

Міністерство освіти і науки України
Національний університет водного господарства та
природокористування
Кафедра гідроенергетики, теплоенергетики та гідравлічних машин

01-06-68М

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

до виконання практичних робіт з навчальної дисципліни
«Вступ до спеціальності»
для здобувачів вищої освіти першого (бакалаврського) рівня
за освітньо-професійною програмою «Теплоенергетика»
спеціальності 144 «Теплоенергетика» усіх форм навчання

Рекомендовано науково-методичною
радою з якості ННІЕАВГ
Протокол № 5 від 25 січня 2024 р.

Рівне – 2024

Методичні вказівки до виконання практичних робіт з навчальної дисципліни «Вступ до спеціальності» для здобувачів вищої освіти першого (бакалаврського) рівня за освітньо-професійною програмою «Теплоенергетика» спеціальності 144 «Теплоенергетика» усіх форм навчання. [Електронне видання] / Кочмарський В. З. – Рівне : НУВГП, 2024. – 53 с.

Укладач:

Кочмарський В. З., к.ф.-м.н., професор, професор кафедри гідроенергетики, теплоенергетики та гідравлічних машин.

Відповідальний за випуск: Рябенко О. А., д.т.н., професор, завідувач кафедри гідроенергетики, теплоенергетики і гідравлічних машин.

Керівник групи забезпечення спеціальності
144 «Теплоенергетика»

Костюк О. П

© В. З. Кочмарський, 2024
© НУВГП, 2024

ВСТУП

Програмою спеціальності 144 «Теплоенергетика» передбачено вивчення: основ термодинаміки, основ гідро-газодинаміки, зокрема законів руху в'язких рідин, законів тепло-масообміну, променевого переносу енергії і процесів її перетворення, зокрема процесів перетворення та горіння палив. Вивчають принципи роботи та будову котельних установок, нагнітачів та теплових двигунів, а також теплообмінників, сушильних та холодильних апаратів і види та способи використання відновлюваних джерел енергії. Вивчаються системи контролю процесів перетворення енергії та засоби їх автоматизації. В курсі «Теплоенергетика» значна увага приділяється економічним питанням генерації та перетворення енергії, енергоменеджменту. Досліджуються основні фактори впливу теплоенергетики на довкілля.

Бакалавр спеціальності 144 «Теплоенергетика» повинен вміти:

Робити пошук потрібної інформації в ресурсах Університету та зовнішніх бібліотек в т.ч. через Інтернет. Виконувати аналіз інформації з позиції застосовності до розв'язку конкретних завдань. Читати, складати і розраховувати принципові теплові схеми теплоенергетичного устаткування. Розраховувати термодинамічні процеси в основних елементах схем та їх енергетичні характеристики. Вибирати технологічні схеми та режими, що мінімізують затрати палива на генерацію тепла і електроенергії. Виконувати випробовування після ремонту та монтажу обладнання. Організовувати роботу за нормами безпечної експлуатації обладнання.

Таблиця 1. Теми практичних занять

№ п/п	Теми занять	Кількість годин	
		ДФН	ЗФН
1	Інструктаж з охорони праці. Тема 1. Процеси з ідеальним газом. Перший та другий закони термодинаміки та перетворення енергії.	2	1
2	Тема 2. Динаміка і кінематика ідеальної та в'язкої рідин.	2	-
3	Тема 3. Основи тепло-масообміну. Теплопровідність. Конвективний теплообмін. Теплове випромінювання.	2	-
4	Тема 4. Склад палива. Теплота згорання. Газогенерація. Енергія сонця, вітру та землі.	2	1
5	Тема 5. Теплоенергетичні установки: котли, теплообмінники, теплові двигуни.	2	1
6	Тема 6. Теплопостачання від ТЕЦ та ТЕС.	2	-
7	Тема 7. Енергозбереження в енергетиці. Енергоменеджмент.	2	1
8	Тема 8. Проблема та способи зменшення техногенного навантаження теплоенергетики на довкілля.	2	-
Всього		16	5

2. Самостійна робота

З 60 годин, що виділяються на самостійну роботу ДФН 30 год. планується на вивчення і оформлення відповідей на контрольні питання до кожної лекції; 10 год. на оформлення звітів з виконання практичних робіт; 20 год. на самостійне вивчення тем за списком табл. 2.

