_2 , t_4 теоретичного циклу ГТУ.

Процес 1-2 – адіабатний стиск повітря у компресорі:

$$T_2 = T_1 \cdot \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} = T_1 \cdot \beta^{\frac{k-1}{k}}, \text{ К } (^\circ\text{C}),$$

де k – показник адіабати повітря [Додаток Г].

При здійсненні циклу за двома адіабатами та двома ізобарами:

$$\frac{T_2}{T_1} = \frac{T_3}{T_4}, \quad T_4 = \frac{T_1 \cdot T_3}{T_2}, \text{ К (}^\circ\text{C)}.$$

Теплота у циклі підводиться у ізобарному процесі 2-3:

$$q_1 = c_p(T_3 - T_2), \text{ кДж/кг}.$$

Відвід теплоти у ГТУ здійснюється ізобарно у процесі 4-1:

$$q_2 = c_p(T_4 - T_1), \text{ кДж/кг}.$$

Робота циклу:

$$\ell_{\text{ц}} = q_1 - q_2, \text{ кДж/кг}.$$

Термічний ККД визначається тільки для теоретичного циклу:

$$\eta_t = \frac{\ell_{\text{ц}}}{q_1}.$$

Перевірка: термічний ККД ГТУ з адіабатним стиском у компресорі та ізобарним підведенням теплоти у камері згоряння можна визначити за формулою:

$$\eta_t = 1 - \frac{1}{\beta^{\frac{k-1}{k}}}.$$

Теоретичні потужності, кВт:

- турбіни $N_o^T = G(h_3 - h_4) = G \cdot c_p(t_3 - t_4);$
- компресора $N_o^K = G(h_2 - h_1) = G \cdot c_p(t_2 - t_1);$
- ГТУ $N_o^{\text{ГТУ}} = N_o^T - N_o^K.$

Розрахунок температур t_5, t_6 дійсного циклу.

Температура t_5 повітря наприкінці незворотнього стиску на виході з компресора:

$$\eta_{oi}^K = \frac{h_2 - h_1}{h_5 - h_1} = \frac{t_2 - t_1}{t_5 - t_1},$$
$$t_5 = \frac{t_2 - t_1}{\eta_{oi}^K} + t_1.$$

Температура t_6 наприкінці незворотнього розширення на виході з турбіни:

$$\eta_{oi}^T = \frac{h_3 - h_6}{h_3 - h_4} = \frac{t_3 - t_6}{t_3 - t_4},$$

$$t_6 = t_3 - \eta_{oi}^T \cdot (t_3 - t_4).$$

Внутрішній ККД ГТУ

$$\eta_i^{ГТУ} = \frac{(h_3 - h_6) - (h_5 - h_1)}{h_3 - h_5} = \frac{(t_3 - t_6) - (t_5 - t_1)}{t_3 - t_5}.$$

Дійсна потужність, кВт:

$$\begin{aligned} - \text{турбіни} & \quad N_d^T = G(h_3 - h_6) = G \cdot c_p(t_3 - t_6) \quad \text{або} \quad N_d^T = N_o^T \cdot \eta_{oi}^T; \\ - \text{компресора} & \quad N_d^K = G(h_5 - h_1) = G \cdot c_p(t_5 - t_1) \quad \text{або} \quad N_d^K = N_o^K / \eta_{oi}^K; \\ - \text{ГТУ} & \quad N_d^{ГТУ} = N_d^T - N_d^K. \end{aligned}$$

У кінці завдання порівняти значення термічного та внутрішнього ККД, потужностей та зробити висновки.

3. РОЗРАХУНКОВО- ГРАФІЧНЕ ЗАВДАННЯ 2

Тема: «Розрахунок теплопередачі через багатошарову плоску стінку. Розрахунок спалення палива». Вихідні дані надані у Додатку В.

Завдання 2 складається з трьох частин:

1. Стаціонарна теплопровідність. Розрахунок теплопередачі через багатошарову плоску стінку.
2. Нестационарна теплопровідність. Розрахунок динаміки нагріву (охолодження) тіла при граничних умовах III роду.
3. Розрахунок спалення палива.

3.1 Стаціонарна теплопровідність. Розрахунок теплопередачі через багатошарову плоску стінку

Тепло димових газів передається через стінку котла киплячій воді. Приймаючи температуру газів t_g , води t_v , коефіцієнт тепловіддачі газами стінці α_1 і від стінки воді α_2 і вважаючи стінку плоскою, потрібно:

1. Підрахувати термічний опір R , коефіцієнти теплопередачі і кількість переданого тепла від газів з температурою t_g до води з температурою t_v через 1 м^2 стінки за 1 сек для наступних випадків:

- а) стінка сталева, зовсім чиста, товщиною S_2 , $\lambda_2=50 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$;
- б) стінка мідна, зовсім чиста, товщиною S_2 , $\lambda_2'=350 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$;
- в) стінка сталева, з боку води покрита шаром накипу товщиною S_3 , $\lambda_3=2 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$;
- г) випадок «в», але поверх накипу мається шар олії товщиною $S_4=1 \text{ мм}$, $\lambda_4=0,1 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$;
- д) випадок «г», але з боку газів стінка покрита шаром сажі товщиною S_1 , $\lambda_1=0,2 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$.

2. Приймавши кількість тепла для випадку «а» за 100 %, підрахувати у відсотках тепло для всіх інших випадків.

3. Визначити аналітично температури всіх шарів стінки випадку «д».

4. Перевірити підраховані температури графічно, тобто побудувати у масштабі графік залежності $t=f(R)$ (на міліметровому папері формату А4).

5. Побудувати для випадку «д» лінію спаду температури в стінці $t=f(S)$ у масштабі (на міліметровому папері формату А4).

Вихідні дані надані у таблиці В1 Додатку В. Теоретичний матеріал викладено на лекціях та у [3].

Послідовність виконання

У текстовій частині зобразити схематично лінію спаду температури в стінці для чотирьох випадків (а, б, в, г) та визначити щільність теплового потоку для всіх випадків (а, б, в, г, д). Лінію спаду температури в стінці для випадку “д” побудувати на міліметровому папері формату А4 (див. п. 5 завдання).

а) стінка сталева, зовсім чиста, товщиною

$$S_2, \lambda_2=50 \text{ Вт/(м·К)}.$$

Термічний опір:

$$R = \frac{1}{\alpha_1} + \frac{S_2}{\lambda_2} + \frac{1}{\alpha_2}, (\text{м}^2 \cdot \text{К})/\text{Вт}.$$

Зверніть увагу: товщини стінки та шарів задані у міліметрах! Коефіцієнт теплопередачі:

$$k=1/R, \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}.$$

Питомий тепловий потік:

$$q_a=k \cdot (t_f-t_b), \text{ Вт/м}^2.$$

б) стінка мідна, зовсім чиста, товщиною $S_2, \lambda_2'=350 \text{ Вт/(м·К)}.$

Термічний опір визначається аналогічно випадку

а) з урахуванням коефіцієнта теплопровідності міді $\lambda_2'.$

в) стінка сталева, з боку води покрита шаром накипу товщиною $S_3, \lambda_3=2$

$\text{Вт/(м·К)}.$ Термічний опір:

$$R = \frac{1}{\alpha_1} + \frac{S_2}{\lambda_2} + \frac{S_3}{\lambda_3} + \frac{1}{\alpha_2}, (\text{м}^2 \cdot \text{К})/\text{Вт}.$$

г) випадок “в”, але поверх накипу мається шар олії товщиною $S_4=1$ мм, $\lambda_4=0,1$ Вт/(м·К). Термічний опір:

$$R = \frac{1}{\alpha_1} + \frac{S_2}{\lambda_2} + \frac{S_3}{\lambda_3} + \frac{S_4}{\lambda_4} + \frac{1}{\alpha_2}, (\text{м}^2 \cdot \text{К})/\text{Вт}.$$

д) випадок “г”, але з боку газів стінка покрита шаром сажі товщиною S_1 , $\lambda_1=0,2$ Вт/(м·К).

Термічний опір складається з шістьох елементів:

$$R = \frac{1}{\alpha_1} + \frac{S_1}{\lambda_1} + \frac{S_2}{\lambda_2} + \frac{S_3}{\lambda_3} + \frac{S_4}{\lambda_4} + \frac{1}{\alpha_2}, (\text{м}^2 \cdot \text{К})/\text{Вт}.$$

Прийнявши кількість тепла для випадку “а” за 100 %, підрахувати у відсотках тепло для всіх інших випадків, зробити висновок.

Аналітичне визначення температури всіх шарів стінки випадку “д”, °С:

$$t_1 = t_r - q \cdot \frac{1}{\alpha_1};$$

$$t_2 = t_r - q \cdot \left(\frac{1}{\alpha_1} + \frac{S_1}{\lambda_1} \right);$$

$$t_3 = t_r - q \cdot \left(\frac{1}{\alpha_1} + \frac{S_1}{\lambda_1} + \frac{S_2}{\lambda_2} \right);$$

$$t_4 = t_r - q \cdot \left(\frac{1}{\alpha_1} + \frac{S_1}{\lambda_1} + \frac{S_2}{\lambda_2} + \frac{S_3}{\lambda_3} \right);$$

$$t_5 = t_b + q \cdot \frac{1}{\alpha_2}.$$

Для побудови графіків $t=f(R)$, $t=f(S)$ (див. п. 4, 5 завдання) варто обрати наступний масштаб для температури: 1 см=100°С; значення шкали R представити як $R \cdot 10^3$, шкалу S виміряти міліметрами (масштаби R та S визначає студент).

Деякі труднощі викликає побудова графіку $t=f(R)$, тому що значення R для шістьох елементів відрізняються у десятки разів. Так наприклад,

$$R_1 = \frac{1}{\alpha_1} = \frac{1}{160} = 0,00625;$$

$$R_2 = \frac{S_1}{\lambda_1} = \frac{0,001}{0,2} = 0,005 ;$$

$$R_3 = \frac{S_2}{\lambda_2} = \frac{0,065}{50} = 0,0013 ;$$

$$R_4 = \frac{S_3}{\lambda_3} = \frac{0,003}{2} = 0,0015 ;$$

$$R_5 = \frac{S_4}{\lambda_4} = \frac{0,001}{0,1} = 0,01 ;$$

$$R_6 = \frac{1}{\alpha_2} = \frac{1}{3500} = 0,00029 ;$$

Для графічного визначення температур всіх шарів стінки (див. п. 4 завдання) варто представити значення R усіх елементів у текстовій частині та зробити наступну дію:

$$R_1 = \frac{1}{\alpha_1} = \frac{1}{160} = 0,00625 ; \quad 6,25 \text{ см};$$

$$R_2 = \frac{S_1}{\lambda_1} = \frac{0,001}{0,2} = 0,005 ; \quad 5 \text{ см};$$

$$R_3 = \frac{S_2}{\lambda_2} = \frac{0,065}{50} = 0,0013 ; \quad 1,3 \text{ см};$$

$$R_4 = \frac{S_3}{\lambda_3} = \frac{0,003}{2} = 0,0015 ; \quad 1,5 \text{ см};$$

$$R_5 = \frac{S_4}{\lambda_4} = \frac{0,001}{0,1} = 0,01 ; \quad 10 \text{ см};$$

$$R_6 = \frac{1}{\alpha_2} = \frac{1}{3500} = 0,00029 ; \quad 0,3 \text{ см}.$$

$$\Sigma R = 0,02435 ; \quad 24,35 \text{ см}.$$

Таким чином, довжина шкали R дорівнює: 24,35 см. Якщо $\Sigma R > 25$ см, масштаб треба зменшити удвічі.

При будівництві графіка $t=f(R)$ значення R відкладаються послідовно, тобто спочатку R_1 , потім R_2 і так далі.

3.2 Нестационарна теплопровідність. розрахунок динаміки нагріву (охолодження) тіла при граничних умовах iii роду

Сталева заготівля у формі плити чи циліндра товщиною $2r_0$, мм, з початковою температурою t_n , °C, симетрично нагрівається до кінцевої температури t_k , °C, у печі з постійною температурою $t_{\text{печ}}$, °C, або проохолоджується на повітрі з температурою t_b , °C. Теплоємність сталі C , кДж/(кг·K), густина $\rho = 7800$ кг/м³, коефіцієнт теплопровідності $\lambda=35$ Вт/(м·K), коефіцієнт тепловіддачі α , Вт/(м²·K).

Визначити:

1. Термічну масивність тіла.
2. Час нагрівання (охолодження) заготівлі τ^k .
3. Розрахувати і побудувати на міліметровому папері формату А4 температурну $t=f(\tau)$ і теплову $q=f(\tau)$ діаграми, а також розподіл температури по перетині тіла $t=f(r_0)$.
4. Час нагрівання по методу теплової діаграми τ^c .
5. Погрішність розрахунку τ по п. 2 і по п. 4.

Вихідні дані надані у таблиці В2.

Послідовність виконання

Насамперед треба визначити термічну масивність тіла, від якої залежить вибір формули для розрахунку часу нагріву (охолодження).