Для ЗФН із 85 год. для самостійної роботи: 25 год. на оформлення звітів до практичних робіт; 60 год. на вивчення тем за списком табл. 2.

Таблиця 2.

Теми для самостійного вивчення.

№ п/п	Теми занять	Кількість годин, ДФН	Кількість годин, ЗФН
1	Освітньо-кваліфікаційні рівень бакалавра. Навчальний план спеціальності. Організація навчального процесу рівня «бакалавр».	2	6
2	Процеси з ідеальним газом. Перше та друге начала (закони) термодинаміки. Обмеження на природні процеси, що ними накладаються. Теплові машини та їх ККД.	2	6
3	Гідростатика, закон Паскаля. Кінематика і динаміка газів та рідин. Рівняння Бернуллі для в'язкої рідини. Гідравлічні опори.	2	6
4	Конвективний та променевий теплообмін. Закони теплового випромінювання.	2	6
5	Склад палива. Теплота згорання. Газогенерація. Енергія сонця, вітру та землі.	2	6
6	Нагнітачі та двигуни. Класифікація нагнітачів, їх характеристика та робоча точка.	2	6
7	Парові та водогрійні котельні. ТЕЦ та ТЕС. Теплові мережі.	2	6
8	Енергетичний менеджмент і аудит. Аналіз ефективності енергетичного обладнання. Енергозбереження та використання вторинних енергоресурсів.	2	6
9	Техногенне навантаження теплоенергетики на довкілля. Способи зменшення такого навантаження. Основні засоби протидії забрудненню геосфери, атмосфери та води.	2	6
Всього		18	54

Оформлення звіту про самостійну роботу

Підсумком самостійної роботи вивчення дисципліни є складання письмового звіту за темами, вказаними у таблиці.

Загальний обсяг звіту визначається з розрахунку 1,5 сторінки на 1 год. самостійної роботи. Звіт включає план, основну частину, висновки та список

літератури. Оформлюється на стандартному папері формату А4 (210 x 297). Поля: верхнє, нижнє та лівє - 20 мм, правє - 10 мм. Звіт має бути друкованим і виконується українською мовою.

Захист звіту з самостійної роботи відбувається у терміни погоджені студентом і викладачем.

ТЕМА 1. ПРОЦЕСИ З ІДЕАЛЬНИМ ГАЗОМ. ПЕРШИЙ ТА ДРУГИЙ ЗАКОНИ ТЕРМОДИНАМІКИ. ПЕРЕТВОРЕННЯ ЕНЕРГІЇ.

1. Процеси з ідеальним газом

Найпростішою термодинамічною системою є «ідеальний газ» - сукупність невзаємодіючих матеріальних точок, що знаходяться в стані хаотичного (теплого) руху в об'ємі V , м³. Стан такого газу характеризується трьома термічними параметрами (температурою T -°К, об'ємом V -м³ та тиском P -Па) та трьома калоричними параметрами (внутрішньою енергією U -Дж, ентропією S -Дж/К та ентальпією H -Дж). Зв'язок між термічними параметрами дається рівнянням стану газу Клапейрона-Менделєва

$$P \cdot V = (m/\mu) \cdot R, \quad (1)$$

m – маса газу; μ – мольна маса (для повітря 29 г/моль); R – універсальна газова стала (8.314Дж/(моль · К)).

Приклад 1.1. Визначити питомий об'єм і густину повітря, якщо його маса 88кг займає об'єм 73м³.

Розв'язання

Визначаємо питомий об'єм повітря – тобто об'єм одиниці маси (кг) речовини,

$$v = V / m = 73/88 = 0,830 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Визначимо густину повітря,

$$\rho = 1/v = m / V = 88/73 = 1,205 \text{ кг/м}^3.$$

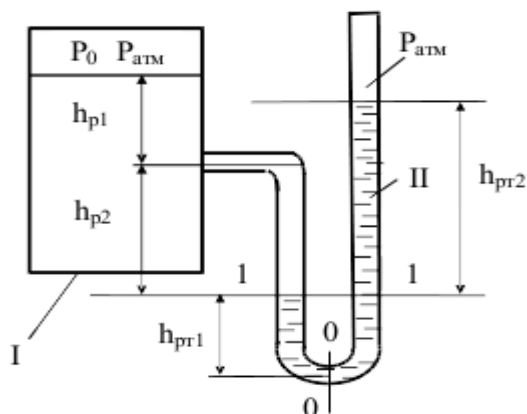


Рис. 1. До прикладу 1. 2.

Відповідь. Питомий об'єм газу 0,830 м³/кг; густина повітря 1,205 кг/м³.

Приклад 1.2. Посудина I заповнена водою (рис.1). Диференційний манометр II - підключений до посудини I і залитий ртуттю, $\rho_{рт} = 13600\text{кг/м}^3$. З боку посудини в дифманометрі над ртуттю знаходиться вода густиною 1000кг/м^3 . В трубці, що контактує з атмосферою, над ртуттю – повітря. Дано: $h_{p1} = 1,0\text{м}$; $h_{p2} = 0,9\text{м}$; $h_{рт2} = 680\text{мм}$; барометричний тиск $B = 743\text{мм рт. ст.}$

Розрахувати абсолютний тиск P_0 над вільною поверхнею води в посудині I.

Розв'язання

Атмосферний тиск складає, Па,

$$P_{\text{атм}} = V \cdot 133,32 = 743 \cdot 133,32 = 99057 \text{ Па} .$$

В перерізі 0-0(зліва) абсолютний тиск дорівнює

$$P_{0-0} = P_0 + \rho_v \cdot g \cdot (h_{p1} + h_{p2}) + \rho_{рт} \cdot g \cdot h_{рт1} ,$$

а справа

$$P_{0-0} = P_{\text{атм}} + \rho_{рт} \cdot g \cdot h_{рт2} + \rho_{рт} \cdot g \cdot h_{рт1} .$$

Рідина знаходиться в спокої. Тиски P_{0-0} зліва і справа рівні між собою, отже

$$P_0 + \rho_v \cdot g \cdot (h_{p1} + h_{p2}) + \rho_{рт} \cdot g \cdot h_{рт1} = P_{\text{атм}} + \rho_{рт} \cdot g \cdot h_{рт1} + \rho_{рт} \cdot g \cdot h_{рт2}$$

або

$$P_0 + \rho_v \cdot g \cdot (h_{p1} + h_{p2}) = P_{\text{атм}} + \rho_{рт} \cdot g \cdot h_{рт2} .$$

З останнього виразу визначаємо тиск в посудині, Па,

$$\begin{aligned} P_0 &= P_{\text{атм}} + \rho_{рт} \cdot g \cdot h_{рт2} - \rho_v \cdot g \cdot (h_{p1} + h_{p2}) = \\ &= 99057 + 13600 \cdot 9,81 \cdot 0,68 - 1000 \cdot 9,81 \cdot (1,0 + 0,9) = 171141 . \end{aligned}$$

Відповідь. Тиск в посудині $P_0 = 171141$ Па.

1. Завдання для самостійної роботи

Завдання 1.1. Визначити питомий об'єм і густину повітря, якщо його маса m має об'єм V .

Таблиця 1.

Дані до завдання 1.1.

Номер у списку	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Маса повітря, m , кг	77,58	75,9	76,2	78,9	78,4	78,0	76,5	76,9	76,8	77,1
Остання цифра шифру	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Об'єм повітря, m^3	59,5	60,5	59,8	60	60,2	59,6	60,4	59,9	60,6	60,1

Завдання 1.2. Визначити абсолютний тиск газу в посудині, якщо показання ртутного манометра рівно P_m , а показання барометра P_6 . Обидва прилади знаходяться при температурі 0°C . Тиск виразити в барах.