Термічна масивність визначається за критерієм Біо:

$$Bi = \frac{\alpha \cdot r_0}{\lambda},$$

де r_0 – товщина шару, що прогрівається (охолоджується). При симетричному нагріванні (охолодженні)

$$r_0=2r_0/2.$$

Якщо $Bi < 0,25$, тіло вважається термічно тонким і час нагріву (охолодження) визначається за конвективною формулою:

– при нагріванні

$$\tau^k = \frac{r_0 \cdot \rho \cdot c}{k_1 \cdot \alpha} \cdot \text{Ln} \frac{t_{\text{печ}} - t_n}{t_{\text{печ}} - t_k}, \text{ с}; \quad (1)$$

– при охолодженні

$$\tau^k = \frac{r_0 \cdot \rho \cdot c}{k_1 \cdot \alpha} \cdot \text{Ln} \frac{t_n - t_b}{t_k - t_b}, \text{ с}. \quad (2)$$

При $Bi > 0,5$ тіло вважається термічно товстим і час нагріву (охолодження) визначається методом теплової діаграми:

– при нагріванні

$$\tau^c = \frac{r_0 \cdot \rho \cdot c}{k_1 \cdot \bar{q}} \cdot (t_k - t_n), \text{ с}; \quad (3)$$

– при охолодженні

$$\tau^c = \frac{r_0 \cdot \rho \cdot c}{k_1 \cdot \bar{q}} \cdot (t_n - t_k), \text{ с}, \quad (4)$$

де \bar{q} – середній питомий тепловий потік за час нагріву (охолодження), Вт/м^2 .

$$\text{При } \frac{q_n}{q_k} \leq 1,8 \quad \bar{q} = \frac{q_n + q_k}{2}; \quad (5)$$

$$\text{при } \frac{q_n}{q_k} > 1,8 \quad \bar{q} = \frac{q_n - q_k}{\text{Ln} \frac{q_n}{q_k}}. \quad (6)$$

Питомий тепловий потік, Вт/м^2 :

– на початку

$$\text{нагріву} \quad q_n = \alpha(t_{\text{печ}} - t_n); \quad (7)$$

$$\text{охолодження} \quad q_n = \alpha(t_n - t_b); \quad (8)$$

– наприкінці

$$\text{нагріву} \quad q_k = \alpha(t_{\text{печ}} - t_n) \cdot \exp\left(-\frac{k_1 \cdot \alpha}{r_0 \cdot \rho \cdot c} \cdot \tau_k\right); \quad (9)$$

$$\text{охолодження} \quad q_k = \alpha(t_n - t_b) \cdot \exp\left(-\frac{k_1 \cdot \alpha}{r_0 \cdot \rho \cdot c} \cdot \tau_k\right). \quad (10)$$

Для побудування на міліметровому папері формату А4 графіків динаміки нагріву (охолодження) $t=f(\tau)$, $q=f(\tau)$, $t=f(r_0)$ треба розділити увесь час τ_k на рівні інтервали: $0-\tau_1$, $\tau_1-\tau_2$, $\tau_2-\tau_3$, $\tau_3-\tau_4$, $\tau_4-\tau^k$. Для проміжних

значень τ_i визначити щільності теплового потоку за формулами (9) або (10) та відповідні температури:

$$t_i = t_{\text{печ}} - (t_{\text{печ}} - t_n) \cdot \exp\left(-\frac{k_1 \cdot \alpha}{r_0 \cdot \rho \cdot c} \cdot \tau_i\right), \text{ } ^\circ\text{C} \quad (11)$$

де i – номер інтервалу, тобто $t_i = f(\tau_i)$ і т.д.

Усі графіки будуються у відповідному масштабі та пов'язані між собою: у лівому верхньому куті міліметрового паперу будується залежність $t = f(\tau)$, під ним – $q = f(\tau)$, у правому верхньому куті – $t = f(r_0)$.

Надалі треба визначити час τ^c нагріву (охолодження) по методу теплової діаграми за формулами (3) або (4) для кожного інтервалу, використовуючи відповідні температури t_i та середні питомі теплові потоки \bar{q}_i , що усереднюються за формулами (5) або (6).

Так, наприклад,

– при нагріванні тіла

$$\tau_1^c = \frac{r_0 \cdot \rho \cdot c}{k_1 \cdot \bar{q}_1} \cdot (t_1 - t_n), \quad \tau_2^c = \frac{r_0 \cdot \rho \cdot c}{k_1 \cdot \bar{q}_2} \cdot (t_2 - t_1) \text{ і т.д.}$$

– при охолодженні тіла

$$\tau_1^c = \frac{r_0 \cdot \rho \cdot c}{k_1 \cdot \bar{q}_1} \cdot (t_n - t_1), \quad \tau_2^c = \frac{r_0 \cdot \rho \cdot c}{k_1 \cdot \bar{q}_2} \cdot (t_1 - t_2) \text{ і т.д.}$$

$$\text{де} \quad \bar{q}_1 = \frac{q_n + q_1}{2}$$

$$\text{або} \quad \bar{q}_1 = \frac{q_n - q_1}{\ln \frac{q_n}{q_1}};$$

$$\text{де} \quad \bar{q}_2 = \frac{q_1 + q_2}{2}$$

$$\text{або} \quad \bar{q}_2 = \frac{q_1 - q_2}{\ln \frac{q_1}{q_2}} \text{ і т.д.}$$

Загальний час нагріву по методу теплової діаграми $\tau^c = \sum \tau_i^c$, с, не повинен відрізнятися від часу нагріву, визначеному за конвективною формулою τ^k більше, ніж на 1%, тобто погрішність розрахунку

$$\delta = \frac{|\tau^k - \tau^c|}{\tau^k} \cdot 100\% < 1\% .$$

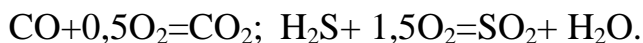
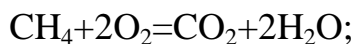
3.3. Розрахунок спалення палива

Розрахувати дійсно необхідну кількість повітря L_d з коефіцієнтом витрати α , об'єм та склад продуктів згоряння V_d при спалюванні вологого газу наступного складу, %: CH_4 , H_2 , O_2 , N_2 , CO , CO_2 , H_2O , H_2S у сухому повітрі наступного складу, %: O_2^B , N_2^B . Розрахувати матеріальний баланс процесу спалення палива.

Вихідні дані надані у таблиці В3. Теоретичний матеріал викладено на лекціях та у [4].

Послідовність виконання

Реакції горіння горючих компонентів палива:



Об'єм кисню при $\alpha=1$:

$$V'_{O_2} = V_{O_2}^{CH_4} + V_{O_2}^{H_2} + V_{O_2}^{CO} + V_{O_2}^{H_2S} - V_{O_2}^r = 2CH_4 + 0,5H_2 + 0,5CO + 1,5H_2S - O_2^r, \quad m^3 O_2 / m^3$$

палива.

Коефіцієнт співвідношення азоту повітря до кисню:

$$K = N_2^B / O_2^B .$$

Кількість азоту, що надійшла з повітрям:

$$V_{N_2}^B = V'_{O_2} \cdot K, \quad m^3 N_2 / m^3 \text{ палива.}$$

Теоретично необхідна кількість повітря:

$$L_0 = V'_{O_2} + V_{N_2}^B, \quad m^3 \text{ повітря} / m^3 \text{ палива.}$$

Дійсна витрата азоту при $\alpha > 1$:

$$V_{N_2}^d = \alpha \cdot K \cdot V'_{O_2}, \quad m^3 N_2 / m^3 \text{ палива.}$$

Дійсно необхідна кількість повітря:

$L_d = L_0 \cdot \alpha$, м³ повітря/м³ палива.

Об'єм продуктів згоряння при $\alpha > 1$:

$$V_d = V_{CO_2} + V_{H_2O} + V_{N_2} + V_{SO_2} + V_{O_2}, \text{ м}^3/\text{м}^3.$$

$$V_{CO_2} = V_{CO_2}^{CH_4} + V_{CO_2}^{CO} + V_{CO_2}^r, \text{ м}^3 \text{ CO}_2/\text{м}^3 \text{ палива}.$$

$$V_{H_2O} = V_{H_2O}^{CH_4} + V_{H_2O}^{H_2} + V_{H_2O}^{H_2S} + V_{H_2O}^r = 2 \cdot CH_4 + H_2 + H_2S + H_2O^r, \text{ м}^3 \text{ H}_2\text{O}/\text{м}^3 \text{ палива}.$$

$$V_{N_2} = V_{N_2}^l + V_{N_2}^r, \text{ м}^3 \text{ N}_2/\text{м}^3 \text{ палива}.$$

$$V_{SO_2} = V_{SO_2}^{H_2S}, \text{ м}^3 \text{ SO}_2/\text{м}^3 \text{ палива}.$$

$$V_{O_2} = V'_{O_2} (\alpha - 1), \text{ м}^3 \text{ O}_2/\text{м}^3 \text{ палива}.$$

Склад продуктів згоряння, %:

$$CO_2 = \frac{V_{CO_2}}{V_d} \cdot 100\% ;$$

$$H_2O = \frac{V_{H_2O}}{V_d} \cdot 100\% ;$$

$$N_2 = \frac{V_{N_2}}{V_d} \cdot 100\% ;$$

$$O_2 = \frac{V_{O_2}}{V_d} \cdot 100\% ;$$

$$SO_2 = \frac{V_{SO_2}}{V_d} \cdot 100\% ;$$

$$\Sigma = 100,00 \%.$$

Рекомендована точність розрахунку складу продуктів згоряння – соті частки одиниці.

Для перевірки правильності розрахунків складається матеріальний баланс горіння палива.

а) Прибуткові статті балансу, кг:

маса палива:

$$m_r = \rho_r \cdot V_r. \quad V_r = 1 \text{ м}^3.$$

густина газу:

$$\rho_r = \frac{1}{22,4 \cdot 100} (16CH_4 + 28CO + 2H_2 + 34H_2S + 28N_2 + 32O_2 + 44CO_2 + 18H_2O), \text{ кг}/\text{м}^3;$$

маса повітря:

$$m_v = \rho_v \cdot L_d.$$

густина повітря:

$$\rho_v = \frac{32 \cdot O_2 + 28 \cdot N_2}{22,4 \cdot 100}, \text{ кг/м}^3;$$

прибуткова маса:

$$m_{\text{прих}} = m_r + m_v, \text{ кг.}$$

б) Видаткові статті балансу, кг:

маса продуктів згоряння:

$$m_d = \rho_d \cdot V_d,$$

де густина продуктів згоряння, кг/м³:

$$\rho_d = \frac{44 \cdot CO_2 + 28 \cdot N_2 + 64 \cdot SO_2 + 18 \cdot H_2O + 32 \cdot O_2}{2241}, \text{ кг/м}^3;$$

видаткова маса:

$$m_{\text{расх}} = m_d, \text{ кг.}$$

в) Нев'язання матеріального балансу, %:

$$\delta = \frac{|m_{\text{расх}} - m_{\text{прих}}|}{m_{\text{прих}}} \cdot 100 < 0,5 \, \%.$$

4. ОРГАНІЗАЦІЯ САМОСТІЙНОЇ РОБОТИ ТА ВКАЗІВКИ ДЛЯ САМОСТІЙНОЇ РОБОТИ

Самостійна робота - це вид розумової діяльності, за якої студент самостійно (без сторонньої допомоги) опрацьовує практичне питання, тему, вирішує задачу або виконує завдання на основі знань, отриманих з підручників, книг, на лекціях, практичних або лабораторних заняттях.

Вища школа поступово, але неухильно переходить від передачі інформації до управління навчально-пізнавальною діяльністю, формування в студентів навичок самостійної роботи. Відповідно до Положення про організацію навчального процесу у вищих навчальних закладах, самостійна робота студентів є основним засобом оволодіння навчальним матеріалом у

вільний від обов'язкових навчальних занять час. Навчальний час, відведений для самостійної роботи студентів, регламентується робочим навчальним планом дисциплін. На початку лекцій, практичних занять або лабораторних робіт студентам задаються питання с самоперевірки, для перевірки їх знань та для отримання балів за роботу на заняття, згідно навчальної програми.

Робоча програма навчальної дисципліни складається з наступних тем:

ТЕМА 1. Основні поняття та закони термодинаміки. Термодинамічна система. Термічні параметри стану. Термодинамічне рівняння стану речовини. Суміші ідеальних газів.

Методичні вказівки

При вивченні цієї теми студент повинний приділити особливу увагу наступним питанням:

1. Відмінність ідеального газу від реального і як вона позначається на залежності внутрішньої енергії, ентальпії і теплоємностей c_p і c_v газу від його температури. Поняття ідеального газу є науковою абстракцією, моделлю реального газу, що дає гарну збіжність із практикою, коли стан газу далекий від стану скраплення. Застосування цієї моделі дозволяє побудувати досить прості аналітичні залежності термодинаміки, застосування яких до теплових машин дає, як правило, прийнятну збіжність із практикою. Для насиченої пари, тобто для стану, близького до стану скраплення, модель ідеального газу не прийнятна. У цьому випадку приходиться застосовувати дуже складні моделі і рівняння реальних газів, у яких враховують власні розміри молекул, а також сили взаємодії між ними.

2. Фактори, що впливають на величину теплоємності газу (параметри газу, природа його, характер термодинамічного процесу і кількість газу).

3. Необхідні вихідні дані для одержання газової постійної суміші ідеальних газів. Остання може бути задана масовими, об'ємними чи мольними частками. Знання газової постійної суміші дозволяє при

дослідженні термодинамічних процесів користатися рівнянням Клапейрона так само, як і для окремого газу.

4. Способи визначення теплоти процесу з використанням понять теплоємкості та ентропії. Ентропія – ще одна функція (параметр) стану – служить лише для спрощення термодинамічних розрахунків, а головне, дозволяє графічно зобразити теплоту, що приймає участь у процесі, у TS-діаграмі.

Література [1, с. 7–44].