Таблиця 2.

Дані до завдання 1.2.

Номер у списку	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Тиск P_m , мм рт. ст.	350	365	360	355	375	370	368	373	358	363
Остання цифра шифру ЗК	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Тиск P_6 , мм рт. ст.	759	750	745	758	753	760	747	751	748	752

2. Перший та другий закони термодинаміки. Робота і енергія. Закон збереження енергії

Згідно з законом збереження енергії вона не може бути ні створена, ні знищена, а може лише перетворюватись з одного виду в інший у різних фізичних, хімічних та технічних процесах.

Зауваження. Закон збереження енергії є наслідком однорідності часу, факту, який вказує на те, що хід годинників не залежить від конкретного часу коли його вимірюють, наприклад у 10 році н.е. чи 2000 р. н.е.

У термодинамічних процесах зміна стану робочих тіл відбувається внаслідок отримання від зовнішнього середовища, або, навпаки, віддачі йому **енергії у формі теплоти Q і роботи L.** В результаті цього енергія буде змінюватися на величину ΔE . Тоді, відповідно до закону збереження енергії, з врахуванням знаків теплоти і роботи (*при однаково спрямованих потоках теплоти і роботи знаки їх протилежні*) рівняння енергетичного балансу приймає вигляд

$$Q + (-L) = \Delta E, \text{ або } Q = \Delta E + L, \quad (2)$$

прийнято, що теплота надається тілу ($Q > 0$) і робота над ним виконується ($-L > 0$), або в диференціальній формі

$$\delta q = du + p dv, \quad (2a)$$

Записаний в такому вигляді закон збереження енергії у термодинамічному процесі називається **математичним виразом першого закону термодинаміки.** Перше начало(закон) термодинаміки формулюється так:

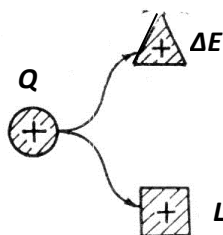


Рис.2. Схема розподілу тепла у ТДС.

у термодинамічному процесі підведена теплота до тіла (системи) витрачається на зміну його енергії і здійснення термодинамічною системою (ТДС) роботи проти зовнішніх сил, див. рис. 2.

Величини, які входять у рівняння першого закону термодинаміки (2) - внутрішня енергія, робота і кількість теплоти вимірюються в однакових одиницях і є еквівалентними, але за своїм змістом ці величини, **якісно різні.**

Еквівалентність теплоти і роботи полягає в тому, що ці обидві величини відображають зміну внутрішньої енергії в процесі (будь-якому), але стосуються різних умов такої зміни.

Енергія системи E є характеристикою стану. Звідси випливає, що зміна запасу енергії системи ΔE не залежить від виду процесу, а визначається лише різницею в кінцевому E_k та початковому E_n станах ($\Delta E = E_k - E_n$).

Коли з системи **відводиться енергія** ($E_n > E_k$), то запас енергії системи зменшується з часом ($\Delta E < 0$).

Як вже вказувалось, **внутрішня енергія** (частина енергії тіла, що не залежить від стану руху в будь-якій системі координат) представляє собою енергію накопичену робочим тілом (системою), - **запас енергії**, а **робота і теплота характеризує зміну енергії, яка передається робочому тілу або віднімається від нього в якому-небудь процесі**. Тому, **внутрішня енергія є функцією стану робочого тіла**, а робота і теплота ні бо залежать від виду процесу.