Питання для самоперевірки

1. Чи можна азот, кисень і повітря вважати ідеальними газами при досить низьких температурах і великих тисках? 2. Чи можна водяну пару вважати ідеальним газом при досить великих температурах і малих тисках? 3. Яке співвідношення між універсальною і питомою газовою постійною й у яких одиницях їх виражають? 4. Напишіть рівняння стану ідеального газу для 1 кмоль, 1 кг, m кг газу і приведіть розмірності вхідних у нього величин. 5. Що таке абсолютний, надлишковий (манометричний і вакуумметричний) та барометричний тиски і який зв'язок між ними? Що таке нормальні фізичні умови? 6. Які процеси називають рівноважними, а які – нерівноважними? 7. Які процеси називають оборотними, а які – необоротними? 8. Чому внутрішня енергія і ентальпія ідеального газу залежать тільки від одного параметра – температури? 9. У чому відмінність понять “наявна теплоємність” і “середня теплоємність”? 10. Яка з теплоємностей ідеального газу більше: наявна теплоємність c_{p1} (при заданій t_1), наявна теплоємність c_{p2} (при заданій t_2 , причому $t_2 > t_1$), середні теплоємності $c_p|_{t_1}^{t_2}$; $c_p|_0^{t_2}$; $c_p|_{t_1}^{t_2}$? Покажіть це графічно, використовуючи систему координат $c_p=f(t)$. Як по табличним даним визначити $c_p|_{t_1}^{t_2}$? 11. Що такий парціальний тиск і парціальний об'єм компонента суміші? 12. У яких межах може мінятися газова постійна суміші, що складається з кисню і водню? 13. Як визначити газову постійну суміші

ідеальних газів, задану масовими чи об'ємними частками? **14.** Як за допомогою TS-діаграми встановити знак теплоти, що приймає участь у процесі?

ТЕМА 2. Перший закон термодинаміки. Внутрішня енергія. Ентальпія. Ентропія. Термодинамічний процес і його енергетичні характеристики. Робота. Теплота Теплоємність газів та суміш газів. Аналітичний вираз першого закону термодинаміки Рівняння першого закону термодинаміки для потоку. Витікання з сопла, що звужується. сопло Лавалю. Розрахунок процесу витікання за допомогою h, s - діаграмі.

Методичні вказівки

При вивченні цієї теми студент повинний звернути увагу на принципове розходження між внутрішньою енергією як функцією стану газу і теплотою і роботою як функціями процесу. Треба твердо засвоїти, що якщо внутрішня енергія цілком визначена для кожного стану газу, то робота і тепло взагалі не існують для окремого стану, а з'являються лише при наявності процесу (зміни стану) і, природно, залежать від характеру цього процесу. Студент повинний також уміти розраховувати різні термодинамічні процеси і зображувати їх у pV - і Ts - діаграмах.

У термодинаміці перехід робочого тіла з одного рівноважного стану в інший здійснюється у оборотному термодинамічному процесі. Завдання початкового і кінцевого станів робочого тіла позначає повне знання всіх термодинамічних параметрів стану початкової і кінцевої точок процесу. Основна задача дослідження термодинамічного процесу – визначення теплоти (q_{1-2}), що приймає участь у процесі, і роботи зміни об'єму робочого тіла (ℓ_{1-2}). Такі величини, як зміна внутрішньої енергії (Δu_{1-2}) ентальпії (Δh_{1-2}) й ентропії (Δs_{1-2}), є допоміжними, що служать для вирішення основної задачі.

Загальний метод дослідження термодинамічних процесів є універсальним, що не залежить від природи робочого тіла. Метод базується на використанні рівняння першого закону термодинаміки, записаного у двох

$$\text{рівнозначних формах: } q_{1-2} = \Delta u_{1-2} + \int_{\vartheta_1}^{\vartheta_2} p d\vartheta = \Delta h_{1-2} - \int_{p_1}^{p_2} \vartheta dp .$$

Безупинне одержання роботи за рахунок підведення теплоти можливо тільки в циклі і не можливо в розімкнутому процесі. Тому ретельно вивчіте всі питання, що відносяться до циклів, особливо до циклу Карно, що має велике значення в термодинаміці. Формула для термічного ККД циклу Карно, власне кажучи, також є технічним вираженням істоти другого закону термодинаміки в застосуванні до теплових машин. Оборотний цикл Карно при обраних температурах T_{\max} гарячого джерела теплоти і T_{\min} холодильника має найвищий термічний ККД серед будь-яких інших оборотних циклів.

Перший закон термодинаміки не встановлює умов, при яких теплота в машині перетворюється в роботу. Це легко усвідомити з наступних міркувань. Якщо застосувати рівняння першого закону термодинаміки до циклу і проінтегрувати його по замкнутому контурі циклу, то одержимо $q_{\text{ц}} = \oint dq = \oint du + \oint dl_{\text{ц}} = 0 + l_{\text{ц}} = l_{\text{ц}}$, оскільки u – функція стану. Звідси випливає, що теплота, підведена до робочого тіла в циклі ($q_{\text{ц}}$), дорівнює роботі, отриманій в результаті здійснення циклу ($l_{\text{ц}}$). Останнє може привести до невірної висновку про повне перетворення теплоти в роботу циклу, що рівносильно можливості створення вічного двигуна другого роду. Це протиріччя легко усунути за допомогою поняття ентропії як функції стану. Проінтегрувавши вираження $ds = dq/T$ по замкнутому контурі циклу, одержимо $\oint ds = \oint dq/T = 0$, тому що s – функція стану. З огляду на те, що абсолютна температура T не може бути негативною, дійдемо висновку, що інтеграл $\oint dq/T$ може дорівнювати нулю тільки в тому випадку, якщо на окремих ділянках циклу буде нерівність $dq < 0$, тобто буде здійснюватися відвід теплоти. Отже, при здійсненні циклу поряд з підведенням теплоти до

робочого тіла ($dq > 0$) обов'язково повинні бути процеси з відводом теплоти ($dq < 0$). Саме це й означає, що підведену до робочого тіла теплоту в циклі не можна цілком перетворити в роботу.

Питання для самоперевірки

1. Коли тепло, робота і зміна внутрішньої енергії вважаються позитивними і коли – негативними?
2. Як називається процес, у якому все підведене тепло йде на збільшення внутрішньої енергії?
3. Як називається процес з ідеальним газом, у якому все підведене тепло йде на здійснення роботи?
4. Як називається процес, у якому робота відбувається лише за рахунок зменшення внутрішньої енергії?
5. Як називається процес, у якому підведене до робочого тіла тепло чисельно дорівнює зміні ентальпії? Яка частка підведеного тепла в цьому випадку йде на зміну внутрішньої енергії?

ТЕМА 3. Другий закон термодинаміки. Формулювання другого закону термодинаміки. Ідеальний цикл Карно. Властивості незворотних кругових процесів.

Методичні вказівки

Незважаючи на наявність у літературі великої кількості формулювань другого закону термодинаміки, сутність цього закону зводиться до двох положень: 1) теплота не може мимовільно переходити від холодного тіла до гарячого без витрати роботи; 2) для перетворення теплоти в роботу в періодично діючій машині необхідна наявність не менш двох джерел теплоти: тепловіддатчика (гарячого) і теплоприймача (холодного). При цьому тільки частина теплоти, переданої тілу від гарячого джерела, може

бути перетворена в роботу, інша частина повинна бути віддана холодному джерелу.

На відміну від першого закону термодинаміки, що є абсолютним законом природи, справедливим як для макросвіту, так і для мікросвіту, другий закон термодинаміки таким не є. Порозумівається це тим, що він отриманий зі спостережень над об'єктами, що мають кінцеві розміри в навколишніх земних умовах, і не може довільно поширюватися як на нескінченний всесвіт, так і на нескінченний мікросвіт.

Не можна змішувати поняття «ентропія тіла» і «ентропія системи». Між цими поняттями існує принципова різниця. Ентропія, як функція стану визначеного тіла (наприклад, газу чи пари), має цілком визначену властивість – зміна її при протіканні якого-небудь процесу не залежить від характеру процесу, а залежить лише від параметрів тіла в початковому і кінцевому його стані. Тому зміна її $\Delta s = s_2 - s_1 = \int_1^2 dq/T$ може бути позитивною, негативною чи рівною нулю в залежності від того підводиться чи відводиться тепло від тіла, чи процес відбувається без теплообміну.

Якщо розглядається ізольована система, що складається з тепловіддатчика, робочого тіла, що робить оборотний цикл Карно, і теплоприймача, то: а) у випадку оборотних процесів передачі теплоти (тобто при нескінченно малій різниці температур) від тепловіддатчика робочому тілу і від нього теплоприймачу ентропія системи залишається постійною ($\Delta s_0=0$); б) у випадку, якщо один із процесів, наприклад тепловіддача від джерела до робочого тіла, протікає при кінцевій різниці температур, ентропія системи зростає ($\Delta s_c > 0$).

Не залежно від оборотності процесу ентропія робочого тіла в циклі (як функція стану) завжди залишається незмінною ($\Delta s_{\text{рт}}=0$).

Усі реальні процеси є необоротними, тому ентропія ізольованої системи, у якій протікають такі процеси, завжди зростає ($\Delta s_c > 0$). Зростання ентропії в необоротних процесах саме по собі ні про що не говорить. Однак зростання

ентропії приводить до зменшення працездатності ізольованої системи. Для кількісної оцінки втрати працездатності системи вводиться поняття питомої ексергії, під якою розуміють максимальну питому роботу, чинену системою при її переході від даного стану до рівноваги з навколишнім середовищем. Варто розуміти, чому втрата ексергії, що веде до зменшення працездатності системи через необоротність процесу, визначається добутком найменшої температури системи на збільшення ентропії.

Питання для самоперевірки

1. Який цикл називається прямим і який – зворотним?
2. Чим оцінюється ефективність прямого і зворотного циклів?
3. . Для чого служать теплові машини, що працюють по прямому і зворотному циклах?
4. Чому оборотний цикл Карно є найефективнішим серед інших циклів, здійснюваних у заданому інтервалі температур T_{\max} і T_{\min} ? Покажіть за допомогою T_s – діаграми.
5. Як за допомогою вираження $ds=dq/T$ показати, що в круговому процесі не все підведене тепло перетворюється в корисну роботу, а частина його віддається холодильнику?
6. У чому складається спільність формулювань другого закону термодинаміки?
7. Що таке ексергія? Чим визначається зменшення працездатності ізольованої системи?

Література [1, с. 45–119].

ТЕМА 4. Основні термодинамічні процеси в газах и парах.

Термодинамічні процеси ідеальних газів в закритих системах. Ізохорний процес. Ізобарний процес. Ізотермний процес . Адіабатний процес . Політропний процес і його узагальнююче значення. Характеристики політропних процесів

Методичні вказівки

Усі реальні процеси є необоротними, тому ентропія ізольованої системи, у якій протікають такі процеси, завжди зростає ($\Delta s_c > 0$). Зростання ентропії в необоротних процесах саме по собі ні про що не говорить. Однак зростання ентропії приводить до зменшення працездатності ізольованої системи. Для кількісної оцінки втрати працездатності системи вводиться поняття питомої ексергії, під якою розуміють максимальну питому роботу, чинену системою при її переході від даного стану до рівноваги з навколишнім середовищем. Варто розуміти, чому втрата ексергії, що веде до зменшення працездатності системи через необоротність процесу, визначається добутком найменшої температури системи на збільшення ентропії.

Питання для самоперевірки

1. Який процес називається політропним?
2. Покажіть у Ts – діаграмі роботу газу в адіабатному процесі.
3. При яких значеннях показника політропи n можна одержати рівняння основних термодинамічних процесів?
4. Зобразите схематично в Ts – діаграмі процес стиску $p\vartheta^{1,2} = \text{const}$ і покажіть, якими площадками будуть зображуватися q , Δu і Δh .
5. Чому в Ts – діаграмі ізохора йде крутіше, ніж ізобара, а в $p\vartheta$ - діаграмі адіабата йде крутіше ізотерми?
6. Як у Ts – діаграмі по заданій кривій процесу визначити знак q і Δu ?
7. Які групи політропних процесів ви знаєте? Покажіть їх на $p\vartheta$ - та Ts – діаграмах.

Література [1, с. 95–119].

ТЕМА 5. Водяна пара і її властивості. Пароутворення. Водяна пара. Рівняння Ван-дер-Ваальса. Водяна пара і її характеристики. процес перетворення рідини в пару. основні параметри стану водяної пари. h - s діаграма і аналіз основних термодинамічних процесів водяної пари.

Пристаючи до вивчення цієї теми, студент повинний чітко усвідомити, що розрахункові формули, що застосовувалися для ідеального газу, тут як правило, недійсні, оскільки пара відноситься до реальних газів. Лише при високій температурі і низькому тиску її можна розглядати як ідеальний газ. Однак у техніці такий випадок буває рідко. Розходження в застосуванні загального методу дослідження до ідеальних газів і водяної пари обумовлено відсутністю для пари такого простого рівняння стану, як рівняння Клапейрона для ідеального газу, і складною залежністю теплоємності пари від температури і тиску. Тому рішення основної задачі для ідеального газу спирається на кінцеві аналітичні залежності, у той час як для пари застосування загального методу вимагає використання таблиць чи h_s - діаграми. Наприклад, у випадку ізотермічного процесу зміни стану 1 кг робочого тіла загальними формулами будуть: $q_{1-2} = T \Delta s_{1-2} = T(s_1 - s_2)$;

$$\ell_{1-2} = q_{1-2} - \Delta u_{1-2}.$$

У випадку ідеального газу:

$$\Delta s_{1-2} = R \cdot \ln \vartheta_2 / \vartheta_1 = R \cdot \ln p_2 / p_1; \quad \Delta u_{1-2} = 0; \quad q_{1-2} = R \cdot T \cdot \ln \vartheta_2 / \vartheta_1 = R \cdot T \cdot \ln p_2 / p_1 = \ell_{1-2}.$$

У випадку реального газу (пари):

$$\Delta u_{1-2} = (h_2 - p_2 \vartheta_2) - (h_1 - p_1 \vartheta_1); \quad q_{1-2} = T(s_1 - s_2); \quad \ell_{1-2} = q_{1-2} - [(h_2 - p_2 \vartheta_2) - (h_1 - p_1 \vartheta_1)],$$

де $p_1, p_2, \vartheta_1, \vartheta_2, h_1, h_2, s_1, s_2$ – беруться з таблиць [2] чи знімаються з h_s - діаграми для точок, що визначають початковий і кінцевий стани пари.

Водяна пара є робочим тілом у сучасних теплосилових установках, а також знаходить широке застосування в різних технологічних процесах. Необхідно розібратися в процесі паротворення і вміти зображувати цей процес у $p\vartheta$ -, Ts - і h_s - діаграмах. Параметри водяної пари можна визначити по таблицях, а також за допомогою h_s - діаграми. Найбільше просто і з достатньою для інженерних розрахунків точністю параметри вологої, сухої і перегрітої пари визначаються за допомогою h_s - діаграми. Студент повинний усвідомити принцип роботи з h_s - діаграмою і навчитись визначати по ній параметри пари різного стану. Будь-яка точка на h_s -

діаграмі в області вологої насиченої пари і на прикордонних лініях (кипляча вода – на нижній лінії, суха насичена пара – на верхній лінії насичення) визначає шість параметрів (t, p, ϑ, h, s, x), а будь-яка точка в області холодної води і перегрітої пари – п'ять параметрів (t, p, ϑ, h, s). Необхідно уміти визначати всі параметри будь-якої точки на hs – діаграмі і по таблицях [2]. Для успішного рішення різних задач, зв'язаних з водяною парою, навчитися схематично зображувати основні процеси (ізохорний, ізобарний, ізотермічний і адіабатний) у $p\vartheta$ -, Ts – і hs - діаграмах.

Література [1, с. 140–163].

Питання для самоперевірки

1. Що такий випар і кипіння?
2. Яка пара називається сухою насиченою?
3. Який фізичний зміст прикордонних кривих?
4. Яка пара називається перегрітою і що таке ступінь перегріву?
5. Яка пара називається вологою насиченою і що таке ступінь сухості?
6. Як визначити питомий об'єм, ентальпію й ентропію вологої пари? 7. Чим характерна критична точка?
8. Якими параметрами можна охарактеризувати стан вологої, сухої і перегрітої пари?
9. Зобразите $p\vartheta$ -і Ts – діаграмах водяної пари й і покажіть у них характерні області і лінії фазових переходів.
10. Зобразите основні термодинамічні процеси з парою у $p\vartheta$ -, Ts – і hs – діаграмах. 11. Як змінюються теплота паротворення, ентальпія сухого насиченої пари та ентальпія рідини зі збільшенням тиску? 12. Чим характерна потрійна точка води? Які значення її параметрів?

ТЕМА 6. Цикли паросилових установок(ПСУ) (цикл Ренкіна).
Методи підвищення ККД циклу Ренкіна. Вплив на термічний ККД циклу

початкового тиску пари. Вплив на термічний ККД циклу початкової температури пари. Вплив кінцевого тиску на термічний ККД циклу. Визначення основних характеристик ПСУ

Методичні вказівки

Цикли ПСУ є основою сучасної теплоенергетики. Тому підвищенню ефективності ПСУ в даний час приділяється велика увага. Насамперед, необхідно вивчити історію розвитку теорії ПСУ, її сучасний стан і перспективи розвитку. Розберіться в принциповій схемі установки. За основний цикл прийнятий ідеальний цикл Ренкіна. На відміну від циклу Карно, що працює на вологій парі, у цьому циклі здійснюється повна конденсація робочого тіла в конденсаторі, тому для подачі живильної води в паровий котел замість громіздкого малоефективного компресора використовується живильний насос, що має малі габарити і високий ККД. Дослідження основного циклу здійснюється за допомогою p – T , T – s , h – s – діаграм. Уміння аналізувати цикли за допомогою діаграм є обов'язковим. Розберіть отримання рівняння для визначення термічного ККД циклу Ренкіна. Дослідження термічного ККД при різних початкових і кінцевих станах пари дозволяє зрозуміти, що збільшення початкового тиску і температури перегрітої пари, а також зниження тиску в конденсаторі приводять до росту ККД ПСУ й у підсумку – значної економії палива. Підвищення ККД досягається шляхом змін у самому циклі. Ці зміни приводять до створення циклів, з яких найбільший інтерес представляють: із вторинним перегрівом пари, регенеративний, парогазовий і бінарні.

Незважаючи на зниження термічного ККД у теплофікаційному циклі, метод комбінованого вироблення теплової й електричної енергії є найбільш прогресивним. Комбіноване виробництво теплоти й електроенергії значно знижує витрати палива в порівнянні з роздільним виробленням, тому розвиток теплофікації в Україні має велике значення.

Література [1, с. 204–307].

Питання для самоперевірки

1. Як міняється ступінь сухості пари за турбіною при збільшенні тиску перед турбіною при постійній початковій температурі? Покажіть на Ts – діаграмі. У чому шкода роботи турбіни на парі з великим ступенем вологості?
2. Як впливає початкова температура перегрітої пари на ступінь сухості її при виході з турбіни? Покажіть на Ts – діаграмі.
3. Що таке внутрішній відносний ККД ПСУ і як його визначають?
4. Що таке ефективний ККД ПСУ і як його визначають?
5. Для яких цілей у ПСУ використовують вторинний перегрів пари?
6. Що дає і як здійснюється регенеративний підігрів живильної води?
7. У чому сутність парогазових циклів і що дає їхнє застосування?
8. Як впливає на ККД циклу Ренкіна і ступінь сухості пари за турбіною процес дроселювання перед турбіною?
9. У чому сутність і економічна доцільність спільного вироблення електроенергії і тепла?
10. Які машини називають холодильними?

ТЕМА 7. Термодинамічний аналіз циклів теплових машин.

Компресія або стиск газів. Стиск в одноступеневому компресорі. Багатоступеневий компресор. Цикли двигунів внутрішнього згоряння (ДВЗ). Цикл двигуна з підводом тепла за постійного об'єму (цикл Отто). Цикл Дизеля. Цикл Тринклера. Характеристики реальних ДВЗ. Цикли холодильних установок

Методичні вказівки

Термодинамічний аналіз циклів ДВЗ проводиться при допущенні термодинамічної оборотності процесів, що складають цикл. Для простоти аналізу як робоче тіло приймають ідеальний газ з постійною теплоємністю. Різницю температур між джерелом теплоти і робочим тілом вважають

нескінченно малою, а підведення теплоти до робочого тіла здійснюють від зовнішніх джерел теплоти, а не за рахунок спалювання палива.

Холодильні установки працюють по зворотному циклі. Знання класифікації і принципових схем холодильних установок дозволяє правильно вибирати відповідний тип холодильної установки при розрахунку охолодження. Незважаючи на те, що повітряні холодильні установки в промисловості використовують рідко, вивчення схеми і принципу дії такої установки дозволить студенту вивчити термодинамічні основи холодильного циклу. Засвоївши навчальний матеріал теми, студент зможе аналізувати за допомогою Ts – діаграми роботу холодильних циклів, визначати холодильні коефіцієнти і холодопродуктивність установок. Особливу увагу зверніть на роботу парової компресорної холодильної установки, що одержала найбільше поширення в промисловості. Усвідомите принципову відмінність парових компресорних установок і повітряних. Запам'ятаєте, що в паровій компресорній холодильній установці не застосовується розширювальний циліндр (детандер), а робоче тіло дроселюється в регулювальному вентилі. Незважаючи на те, що це приводить до втрати холодопродуктивності, заміна спрощує установку і дає можливість легко регулювати тиск пари й одержувати низьку температуру в охолоджувачі.

По зворотному циклі працюють не тільки холодильні машини, але і теплові насоси, у яких теплота, що забирається від навколишнього середовища (тобто витрата палива не потрібна), за рахунок витраченої роботи (електроенергії) підвищує енергетичний рівень робочого тіла і при більш високій температурі віддається зовнішньому споживачу. В останні роки в багатьох країнах теплові насоси знаходять усе більше застосування, наприклад для опалення і гарячого водопостачання котеджів, розташованих поблизу водоймищів (рік, озер, морів, океанів). Усвідомите поняття коефіцієнта тепловикористання і розберіть принципову схему і роботу теплового насоса.

Питання для самоперевірки

1. Зобразите цикл ДВЗ із підведенням теплоти при $\vartheta = \text{const}$ і при $p = \text{const}$ у $p\vartheta$ – і Ts – діаграмах.
2. Як визначити термічний ККД циклу ДВЗ із підведенням теплоти при $\vartheta = \text{const}$, при $p = \text{const}$?
3. Чому в циклах ДВЗ із підведенням теплоти при $\vartheta = \text{const}$ не можна застосовувати високі ступені стиску?
4. Зобразите цикл ДВЗ зі змішаним підведенням теплоти в $p\vartheta$ – і Ts – діаграмах.
5. Як визначити термічний ККД і корисну роботу в циклі?
6. З ростом якого параметра збільшується термічний ККД будь-якого циклу?
7. Як впливає на ККД циклу Ренкіна і ступінь сухості пари за турбіною процес дроселювання перед турбіною?
8. У чому сутність і економічна доцільність спільного вироблення електроенергії і тепла?
9. Які машини називають холодильними?
10. Чим відрізняється холодильна установка від теплового двигуна?
11. Який параметр характеризує ефективність холодильної установки?
- 12.. Приведіть принципову схему і цикл у $p\vartheta$ – , Ts – діаграмах повітряної холодильної установки, опис її роботи, перелічите основні недоліки.
- 13.. Приведіть принципову схему, опис роботи і $p\vartheta$ – , Ts – діаграми парової компресорної холодильної установки.
14. Чому в парових холодильних установках доцільно застосовувати процес дроселювання, а в повітряних – адіабатне розширення в турбіні?
- 15.. Якими властивостями повинні володіти хладоагенти?
- 16.. Чим відрізняється робота теплового насоса від роботи холодильних установок? Порівняння двох циклів покажіть на Ts – діаграмі.
17. Якими способами одержують зріджені гази?

ТЕМА 8. Цикли газотурбінних установок. Ідеальні цикли ГТУ. Цикл ГТУ з ізобарним підведенням тепла. Цикл ГТУ з ізохорним підведенням тепла. Характеристики реальних ГТУ. Цикл компресорного повітряно-реактивного двигуна

Методичні вказівки

При вивченні ідеальних циклів газових двигунів потрібно звернути увагу на наступне: 1. У зв'язку з тим, що технічні процеси, що протікають з великими швидкостями, можна в першому наближенні вважати адіабатними, процеси розширення і стиску в будь-яких газових двигунах (поршневих і газотурбінних) можна приймати адіабатними. 2. Принципова відмінність циклів ГТУ від циклів ДВЗ полягає лише в процесі відводу тепла. У ГТУ здійснюється повне розширення газів (до тиску навколишнього середовища) і тому процес відводу тепла приймається ізобарним. У ДВЗ гази викидаються з циліндра з тиском, у 2-4 рази більше атмосферного і, отже, з більшою швидкістю. Тому процес відводу тепла приймається ізохорним. 3. Процес підведення тепла не характеризує приналежність розглянутого теплового двигуна до тієї чи іншої групи (як для ГТУ, так і для ДВЗ він може бути й ізохорним, і ізобарним). 4. Термічний ККД будь-якого циклу зростає зі збільшенням ступеня стиску.

Проаналізуйте рівняння для визначення термічного ККД різних циклів (ДВЗ і ГТУ) і вплив основних параметрів на термічний ККД.

Розберіться в економічності циклів ДВЗ. При порівнянні економічності розглянутих циклів при однакових ступенях стиску варто пам'ятати, що найбільш економічним буде цикл з ізохорним підведенням теплоти. Якщо ж порівняння економічності робити при однакових максимальних тисках і температурах, то максимальний ККД має цикл з ізобарним підведенням теплоти, а найменший – цикл з ізохорним підведенням теплоти.

При розгляді циклів ГТУ усвідомите принцип їхньої роботи, запам'ятаєте схеми установок і навчитесь аналізувати їхню роботу,

використовуючи $p\vartheta$ -і Ts – діаграми. Зрозумійте принцип одержання рівняння термічного ККД, внутрішнього відносного ККД і ефективного ККД ГТУ, зверніть увагу на фізичний зміст цих понять. Запам'ятаєте, що при порівнянні циклів ГТУ при різних ступенях підвищення тисків і однакових максимальних температур найбільший ККД має цикл з ізобарним підведенням теплоти. Розберіть методи підвищення термічного ККД і запам'ятаєте, що регенерація теплоти, східчастий стиск і східчасте підведення теплоти значно підвищують ККД ГТУ, а ідеальний цикл при цьому наближається до узагальненого циклу Карно.