Закон збереження енергії має **дві форми запису**. Перша форма отримується з (2) врахувавши вираз для механічної роботи розширення

$$\delta l = pdv, \quad (3)$$

друга форма – виходячи із поняття **питомої ентальпії**

$$\mathbf{h} = \mathbf{u} + \mathbf{pv}, \text{ або } dh = d(u + pv) = du + pdv + vdp. \quad (4)$$

З врахуванням рівняння (4) отримуємо, що

$$dh = \delta q + vdp, \quad (4a)$$

звідки **друга форма аналітичного запису першого начала термодинаміки** прийме вигляд

$$\delta q = dh - vdp. \quad (5)$$

Якщо об'єднати рівняння (4) і (4a) з виразом для **рівноважного тепла** $\delta q = Tds$ то отримаємо

$$Tds = du + pdv = dh - vdp. \quad (6)$$

рівняння (6) називається **основним рівнянням термодинаміки, або термодинамічною тотожністю, для рівноважних процесів**.

Для **необоротних процесів**, зв'язаних, наприклад, з тертям або завихреннями (внутрішні необоротні процеси), рівняння першого закону термодинаміки **змінює вид**.

Як зазначалось вище, у **необоротних процесах ефективна питома робота завжди менша ніж в оборотних**

$$\delta l' = pdv - \delta l_{\text{тер}}, \quad (7)$$

при цьому **питома робота на подолання опору $\delta l_{\text{тер}}$ перетворюється у еквівалентну питому кількість** теплоти $\delta l_{\text{тер}} = \delta q_{\text{тер}}$.

Відповідно, рівняння першого закону термодинаміки для **необоротних процесів** приймає вигляд

$$\delta q + \delta q_{\text{тер}} = Tds > du + pdv = dh - vdp. \quad (8)$$

Вираз (8) називають **основною нерівністю термодинаміки**.

Приклад 2.1. В бачок з електронагрівником залито 15кг води з температурою 10°C. Визначити кінцеву температуру води в разі 12-хвилинної

роботи підігрівника, якщо сила струму 5А, а напруга 220В. Середню теплоємність води прийняти 4,19 кДж/(кг·К). Розсіюванням енергії в довкіллі знехтувати. Процес нагрівання вважати рівноважним.

Розв'язання

Теплота, що виділилась під час роботи підігрівника,

$$Q = I \cdot U \cdot \tau = 5 \cdot 220 \cdot (12 \cdot 60) \cdot 10^{-3} = 792 \text{кДж.}$$

Ця теплота затрачається на нагрівання води. Зміна температури води та затрачене тепло зв'язані залежністю

$$Q = m \cdot C \cdot (t_1 - t_2).$$

Звідси кінцева температура води, °С

$$t_2 = t_1 + \frac{Q}{G \cdot c} = 10 + \frac{792}{15 \cdot 4,19} = 22,6.$$

Відповідь. Кінцева температура води при рівноважному нагріванні рівна 22.6°С.

Приклад 2.2. В балоні ємністю 50л перебуває повітря з тиском 7,5м рт. ст. і температурою 40°С. Температура повітря зменшується на 20°С. Визначити відведену теплоту і кінцевий тиск повітря в балоні.

Розв'язання

Газова стала повітря, кДж/(кг·К)

$$R = R_{\mu} / \mu = 8.314 / 29 = 0.287 \text{кДж/(кг·К)} = 287 \text{ Дж/(кг·К)}.$$

Ізохорна теплоємність повітря (як ідеального газу), кДж/(кг·К) виражається

$$C_v = R / (k - 1) = 0.287 / (1.38 - 1) = 0.755,$$

k - відношення теплоємностей повітря при сталому тиску і об'ємі, $k = C_p / C_v = 1.38$ – стала Пуассона.

З рівняння Менделєєва визначаємо масу повітря в балоні, кг

$$P \cdot V = m \cdot R \cdot T \rightarrow m = P \cdot V / (R \cdot T) = (7.5 \cdot 10^3 \cdot 133.32) \cdot 50 \cdot 10^{-3} / [287 \cdot (273 + 40)] = 0.557.$$

Кінцевий тиск повітря, Па

$$P_2 = m \cdot \frac{RT_2}{V} = 0.557 \cdot \frac{287 \cdot (273 + 20)}{50 \cdot 10^{-3}} = 936.8 \text{кПа..}$$

Процес ізохорний і будемо його вважати рівноважним, тому зміна внутрішньої енергії рівна відведеній теплоті, кДж

$$Q = \Delta U = m \cdot C_v \cdot (t_1 - t_2) = 0.557 \cdot 0.757 \cdot (40 - 20) = 8.411.$$

Відповідь. Зміна внутрішньої енергії повітря в балоні рівна відведеній теплоті, тобто 8.41кДж.