Питання для самоперевірки

1. Які переваги мають ГТУ в порівнянні з ДВЗ?
2. Приведіть принципову схему ГТУ з підведенням тепла при $\vartheta = \text{const.}$ Зобразите цикл у $p\vartheta$ – і Ts – діаграмах.
3. Приведіть принципову схему ГТУ з підведенням тепла при $p = \text{const.}$ Зобразите цикл у $p\vartheta$ – і Ts – діаграмах.
4. Чим обмежується і як вибирається ступінь підвищення тиску в ГТУ?
5. . Що називають внутрішнім відносним ККД ГТУ і як його визначають?
6. Що називають ефективним ККД ГТУ і як його визначають?
7. Назвіть методи підвищення термічного ККД ГТУ.
8. . Приведіть порівняльну характеристику ідеальних циклів ГТУ.

ТЕМА 9. Теплообмін. Основи теорії теплопередачі. Теплообмін: визначення і головні види. Теплопровідність і конвективний теплообмін. Основний закон теплопровідності (закон Фур'є), Рівняння теплопровідності і умови однозначності. Теплопровідність у стаціонарному режимі. Теплопровідність у нестаціонарному режимі. Конвективний теплообмін. Теорія подібності: основні поняття та визначення

Методичні вказівки

При вивченні термодинаміки студент не одержував ніяких указівок на те, який механізм відводу теплоти від гарячого тіла холодному. Теорія теплообміну, навпаки, всю увагу концентрує на способах передачі теплоти. Розкриваючи механізм і фізичну сутність їхніх різних видів, вона дає оперативні залежності для розрахунку параметрів як окремих видів теплообміну, так і їхньої сукупності, називаної складним теплообміном.

Усвідомите і запам'ятаєте такі поняття, як температурне поле, градієнт температури, передана теплота, тепловий потік, поверхнева щільність теплового потоку, лінійна щільність теплового потоку.

Розгляд окремих видів теплообміну, таких, як теплопровідність, конвекція і випромінювання, є методологічним прийомом, викликаним складністю реального теплообміну, у якому, як правило, одночасно беруть участь усі перераховані види поширення теплоти.

Дослідження процесу теплопровідності при стаціонарному режимі ведеться за допомогою аналітичних залежностей – рівняння Фур'є (вирішуються диференціальні рівняння для найбільш простих тіл – плоска і циліндрична стінки). Тому студент повинний звернути увагу на методику складання і рішення рівнянь теплопровідності; усвідомити, які робляться припущення, що спрощують, у кожному конкретному випадку, які граничні умови, що дозволяють із загального рішення одержати часткове, і т.д. Розберіться, як, застосовуючи ГУ I роду, одержують рішення по поширенню тепла усередині тіла, а застосовуючи ГУ III роду, одержують рішення по передачі теплоти від гарячого носія до холодного через поділяючу їх стінку (теплопередача).

Засвойте, що фізично теплопровідність являє собою процес поширення теплоти шляхом теплового руху мікрочастинок речовини без переміщення самих часток, що спостерігається візуально. Теплопровідність спостерігається у твердих тілах, нерухомих рідких і газоподібних речовинах. Якщо відбувається рух рідини чи газу, то теплопровідність у чистому виді

має місце в дуже тонкому нерухомому шарі, що прилягає до поверхні твердого тіла.

Кінцева мета рішення задач стаціонарної теплопровідності – визначення теплового потоку, тобто кількості теплоти, переданої за 1 с. Усвідомте різницю між лінійною і поверхневою щільностями теплового потоку, а також між коефіцієнтом теплопередачі і лінійним коефіцієнтом теплопередачі. Розберіться в способах інтенсифікації теплопередачі, а також у тім, як треба правильно підбирати матеріали теплоізоляції циліндричного теплопроводу.

Необхідно також усвідомити специфіку і методику рішення задач нестационарної теплопровідності. Усвідомте, чому критерії Біо (Bi) і Фур'є (Fo) визначають нестационарну теплопровідність при нагріванні й охолодженні тіл. Прямою задачею нестационарної теплопровідності є визначення часу нагрівання (охолодження) тіл при різних ГУ; зворотною – визначення температурного стану тіла за відомим часом нагрівання (охолодження).

Література [3, с. 4–37].

Питання для самоперевірки

1. Що розуміють під явищем теплопровідності?
2. У чому відмінність механізму передачі тепла в процесі теплопровідності у твердих тілах, рідинах і газах?
3. Сформулюйте основний закон теплопровідності. Напишіть рівняння теплопровідності Фур'є. Поясніть фізичний зміст вхідних у нього величин.
4. Які границі зміни коефіцієнта теплопровідності для металів, ізоляційних і будівельних матеріалів, рідин і газів?
5. Від чого залежить коефіцієнт теплопровідності?
6. Чим відрізняються ГУ для стаціонарної і нестационарної теплопровідності?
7. У чому відмінність ГУ I і III роду і до чого приводить ця відмінність при рішенні задач.

8. Який закон розподілу температури по товщині плоскої і циліндричної стінок?
9. Напишіть вираження теплового потоку для теплопровідності в одно- і багатошаровій плоскій стінці.
10. Напишіть вираження теплового потоку для теплопровідності в одно- і багатошаровій циліндричній стінці.
11. Чому необхідно відрізняти поверхневу щільність теплового потоку від лінійної при розгляді теплопровідності через стінки труби?
12. Що таке теплопередача і чим вона відрізняється від теплопровідності?
13. Що називають термічним опором теплопередачі?
14. При якій умові розрахунок циліндричної стінки можна замінити розрахунком плоскої стінки?
15. Що може відбуватися при неправильному виборі матеріалу теплоізоляції циліндричного теплопроводу? По якій умові вибирається теплоізоляція труби?
16. Для чого прагнуть інтенсифікувати теплопередачу, і які шляхи для цього існують?
17. Як впливає матеріал плоскої стінки на перепад температур зовнішньої і внутрішньої поверхонь стінки при теплопередачі?
18. Яка методика визначення часу нагрівання (охолодження) тіл простої форми (плита, циліндр, куля) при ГУ I, II й III роду?
19. Як визначити час нагрівання (охолодження) тіл по критеріальних графіках?
20. Як визначити температуру тіла наприкінці нагрівання (охолодження) по критеріальних графіках?

ТЕМА 10. Складний теплообмін. Теплова ізоляція. Тепловіддача та теплопередачі. Загальні положення теорії теплопередачі через стінку. Одношарова плоска стінка. Циліндрична стінка. Теплова ізоляція. Визначення оптимального рівня теплозахисту огорожуючих конструкцій

Методичні вказівки

При вивченні цієї теми студент повинний насамперед усвідомити принципову відмінність теплообміну випромінюванням від переносу тепла теплопровідністю і конвекцією.

У процесі теплообміну випромінюванням відбувається подвійне перетворення енергії – внутрішня енергія перетворюється в енергію електромагнітних хвиль, що, потрапляючи на інше тіло, знову перетворюються у внутрішню енергію цього тіла. Оскільки тіла поглинають лише частину енергії електромагнітного випромінювання (частково відбиваючи чи пропускаючи її через себе), то основним питанням при дослідженні теплообміну випромінюванням є питання про кількісне співвідношення між відбитою, поглиненою і пропущеною через тіло енергіями. Відповідь на це питання дозволяє керувати тепловим випромінюванням у потрібному для практики напрямку. Так, наприклад, при захисті об'єктів від променистої енергії на шляху її поширення ставлять теплові екрани, що максимально відбивають променисту енергію. Якщо максимальне нагрівання необхідне за рахунок променистої енергії, об'єкту необхідно додати такі властивості, при яких здійснюється максимум поглинання променистої енергії (покриття поверхні тіла фарбою, шорсткість поверхні тіла й ін.). Для одержання максимальної проникної здатності променистої енергії (наприклад, світла) необхідно вибрати стінку з відповідними властивостями. Основні закони випромінювання й експериментальні дані по властивостях окремих тіл дають можливість вирішувати конкретні задачі, зв'язані з променистим теплообміном. Тому необхідно засвоїти закони Планка, Віна, Кірхгофа, Стефана–Больцмана, методику і границі їхнього застосування.

Тому що на практиці, як правило, беруть участь усі види теплообміну (теплопровідність, конвекція, випромінювання) спільно, те студент повинний досить чітко уявляти собі: а) чи усі види теплообміну маються в розглянутому випадку? б) який з видів теплообміну є переважним у

порівнянні з іншими? в) чи можна зневажити яким-небудь видом теплообміну з метою спрощення рішення задачі з погрішністю, що допускається?

Література [3, с. 68–102].

Питання для самоперевірки

1. Які довжини хвиль характерні для теплових променів?
2. Що таке абсолютно чорне, абсолютно біле і діатермічне тіло?
3. Сформулюйте закон зсуву Віна і поясніть його зв'язок із законом Планка.
4. Про що говорить закон Кірхгофа і яке його практичне застосування?
5. Сформулюйте закон Стефана-Больцмана і поясніть його зв'язок із законом Планка.
6. Що таке «ефективне випромінювання»? Чим воно відрізняється від власного випромінювання?
7. Що таке кутовий коефіцієнт випромінювання, ступінь чорності, приведений коефіцієнт випромінювання?
8. Як визначають променистий потік між рівнобіжними плоскими стінками? Чому дорівнює приведений коефіцієнт випромінювання для цього випадку?
9. Як визначають променистий потік при розташуванні одного тіла усередині іншого? Чому дорівнює приведений коефіцієнт випромінювання для цього випадку?
10. Для чого потрібні теплові екрани і якими властивостями вони повинні володіти?
11. Що таке суцільний і селективний спектри випромінювання? У яких тіл вони спостерігаються?
12. Які особливості випромінювання газів?
13. Які гази випромінюють і поглинають променисту енергію?
14. Як визначається ступінь чорності газового середовища?

ТЕМА 11 Теплообмінні апарати. Призначення класифікація і область використання теплообмінних апаратів. Поверхневі теплообмінні апарати. Основи теплового розрахунку теплообмінників. Рівняння теплового балансу. Рівняння теплопередачі.

Питання для самоперевірки

1. Складові теплового балансу.
2. Розах нок та рівняння теплового балансу.
3. Що таке поверхневий теплообмінний апарат.
4. Основи теплового розрахунку теплообмінників

Література [3].

ТЕМА 12. Паротурбінні, газотурбінні і комбіновані енергоустановки та їх складові частини. Паротурбінні установки (ПТУ). Парові і газові турбіни. Комбіновані установки. Технологічні показники парових турбін.

Питання для самоперевірки

1. Що таке паротурбінні установки (ПТУ), та їх основні складові.
2. Опишіть парові і газові турбіни.
3. Навести приклади комбінованих установок.
4. Привести технологічні показники парових турбін.

Література [3].

ТЕМА 13 Котельні установки. Головні складові організації процесів отримання теплової енергії. Допоміжні системи і пристрої котельних установок. Тепловий баланс і тепла економічність котельної установки

Методичні вказівки

Пристапуючи до вивчення розділу, студент повинний твердо засвоїти

основи теорії, що викладається в першій частині теплотехніки, оцінити можливості практичного використання її для рішення конкретних задач. Окремі питання, що вивчалися в теорії, здійснюються в окремих елементах теплоенергетичних установок. Процес одержання перегрітої пари зв'язаний з термодинамікою, а також з горінням і теплопередачею. При цьому в різних конструкціях ці процеси здійснюються зі своїми особливостями в залежності від виду палива, паропродуктивності й ін., які необхідно вивчити.

Сучасна котлова установка – складний пристрій, що складається з великого числа агрегатів і систем різного призначення. Тому необхідно насамперед за допомогою схем і їхніх описів розібратися у взаємодії різних елементів і систем, їхньому значенні, схемах руху води, повітря і палива, усвідомити основні параметри і характеристики котлових установок. Розглянете класифікацію установок по продуктивності, тиску пари, організації руху пароводяної суміші в котлоагрегаті. Розберіться в балансі котлової установки, джерелах походження окремих втрат і способах їхнього зменшення, розходженні між ККД брутто і нетто, методиці розрахунку витрати натурального й умовного палива, випарювальності, перетину й об'єму топки. Запам'ятаєте характерні значення основних втрат і від чого вони залежать, порядок величин ККД, випарювальності, теплонапруги, температури газів, що ідуть.

Вибір типу топки проводиться в залежності від роду палива і паропродуктивності котлоагрегату і визначається економічними розуміннями. Варто засвоїти основні рекомендації з вибору типу топок, добре усвідомити основні способи організації сумішоутворення і горіння в топках різних схем, їхні достоїнства і недоліки, характерні значення коефіцієнтів надлишку повітря. Потрібно знати, виходячи з яких розумінь призначається температура газів на виході з топки і як вона зв'язана з поверхнею екранів у топці, звернути увагу на співвідношення величин основних і «хвостових» (економайзер, повітропідігрівник) поверхонь нагрівання, на вибір температури газів, що ідуть. Варто мати представлення

про методику теплового розрахунку топки і конвективних поверхонь нагрівання.

По конструктивних схемах варто розглянути пристрій шарових топок різної продуктивності, засобу механізації подачі палива і пересування його на колосникових ґратах. Для котлів більшої паропроductивності застосовуються камерні топки. При спалюванні в них твердого палива його попередньо треба роздрібнити до пилоподібного стану; оптимальний розмір часток залежить від змісту летучих у вугіллі. Треба знати пристрій схем і основних агрегатів систем пилоприготування, конструкцію елементів більш простих шахтно-мірошницьких топок, використовуваних для спалювання багатих летучими речовинами кам'яних і бурих вугіль, способи видалення шлаку з топок, пристрій пальників. Зверніть увагу на перспективний вихровий спосіб спалювання, використовуваний у циклонних топках. Розглянете особливості спалювання мазуту і газу, пристрій форсунок і пальників, схеми подачі, питання боротьби з високотемпературною корозією.

Для роботи сучасного барабанного водотрубного котла з природною циркуляцією основне значення має надійна циркуляція. Вивчите її механізм, вплив тиску пари, значення кратності циркуляції. Розглянете достоїнства і недоліки прямоточних котлів. Познайомтеся з конструкціями сучасних котлоагрегатів невеликої продуктивності типу ДКВР ($D=2,5\ldots 20$ т/г) і екранних котлів середньої продуктивності ($D=15\ldots 75$ т/г), характерних для котлів промислових підприємств. Ознайомтеся зі схемами великих енергетичних котлів ($D\geq 200$ т/г) із природною циркуляцією і прямоточних, на високі і надвисокі параметри пари, установлюваних звичайно в блоці з паровими турбінами. Розглянете конструкцію економайзерів і пароперегрівників, основні вимоги до якості пари і живильної води і засобу забезпечення їх – фільтрування, знесолення, дегазація, східчастий випар. На закінчення ознайомтеся з особливостями експлуатації котлових установок, основними положеннями техніки безпеки і засобами автоматизації.

Література [5, с. 12–117, 133–267, 291–321, 337–357].

Питання для самоперевірки

1. Приведіть класифікацію котлових установок по продуктивності, параметрам пари й організації руху пароводяної суміші в котлоагрегаті.
2. З яких основних елементів складається котлова установка? Назвіть основні елементи робочого процесу котлоагрегату.
3. Приведіть рівняння теплового балансу котлоагрегату, дайте характеристику і зразкові значення його складових; укажіть від чого вони залежать? Чим відрізняється ККД бруто від ККД нетто?
4. Як визначається годинна витрата натурального й умовного в котлоагрегаті? Які приблизні значення ККД котлоагрегату? Що таке випаровуваність палива?
5. Що обмежує значення припустимої теплової напруги об'єму і перетину топки?
6. Які основні способи спалювання палива? Від чого залежить вибір шарової чи камерної топки?
7. У чому переваги ланцюгових ґрат перед нерухомими? Як механізується заброс палива на ґрати?
8. У чому характерні риси спалювання вугілля в пилоподібному стані? Назвіть основні елементи системи пилоприготування, приведіть схеми пальників.
9. Назвіть переваги і недоліки циклонних топок.
10. Які особливості топок із твердим і рідким шлаковидаленням?
11. Як здійснюється спалювання газу і мазуту? Приведіть характерні схеми пальників і форсунок. Які переваги і недоліки цих палив?
12. Назвіть характерні значення коефіцієнта надлишку повітря для різних палив і топок.
13. Яке призначення екранних поверхонь нагрівання? Чим визначається вибір температури газів на виході з топки при спалюванні вугілля і беззольних палив?

14. У чому фізична сутність природної рециркуляції? Що таке кратність циркуляції? Чи можлива природна циркуляція при тиску, рівному чи вище критичного?
15. Приведіть схему прямоточного котла і вкажіть його достоїнства і недоліки в порівнянні з котлами з природною циркуляцією.
16. Чим відрізняється характер теплообміну в топці і конвективних газоходах котла?
17. Чому при підвищенні параметрів пари змінюється співвідношення поверхонь елементів котлоагрегату?
18. У чому складаються основні способи водопідготовки? Що таке водяний режим котла і як він забезпечується? Що такий східчастий випар?
19. Розповісти про призначення й основні схеми пароперегрівників, економайзерів, повітропідігрівників. Як регулюється температура перегріву пари? Які існують засоби боротьби з корозією хвостових поверхонь нагрівання?
20. Чим забезпечується природна і штучна тяга в газоповітряному тракті котлоагрегату? Як відбувається очищення димових газів?
21. Які вимоги і засоби автоматизації котлових установок?
22. Які основні правила техніки безпеки при експлуатації котлових установок?

ТЕМА 14. Паливно- енергетичні ресурси. Природні ресурси. Склад і характеристика органічного палива

Студенту корисно проаналізувати структуру курсу теплотехніки і місце в ній даного розділу. Якщо в першому розділі вивчалися питання оптимального використання тепла, а в другому – закони поширення тепла в просторі і в часі, то в другій частині курсу ці теоретичні положення використовуються для вивчення роботи реальних установок і машин. Однак попередньо варто з'ясувати, відкіля і як виходить тепло, що ми звикли вважати «заданим»; які

речовини є джерелами тепла і яким законам підкоряється горіння реальних газів. Цим питанням і присвячений третій розділ програми, що, як бачимо, є перехідним від теоретичної до прикладної частини курсу.

Вивчення розділу варто починати з класифікації палив по його ознаках і розходжень між органічною, пальною, сухою і робочою масами палива. Необхідно розглянути основні характеристики твердого палива і їхнє значення при організації процесу горіння, розходження між вищою і нижчою теплотою згорання. Потрібно з'ясувати, чому теплові баланси звичайно зводять по нижчій теплоті згорання, добре запам'ятати основні принципи класифікації вугілля різних родовищ і знати основні характеристики рідких і газоподібних палив.

Згадайте відомі з хімії реакції окислювання вуглецю, водню і сірки; на них засновані всі термохімічні розрахунки, що визначають об'єми теоретично необхідної кількості повітря і продуктів згорання. Важливе значення має поняття коефіцієнта надлишку повітря α ; треба уявляти собі його зв'язок з якістю протікання процесів сумішоутворення і горіння, знати його приблизні значення. Необхідно також засвоїти техніку розрахунку ентальпії продуктів згорання і визначення теоретичної температури горіння за допомогою It – діаграми. Потрібно мати представлення про хімічний аналіз газів, що ідуть, за даними якого одержують зведення про якість процесу горіння.

При вивченні основ теорії горіння студент повинний одержати загальне представлення про кінетику хімічних газових реакцій, про ланцюгові реакції і про умови запалення і поширення полум'я. Треба ознайомитися з двома характерними областями протікання процесів горіння – кінетичної і дифузійної; звернути увагу на вирішальний в багатьох випадках вплив сумішоутворення на швидкість поширення полум'я. Розберіться у важливих поняттях нормальної швидкості поширення полум'я, вплив на неї різних факторів, умовах утворення ламінарного і турбулентного смолоскипа. Розгляньте особливості горіння рідкого і твердого палива (гетерогенні

реакції), умови горіння твердого палива в шарі і в зваженому стані, а також конструкції пальників для спалювання різних палив.

Література [4, с. 6–172].

Питання для самоперевірки

1. Який елементарний склад твердого і рідкого палива? Що таке органічна, пальна, суха і робоча маси палива? Як проводиться перерахування складу палива з однієї маси в іншу? Назвіть основні характеристики твердого палива.
2. У чому різниця між верхньою і нижньою теплотою згорання? Чому теплові баланси звичайно зводять по нижчій теплоті згорання?
3. Назвіть основні види рідкого палива. Які основні його характеристики?
4. Які гази входять до складу природних газів? Які характерні риси природного газу як палива?
5. Що таке умовне паливо?
6. Як визначаються витрата повітря, необхідна для згорання 1 кг (1 м^3) палива, і кількість продуктів згорання, що утворюються? Як визначається ентальпія продуктів згорання?
7. Що таке коефіцієнт надлишку повітря, як зв'язана його величина з якістю сумішоутворення і які приблизні значення цього коефіцієнта?
8. Що таке теоретична температура горіння і як вона визначається за допомогою I_t – діаграми?
9. Які умови запалення пальної суміші? Що таке температура запалення і концентраційні межі запалення?
10. Як улаштовані газові пальники?
11. Розповісти про способи спалювання рідкого і твердого палива.

ТЕМА 15. Нетрадиційні джерела енергії та використання відпрацьованого тепла. Основні схеми використання відпрацьованого

тепла. Трансформатори теплоти. Термодинамічні основи процесів трансформації теплоти. Тепловикористовуючі апарати на теплових трубах

Питання для самоперевірки

1. Навести та охарактеризувати схеми використання відпрацьованого тепла.
2. Навести та охарактеризувати трансформатори теплоти.
3. Проаналізувати термодинамічні основи процесів трансформації теплоти.
4. Навести та охарактеризувати тепловикористовуючі апарати на теплових трубах

Література [5,].

ТЕМА 16. Теплонасосні установки

Використання теплових насосів як низькопотенційних джерел теплоти.

Питання для самоперевірки

1. Цикли теплових насосів
2. Що таке і коефіцієнт трансформації теплоти
3. Навести та охарактеризувати схему підвищення температурного рівня теплоти системи охолодження за допомогою компресорного теплового насоса
4. Навести принципові схеми теплових насосів.

Література [5].

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Шелудченко В.І. Технічна термодинаміка / В.І. Шелудченко, В.В. Кравцов, О.Г. Волкова. - Севастополь-Донецьк, 2003. – 326 с.
2. Ривкин С.Л. Теплофизические свойства воды и водяного пара / С.Л. Ривкин, А.А. Александров. – М.: Энергия, 1980. – 424 с.
3. Основи тепло та масопереносу в промисловій теплотехніці : навч. посіб. / С.І. Гінкул, В.І. Шелудченко, В.В. Кравцов, С.В. Палкіна. – Донецьк: СОВ “Норд Комп’ютер”, 2005. – 284 с.
4. Парахін Н.Ф. Топочні процеси та пристрої : навч. посіб. / Н.Ф. Парахін, В.І. Шелудченко, В.В. Кравцов. – Севастополь «Вебер», 2003 – 181 с.
5. Парогенераторы : учеб. для вузов / А.П. Ковалев, Н.С. Лелеев, Т.В. Виленский; под общ. ред. А.П. Ковалева. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 376 с.

ДОДАТОК А

ПРИКЛАД ОФОРМЛЕННЯ ТИТУЛЬНОГО ЛИСТА

ДВНЗ «Донецький національний технічний університет»
Факультет комп'ютерно- інтегрованих технологій, автоматизації,
електроінженерії та радіоелектроніки
Кафедра електричної інженерії

ІНДИВІДУАЛЬНА РОБОТА

з дисципліни **ТЕПЛОТЕХНІКА ТА ТЕПЛОТЕХНІЧНІ ПРОЦЕСИ В
ТЕХНІЧНИХ СИСТЕМАХ**

Виконав: студент **3** курсу, групи **ПРМ-7** варіант **184782**
(шифр групи)

напряму підготовки (спеціальності) **144 теплоенергетика**.
(шифр і назва напряму підготовки, спеціальності)

ІВАНОВ ІВАН ІВАНОВИЧ
(прізвище та ініціали) (підпис)

Видав _____.
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали) (підпис)

Покровськ–2020 р.

ВИХІДНІ ДАНІ ДО ЗАВДАННЯ № 1

1 РОЗРАХУНОК ТЕРМОДИНАМІЧНИХ ПРОЦЕСІВ СУМІШІ ІДЕАЛЬНИХ ГАЗІВ

Суміш, що складається з m_1 кг азоту і m_2 кг водню, маючи початкові параметри – тиск $P_1 = 5$ МПа і температуру $t_1 = 27^\circ\text{C}$, розширюється при постійному тиску до об'єму $V_2 = a \cdot V_1$; потім суміш розширюється в процесі $PV^k = \text{const}$ до об'єму $V_3 = b \cdot V_2$. Визначити газову постійну суміші, її початковий об'єм V_1 , густину при нормальних умовах, параметри суміші в станах 2 і 3, зміну внутрішньої енергії, ентальпії, ентропії, тепло і роботу розширення в процесах 1-2 і 2-3. Показати процеси в PV – і TS – діаграмах. Врахувати залежність теплоємності від температури. Результати розрахунку виписати на окрему сторінку у кінці даної частини.

Вихідні дані надані у таблиці Б1.

Таблиця Б1 – Вихідні дані до частини 1 ДЗ № 1

Остання цифра шифра	m_1 , кг	m_2 , кг	$a = V_2/V_1$	Перед- остання цифра шифра	k	$b = V_3/V_2$
0	2	18	3,5	0	1,2	20
1	3	17	4	1	1,25	11
2	4	16	4,5	2	1,3	7
3	5	15	5	3	1,35	5,5
4	6	14	5,5	4	1,45	3,8
5	7	13	5	5	1,5	3,3
6	8	12	4,5	6	1,45	3,8
7	9	11	4	7	1,35	5,5
8	10	10	3,5	8	1,3	7
9	11	9	3	9	1,25	11

2 РОЗРАХУНОК ЦИКЛІВ ПАРОСИЛОВИХ УСТАНОВОК

Водяна пара з початковим тиском 5 МПа і ступенем сухості 0,9 надходить у пароперегрівач, де його температура підвищується на Δt , потім дроселюється до тиску P_3 , з яким пара надходить до парової турбіни, де розширюється до тиску P_4 .

Визначити:

- параметри всіх станів; кількість тепла, що підведена до пари у пароперегрівачу;
- зміну внутрішньої енергії в процесі дроселювання;
- роботу розширення пари;
- термічний ККД циклу Ренкіна (без обліку роботи насоса);
- питому витрату пари, кг/(кВт·год.).

Визначити роботу турбіни та кінцеву ступінь сухості, якщо пара не дроселюється до тиску P_3 . Проаналізувати вплив процесу дроселювання та зробити висновки.

Задачу вирішити за допомогою таблиць водяної пари [2]. Усі процеси зобразити на ксерокопії h -діаграми (Додаток К). У текстовій частині представити схему паросилової установки, що працює за циклом Ренкіна, а також p - v , T - s – діаграми циклу.