Завдання для самостійної роботи

Завдання 2.1. 1 м^3 азоту з параметрами P_1 і ρ_1 виконує L_v роботу зміни об'єму, внаслідок чого його ентальпія зменшується на ΔH . Визначити теплоємність і теплоту процесу, зміну внутрішньої енергії та ентропії.

Таблиця 3.

Дані для розрахунку завдання 2.1.

Номер у списку	1	2	3	4	5	6	76	8	9	10
Робота L_v , кДж	120	110	140	130	125	150	145	135	128	142
Зміна ентальпії, кДж	60	65	80	75	70	82	62	68	71	78
Остання цифра шифру ЗК	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Тиск P_1 , МПа	1,25	1,15	1,05	1,1	1,2	1,125	1,115	1,11	1,18	1,22
Густина, ρ_1 , кг/м	4,5	4,1	4,3	4,4	4,2	4,15	4,25	4,28	4,45	4,56

Література

1. Степанов Д. В., Ткаченко С. Й. Теплоенергетика. Вступ до спеціальності. Вінниця : ВНТУ. 2011. 100 с.
2. Карпюк А. А., Підгайний Ю. Б., Карпюк Л. А. Вступ до спеціальності. Рівне : НУВГП. 2017. 103 с.

ТЕМА 2. ДИНАМІКА І КІНЕМАТИКА ІДЕАЛЬНОЇ ТА В'ЯЗКОЇ РІДИН.

1. Кінематика і динаміка ідеальної та в'язкої рідин

1.1. Класифікація рухів рідини

Часто зустрічаються процеси, при яких рідина або газ швидко рухаються. Розрізняють два види руху: *сталий і змінний*.

Сталим називається рух, при якому швидкості u , тиск P , глибини h не змінюються з часом τ , а залежать лише від положення точки в потоці рідини

$$u = f(x, y, z); v = f(x, y, z); w = f(x, y, z). \quad (1)$$

Сталий рух поділяють на *рівномірний*, при якому швидкості, тиски, глибини не змінюються по довжині потоку, і *нерівномірний(змінний)*. Наприклад, в конічній трубі по довжині змінюються поперечний переріз потоку і відповідно усі його характеристики. Отже, маємо *нерівномірний рух*.

Несталим(змінним) називається вид руху, при якому всі перераховані вище параметри є функцією не тільки координат, але і часу τ ,

$$u = f(x, y, z, \tau); w = f(x, y, z, \tau); w = f(x, y, z, \tau). \quad (2)$$

Напірним називають рух рідини в потоці без вільної поверхні, він звичайно спостерігається в закритих трубопроводах. При **напірному русі** рідина цілком заповнює поперечний переріз, який утворений твердими стінками.

Напірний рух відбувається в умовах різниці тисків вздовж потоку, створюваної, наприклад, насосом, водонапірною баштою та ін.

Безнапірним називається рух з вільною поверхнею, який здійснюється під дією ваги.

Живим перерізом називають поверхню в межах потоку рідини, що нормальна в кожній своїй точці до усередненої швидкості в цій точці.