Вихідні дані надані у таблиці Б2.

Таблиця Б2 – Вихідні дані до частини 2 ДЗ № 1

Остання цифра шифра	Δt , °C	Передостання цифра шифра	P_3 , МПа	P_4 , кПа
1	2	3	4	5
0	200	0	2,5	3,5
1	210	1	2,0	4,0
1	2	3	4	5
2	220	2	1,5	4,5
3	230	3	1,0	3,5
4	240	4	2,3	4,5
5	250	5	1,8	4,0
6	260	6	2,4	4,5
7	270	7	1,9	3,5
8	280	8	1,2	4,0
9	290	9	1,6	3,5

3 РОЗРАХУНОК ЦИКЛІВ ХОЛОДИЛЬНИХ УСТАНОВОК

Пара фреона-12 при температурі t_1 надходить у компресор, де ізоентропно стискується до тиску, при котрому його температура стає рівної t_2 , а сухість пари $x_2=1$. З компресора фреон надходить у конденсатор, де при постійному тиску звертається в рідину, після чого розширюється в дроселі до температури $t_4=t_1$. Визначити холодильний коефіцієнт установки; масову витрату фреону, а також теоретичну потужність приводу компресора, якщо холодопродуктивність установки Q . Зобразити схему установки і її цикл у TS – координатах.

Вихідні дані надані у таблиці БЗ.

Таблиця БЗ – Вихідні дані до частини 3 ДЗ № 1

Остання цифра шифра	$t_1, ^\circ\text{C}$	$t_2, ^\circ\text{C}$	Передостання цифра шифра	$Q, \text{кВт}$
0	-15	10	0	270
1	-10	20	1	240
2	-15	25	2	130
3	-20	20	3	280
4	-20	15	4	300
5	-20	30	5	260
6	-15	15	6	190
7	-10	15	7	170
8	-15	20	8	200
9	-20	25	9	150

4 Розрахунок циклів ГАЗОВИХ установок

Початкові параметри повітря, що надходить у компресор газотурбінної установки (ГТУ) зі спаленням палива при $P=\text{const}$, $P_1=0,1$ МПа і $t_1, ^\circ\text{C}$. Ступінь підвищення тиску в компресорі β . У компресорі робиться адіабатний стиск повітря. Температура газів перед турбіною t_3 . Витрата повітря через компресор G .

Визначити параметри всіх крапок ідеального циклу ГТУ; підведене і відведене тепло; термічний ККД ГТУ; роботу циклу; теоретичні потужності турбіни, компресора і всієї ГТУ; параметри всіх крапок дійсного циклу (з обліком необоротності процесів розширення і стиску в турбіні і компресорі), прийнявши внутрішні відносні ККД турбіни η_{oi}^T і компресора η_{oi}^K . Визначити також внутрішній ККД ГТУ і дійсні потужності турбіни, компресора і всієї ГТУ. Представити відкриту схему ГТУ та обидва цикли в TS-координатах. Теплоємність повітря прийняти постійною і рівною $c_p=1,005$ кДж/(кг·К).

Вихідні дані надані у таблиці Б4.

Таблиця Б4 – Вихідні дані до частини 4 ДЗ № 1

Остання цифра шифра	$t_1, ^\circ\text{C}$	$t_3, ^\circ\text{C}$	β	Перед- остання цифра шифра	η_{oi}^K	η_{oi}^T	$G, \text{кг/с}$
0	30	850	7,2	0	0,76	0,85	35
1	27	830	9,0	1	0,77	0,83	38
2	24	880	8,8	2	0,78	0,86	40
3	20	870	8,5	3	0,79	0,82	42
4	17	860	8,2	4	0,80	0,84	45
5	14	840	8,0	5	0,81	0,86	48
6	12	820	7,5	6	0,82	0,87	50
7	10	800	7,0	7	0,79	0,85	52
8	7	780	6,5	8	0,81	0,88	55
9	5	760	6,2	9	0,82	0,89	57

ВИХІДНІ ДАНІ ДО ЗАВДАННЯ № 2

1 СТАЦІОНАРНА ТЕПЛОПРОВІДНІСТЬ. РОЗРАХУНОК ТЕПЛОПЕРЕДАЧІ ЧЕРЕЗ
БАГАТОШАРОВУ ПЛОСКУ СТІНКУ

Тепло димових газів передається через стінку котла киплячій воді. Приймаючи температуру газів t_r , води t_b , коефіцієнт тепловіддачі газами стінці α_1 і від стінки воді α_2 і вважаючи стінку плоскою, потрібно:

1. Підрахувати термічний опір R , коефіцієнти теплопередачі і кількість переданого тепла від газів до води через 1 м^2 стінки за 1 сек для наступних випадків:

Вихідні дані надані у таблиці В1.

Таблиця В1 – Вихідні дані до частини 1 ДЗ № 2

Остання цифра шифра	$t_r, ^\circ\text{C}$	$t_b, ^\circ\text{C}$	$\alpha_1,$ $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$	Перед- остання цифра шифра	$\alpha_2,$ $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$	$S_1,$ мм	$S_2,$ мм	$S_3,$ мм
1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	1250	220	160	0	3500	1	65	3
1	1200	210	150	1	3000	2	60	4
2	1150	200	140	2	2500	3	55	5
3	1000	190	130	3	2000	4	50	6
4	950	180	120	4	1900	5	45	7
5	900	170	110	5	1800	6	40	8
6	850	160	100	6	1700	7	35	9
7	800	150	90	7	1600	8	30	10
8	750	140	80	8	1500	9	25	11
9	700	130	70	9	1400	10	20	12

а) стінка сталева, зовсім чиста, товщиною S_2 , $\lambda_2=50 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$;

б) стінка мідна, зовсім чиста, товщиною S_2 , $\lambda_2'=350 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$;

в) стінка сталева, з боку води покрита шаром накипу товщиною S_3 , $\lambda_3=2 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$;

г) випадок “в”, але поверх накипу мається шар олії товщиною $S_4=1 \text{ мм}$, $\lambda_4=0,1 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$;

д) випадок “г”, але з боку газів стінка покрита шаром сажі товщиною S_1 , $\lambda_1=0,2 \text{ Вт/(м·К)}$.

2. Приймаючи кількість тепла для випадку “а” за 100 %, підрахувати у відсотках тепло для всіх інших випадків.

3. Визначити аналітично температури всіх шарів стінки випадку “д”.

4. Перевірити підраховані температури графічно, тобто побудувати у масштабі графік залежності $t=f(R)$ (на міліметровому папері формату А4).

5. Побудувати для випадку “д” лінію спаду температури в стінці $t=f(S)$ у масштабі (на міліметровому папері формату А4).

2 НЕСТАЦІОНАРНА ТЕПЛОПРОВІДНІСТЬ. РОЗРАХУНОК ДИНАМІКИ НАГРІВУ (ОХОЛОДЖЕННЯ) ТІЛА ПРИ ГРАНИЧНИХ УМОВАХ ІІІ РОДУ

Сталева заготовка у формі плити чи циліндра товщиною $2r_0$, мм, з початковою температурою t_n , °С, симетрично нагрівається до кінцевої температури t_k , °С, у печі з постійною температурою $t_{\text{печ}}$, °С, або проохолоджується на повітрі з температурою t_b , °С. Теплоємність сталі C , кДж/(кг·К), густина $\rho = 7800$ кг/м³, коефіцієнт теплопровідності $\lambda=35$ Вт/(м·К), коефіцієнт тепловіддачі α , Вт/(м²·К).

Визначити:

1. Термічну масивність тіла.
2. Час нагрівання (охолодження) заготовки.
3. Розрахувати і побудувати на міліметровому папері формату А4 температурну і теплову діаграми, а також розподіл температури по перетині тіла.
4. Час нагрівання по методу теплової діаграми.
5. Погрішність розрахунку τ по п. 2 і по п. 4.

Вихідні дані надані у таблиці В2.

Таблиця В2 – Вихідні дані до частини 2 ДЗ № 2

Остання цифра шифра	Форма тіла	Товщина, діаметр, мм, $2r_0$	Коефіцієнт тепло віддачі, α , Вт/(м ² ·К)	Температура тіла у кінці нагріву (охолодження), t_k , °С	Температура печі, $t_{\text{печ}}$ або повітря t_b , °С	Передостання цифра шифра	Початкова температура тіла t_n , °С	Теплоємність сталі C , кДж/(кг·К)
0	плита	80	20	1200	1300	0	700	0,5
1	циліндр	90	25	10	0	1	950	0,51
2	плита	100	30	1150	1250	2	650	0,52
3	циліндр	120	35	15	5	3	850	0,53
4	плита	140	40	1100	1200	4	600	0,54
5	циліндр	160	45	20	10	5	750	0,55
6	плита	180	50	1050	1150	6	550	0,56
7	циліндр	200	55	25	15	7	650	0,57
8	плита	250	60	1000	1100	8	500	0,58
9	циліндр	275	60	30	20	9	550	0,59

3 РОЗРАХУНОК СПАЛЕННЯ ПАЛИВА

Розрахувати дійсно необхідну кількість повітря L_d з коефіцієнтом витрати α , об'єм та склад продуктів згоряння V_d при спалюванні вологого газу наступного складу, %: CH_4 , H_2 , O_2 , N_2 , CO , CO_2 , H_2O , H_2S у сухому повітрі наступного складу, %: O_2^B , N_2^B . Розрахувати матеріальний баланс процесу спалення палива.

Вихідні дані надані у таблиці В3.

Таблиця В3 – Вихідні дані до частини 3 ДЗ № 2

Остання цифра цифра	Склад палива, %					Склад сухого повітря, %		Коефіцієнт витрати повітря α	Передостання цифра цифра	Склад палива, %		
	CH_4	H_2	O_2	CO	H_2S	N_2^B	O_2^B			CO_2	H_2O	N_2
0	85	0	0	0	5	70	30	1,01	0	0	5	5
1	80	5	5	0	0	71	29	1,03	1	5	0	5
2	75	5	0	5	5	72	28	1,05	2	5	5	0
3	70	10	5	5	0	73	27	1,07	3	0	5	5
4	65	10	0	10	5	74	26	1,09	4	5	0	5
5	60	5	5	20	0	75	25	1,11	5	5	5	0
6	55	15	0	15	5	76	24	1,13	6	0	5	5
7	50	30	5	5	0	77	23	1,15	7	5	0	5
8	45	20	0	20	5	78	22	1,17	8	5	5	0
9	40	15	5	30	0	79	21	1,19	9	0	5	5

ДОДАТОК Г

ЗНАЧЕННЯ ГАЗОВОЇ ПОСТІЙНОЇ ТА ТЕПЛОЄМКОСТІ ДЛЯ РІЗНИХ
РЕЧОВИН

Речовина	Хіміч- на форму ла	Молеку- лярна маса, μ кг/кмоль	Газова постійна, R, Дж/(кг·К)	Теплоємність при $p \rightarrow 0$ и $t = 0^\circ\text{C}$				k= c_p / c_v
				мольна, кДж/(кмоль·К)		масова, кДж/(кг·К)		
				μc_p	μc_v	c_p	c_v	
Водень	H ₂	2,016	4124,3	28,62	20,30	14,20	10,07	1,410
Гелій	He	4,003	2077,2	20,93	12,60	5,237	3,161	1,660
Метан	CH ₄	16,043	518,3	34,74	26,42	2,165	1,657	1,315
Аміак	NH ₃	17,031	488,2	35,00	26,67	2,056	1,566	1,313
Водяна пара	H ₂ O	18,016	461,5	-	-	-	-	-
Азот	N ₂	28,013	296,8	29,12	20,80	1,039	0,742	1,400
Окис вуглецю	CO	28,011	296,8	29,12	20,81	1,040	0,743	1,400
Повітря	-	28,97	287,0	29,07	20,76	1,004	0,716	1,401
Кисень	O ₂	32,000	259,8	29,27	20,96	0,915	0,655	1,397
Двоокис вуглецю	CO ₂	44,011	189,9	35,86	27,545	0,815	0,626	1,302

ДОДАТОК Д

СЕРЕДНІ МАСОВІ ІЗОХОРНІ ТЕПЛОЄМКОСТІ c_{9m} , кДж/(кг·К), В
ІНТЕРВАЛІ ТЕМПЕРАТУР ВІД 0 ДО Т

Таблиця Д1 – Середні масові ізохорні теплоємкості c_{9m} , кДж/(кг·К), в інтервалі температур від 0 до t [1, с. 314]

t, °C	O ₂	N ₂	H ₂	CO	CO ₂	H ₂ O	повітря
1	2	3	4	5	6	7	8
0	0,655	0,742	10,071	0,743	0,626	1,398	0,716
100	0,663	0,743	10,228	0,745	0,677	1,411	0,719
200	0,675	0,746	10,297	0,749	0,721	1,432	0,724
300	0,690	0,752	10,322	0,757	0,760	1,457	0,732
400	0,705	0,760	10,353	0,767	0,794	1,486	0,742
500	0,719	0,769	10,384	0,778	0,824	1,516	0,752
600	0,733	0,779	10,417	0,789	0,851	1,547	0,762
700	0,745	0,790	10,463	0,801	0,875	1,580	0,773
800	0,756	0,800	10,517	0,812	0,896	1,614	0,784
900	0,766	0,811	10,581	0,823	0,916	1,648	0,794
1000	0,775	0,821	10,652	0,834	0,933	1,682	0,804
1100	0,783	0,830	10,727	0,843	0,950	1,716	0,813
1200	0,791	0,840	10,809	0,857	0,964	1,749	0,822
1300	0,798	0,848	10,899	0,861	0,977	1,782	0,829
1400	0,805	0,856	10,988	0,869	0,989	1,813	0,837
1500	0,811	0,863	11,077	0,876	1,001	1,843	0,844
1600	0,817	0,870	11,169	0,883	1,011	1,873	0,851
1700	0,823	0,877	11,258	0,889	1,020	1,902	0,857
1800	0,829	0,883	11,347	0,896	1,029	1,929	0,863
1900	0,834	0,889	11,437	0,901	1,037	1,955	0,869
2000	0,839	0,894	11,524	0,906	1,045	1,980	0,874
2100	0,844	0,900	11,611	0,912	1,052	2,005	0,879

<i>Продовження таблиці Д1</i>							
2200	0,849	0,905	11,694	0,916	1,058	2,028	0,884
2300	0,854	0,909	11,798	0,921	1,064	2,050	0,889
2400	0,858	0,914	11,858	0,925	1,070	2,072	0,893
2500	0,863	0,918	11,937	0,929	1,075	2,093	0,897
2600	0,868	0,920	12,016	0,931	1,080	2,113	0,900
2700	0,872	0,923	12,091	0,934	1,084	2,132	0,903
2800	0,875	0,926	12,129	0,936	1,089	2,151	0,906
2900	0,878	0,929	12,181	0,939	1,093	2,168	0,908
3000	0,881	0,931	12,236	0,941	1,097		0,911

ДОДАТОК Е

СЕРЕДНІ МАСОВІ ІЗОБАРНІ ТЕПЛОЄМКОСТІ c_{pm} , КДЖ/(КГ·К), В
ІНТЕРВАЛІ ТЕМПЕРАТУР ВІД 0 ДО Т

Таблиця Е1 – Середні масові ізобарні теплоємності c_{pm} , кДж/(кг·К), в інтервалі температур від 0 до t [1, с. 313]

t, °C	O ₂	N ₂	H ₂	CO	CO ₂	H ₂ O	повітря
1	2	3	4	5	6	7	8
0	0,915	1,039	14,195	1,040	0,815	1,859	1,004
100	0,923	1,040	14,353	1,042	0,866	1,873	1,006
200	0,935	1,044	14,421	1,046	0,910	1,894	1,012
300	0,950	1,049	14,446	1,054	0,949	1,919	1,019
400	0,965	1,057	14,477	1,063	0,983	1,948	1,028
500	0,979	1,066	14,509	1,075	1,013	1,978	1,039
600	0,993	1,076	14,542	1,086	1,040	2,009	1,050
700	1,005	1,087	14,587	1,098	1,064	2,042	1,060
800	1,016	1,097	14,641	1,109	1,085	2,075	1,071
900	1,026	1,108	14,706	1,120	1,104	2,110	1,082
1000	1,035	1,118	14,776	1,130	1,122	2,144	1,091
1100	1,043	1,127	14,853	1,140	1,138	2,177	1,100
1200	1,051	1,136	14,934	1,149	1,153	2,211	1,108
1300	1,058	1,145	15,023	1,158	1,166	2,243	1,117
1400	1,065	1,153	15,113	1,166	1,178	2,274	1,124
1500	1,071	1,160	15,202	1,173	1,190	2,305	1,131
1600	1,077	1,163	15,294	1,180	1,200	2,335	1,138
1700	1,083	1,174	15,383	1,186	1,209	2,363	1,144
1800	1,089	1,180	15,472	1,192	1,218	2,391	1,150
1900	1,094	1,186	15,561	1,198	1,226	2,417	1,156
2000	1,099	1,191	15,649	1,203	1,233	2,442	1,161

Продовження таблиці Е1

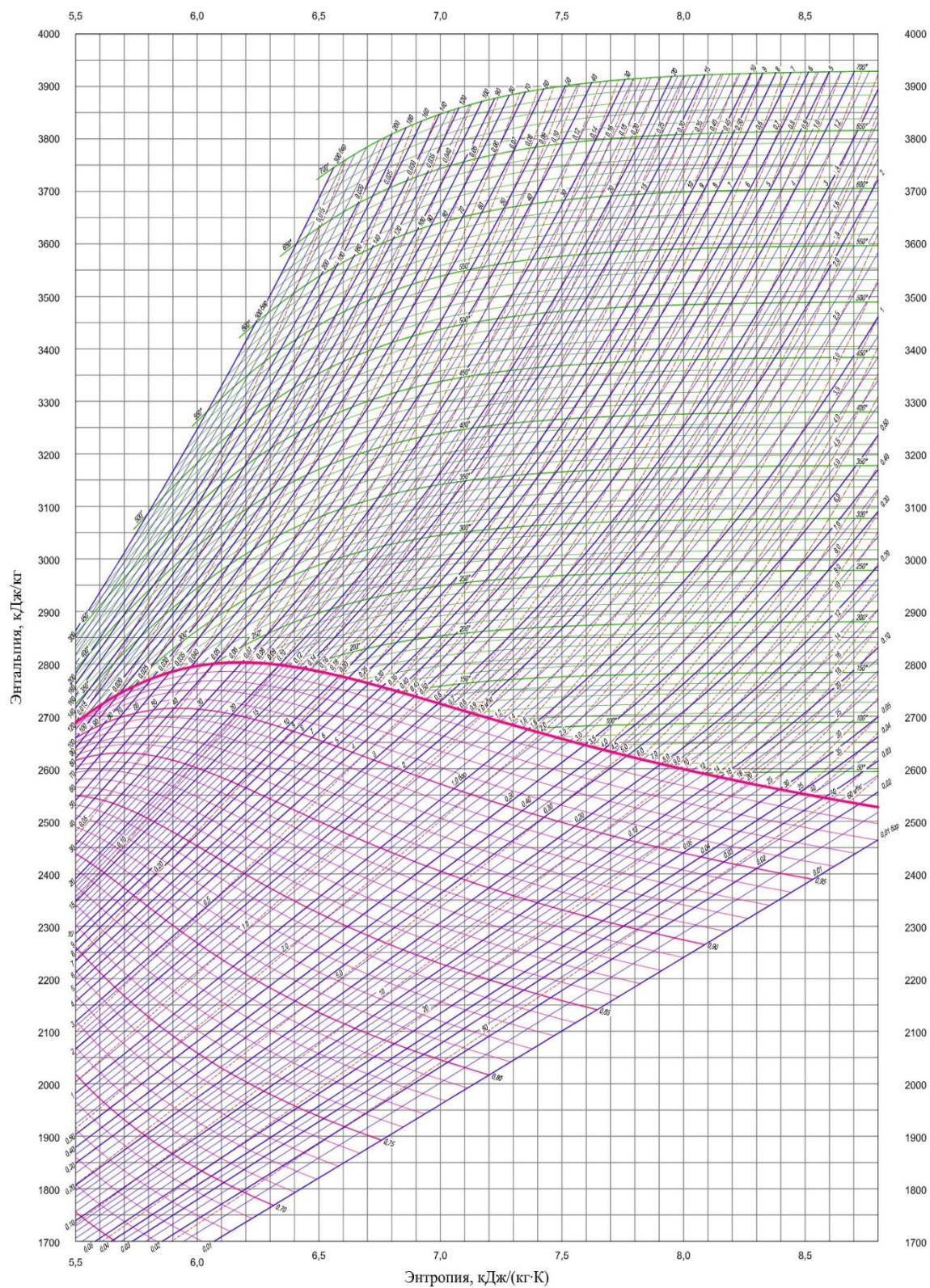
2100	1,104	1,197	15,736	1,208	1,240	2,466	1,166
2200	1,109	1,201	15,819	1,213	1,247	2,490	1,171
2300	1,114	1,206	15,902	1,218	1,253	2,512	1,176
2400	1,118	1,210	15,983	1,222	1,259	2,533	1,180
2500	1,123	1,214	16,064	1,226	1,264	2,554	1,185
2600	1,127	1,216	16,141	1,231	1,271	2,574	1,189
2700	1,131	1,222	16,215	1,235	1,275	2,594	1,193
2800	1,135	1,226	16,291	1,238	1,284	2,612	1,197
2900	1,139	1,231	16,360	1,242	1,288	2,630	1,201
3000	1,143	1,235	16,441	1,245	1,292		1,206

НАСИЧЕНА ПАРА ФРЕОНУ-12 (CCl_2F_2)

Таблица Ж1 – Насичена пара фреону-12

t,°C	P, МПа	v', дм³/кг	v'', м³/кг	h'	h''	r	s'	s''
				кДж/кг			кДж/кг·К	
-20	0,1510	0,6868	0,11070	400,5	564,0	163,5	4,1183	4,7645
-15	0,1826	0,6940	0,09268	405,0	566,4	161,4	4,1356	4,7613
-10	0,2191	0,7018	0,07813	409,5	568,9	159,4	4,1528	4,7586
-5	0,2609	0,7092	0,06635	414,0	571,2	157,2	4,1698	4,7561
0	0,3086	0,7173	0,05667	418,7	573,6	154,9	4,1868	4,7539
5	0,3624	0,7257	0,04863	423,4	575,9	152,5	4,2036	4,7519
10	0,4230	0,7342	0,04204	428,1	578,1	150,0	4,2204	4,7501
15	0,4911	0,7435	0,03648	433,0	580,3	147,3	4,2371	4,7484
20	0,5667	0,7524	0,03175	437,9	582,5	144,6	4,2537	4,7469
25	0,6508	0,7628	0,02773	442,8	584,5	141,7	4,2702	4,7455
30	0,7434	0,7734	0,02433	447,9	586,5	138,6	4,2867	4,7441
35	0,8460	0,7849	0,02136	452,9	588,3	135,4	4,3031	4,7425
40	0,9582	0,7968	0,01882	458,1	590,1	132,0	4,3194	4,7410

hs – ДІАГРАМА ВОДЯНОЇ ПАРИ



ДОДАТОК Л

ТЕРМОДИНАМІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ВОДИ ТА ВОДЯНОЇ ПАРИ У СТАНІ
НАСИЧЕННЯ (ПО ТИСКАХ) [2, ТАБЛИЦЯ II-II]

P Па	t °C	ρ' м³/кг	ρ'' м³/кг	h' кДж/кг	h'' кДж/кг	r кДж/кг	s' кДж/кг·К	s'' кДж/кг·К
$3,5 \cdot 10^3$	26,692	0,0010033	39,480	111,84	2549,9	2438,1	0,3907	8,5224
$4,0 \cdot 10^3$	28,981	0,0010040	34,803	121,41	2554,1	2432,7	0,4224	8,0523
$4,5 \cdot 10^3$	31,034	0,0010046	31,142	129,98	2557,8	2427,8	0,4507	8,4327

ДОДАТОК М

ТЕРМОДИНАМІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ВОДИ ТА ПЕРЕГРЕТОЇ ПАРИ [2,
ТАБЛИЦЯ II-III]

P=1,00 МПа				P=1,20 МПа			P=1,50 МПа		
t	ρ	h	s	ρ	h	s	ρ	h	s
°C	м³/кг	кДж/кг	кДж/кг·К	м³/кг	кДж/кг	кДж/кг·К	м³/кг	кДж/кг	кДж/кг·К
440	0,3256	3349,3	7,5890	0,2708	3346,6	7,5021	0,2159	3342,6	7,3949
445	0,3280	3360,0	7,6040	0,2728	3357,3	7,5171	0,2175	3353,4	7,4100
450	0,3304	3370,7	7,6188	0,2748	3368,1	7,5320	0,2191	3364,2	7,4250
460	0,3351	3392,1	7,6482	0,2787	3389,6	7,5616	0,2223	3385,9	7,4548
470	0,3399	3413,6	7,6773	0,2827	3411,2	7,5908	0,2255	3407,6	7,4842
480	0,3446	3435,1	7,7061	0,2867	3432,8	7,6197	0,2287	3429,3	7,5132
490	0,3493	3456,7	7,7345	0,2906	3454,4	7,6482	0,2319	3451,1	7,5420
500	0,3540	3478,3	7,7627	0,2946	3476,1	7,6765	0,2351	3472,9	7,5703
510	0,3588	3500,0	7,7905	0,2985	3497,9	7,7044	0,2383	3494,7	7,5984
520	0,3635	3521,7	7,8181	0,3025	3519,7	7,7320	0,2414	3516,6	7,6262
530	0,3682	3543,5	7,8454	0,3064	3541,5	7,7594	0,2446	3538,6	7,6537
540	0,3729	3565,3	7,8724	0,3103	3563,4	7,7865	0,2478	3560,5	7,6809
550	0,3776	3587,2	7,8991	0,3142	3585,3	7,8133	0,2509	3582,5	7,7078
560	0,3823	3609,1	7,9256	0,3182	3607,3	7,8399	0,2541	3604,6	7,7345
570	0,3870	3631,1	7,9519	0,3221	3629,4	7,8662	0,2572	3626,8	7,7609

Методичні вказівки для виконання
індивідуальної та самостійної роботи

з дисципліни ««Теплотехнічні процеси в технічних системах» та
«Теплотехнічні процеси та установки»

для студентів денної та заочної форм навчання технічних
спеціальностей.

Комп'ютерний набір і верстка: Любименко Олена Миколаївна

Укладачі: Любименко О.М., доц., к.ф.-м.н., доц

Донецький національний технічний університет
83502, м. Покровськ, вул. Шибанкова, 2.

Покровськ
2020