Витрата повного потоку рідини дорівнює площі живого перерізу потоку ω , m^2 , помноженій на середню швидкість v , m/s і визначається у m^3/s

$$Q = v \cdot \omega . \quad (3)$$

Рівняння нерозривності для цілого потоку рідини показує, що добуток площі живого перерізу ω_i на швидкість v_i у будь-якому i -тому перерізі є величина стала. Тобто, витрата рідини у всіх перерізах потоку однакова

$$Q = v_i \cdot \omega_i = \text{const} \text{ або } Q = v_1 \cdot \omega_1 = v_2 \cdot \omega_2 = v_i \cdot \omega_i = \dots = v_n \cdot \omega_n . \quad (4)$$

Приклади

Приклад 1. Визначити масову витрату гарячої води в трубопроводі з внутрішнім діаметром $d_{\text{вн}} = 412\text{мм}$, якщо відомо, що середня швидкість води $v = 3\text{м/с}$, а густина $\rho_{\text{в}} = 917\text{кг/м}^3$.

Розв'язання

Об'ємна витрата води, що протікає через переріз трубопроводу визначається, m^3/s ,

$$Q = \omega \cdot v = \left(\frac{\pi d^2}{4}\right) \cdot v = \left(\frac{3,14 \cdot 0,412^2}{4}\right) \cdot 3 = 0,4.$$

Тоді масова витрата води, $кг/с$

$$M = Q \cdot \rho_{\text{в}} = 0,4 \cdot 917 = 336,8 .$$

Відповідь. Масова витрата води в трубопроводі $Q = 336,8 \text{ кг/с}$.

Завдання для самостійної роботи

Розв'язати приклад 3.1 за даними табл. 1.

Таблиця 1.

Дані до розрахунку завдання 1.

Номер у списку	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Швидкість w , m/s	0,5	0,75	1	1,25	1,5	1,75	2	2,25	2,5	2,75
Густина, $\rho_{\text{в}}$, $кг/м^3$	917	935	949	980	975	990	969	957	985	995
Діаметр, d , m	0,015	0,02	0,025	0,032	0,04	0,05	0,065	0,08	0,1	0,125

2. Рух в'язкої рідини

Ламінарний рух рідини відповідає струминному руху, коли частинки рідини рухаються паралельно (паралельними струминами). Ламінарний рух реалізується переважно при русі в'язких рідин: нафти, бітуму, мастил, мазуту, тощо.

При **турбулентному русі** спостерігається перемішування частинок, які рухаються хаотично одна щодо одної, наприклад, у водопровідних трубах. На практиці широке застосування для характеристики режимів руху рідини отримало число Рейнольдса

$$Re = v \cdot d / \nu, \quad (5)$$

де ν – коефіцієнт кінематичної в'язкості рідини, m^2/s .

Наприклад, в круглій трубі при $Re \leq 2300$ є **ламінарний режим**, при $2300 < Re \leq 4000 \dots 13600$ – **перехідний**, при $Re > 4000 \dots 13600$ – **турбулентний**.

3. Рівняння Бернуллі для потоку в'язкої рідини

Це рівняння було виведено для плавно змінного потоку в'язкої рідини, що може бути представленим у вигляді сукупності елементарних струмин. Просумувавши енергії всіх елементарних струмин, що складають потік, і втрат енергії для перерізів потоку 1-1 та 2-2, була отримана така формула

$$\rho g Z_1 + P_1 + \alpha_1 \cdot \frac{\rho V_1^2}{2} = \rho g Z_2 + P_2 + \alpha_2 \cdot \frac{\rho V_2^2}{2} + \rho g h_{\text{втр}}^{1-2} \quad (6)$$

У виразі (6) сума його членів є сумою трьох питомих енергій потоку в'язкої рідини у перерізах 1-1 і 2-2:

- $\rho g Z_1$ і $\rho g Z_2$ є питома потенціальна енергія положення у вибраній (будь-якій) системі координат;
- P_1 і P_2 – питома потенціальна енергія тиску потоку;
- $\alpha \cdot \rho V_{1,2}^2 / 2$ - питома кінетична енергія потоку.
- $\rho g h_{\text{втр}}^{1-2}$ - втрати питомої потенціальної енергії тиску внаслідок внутрішнього тертя в рідині.

Слово "питома" означає, що всі елементи рівняння віднесені до одиниці об'єму рідини. Коефіцієнти α_1 і α_2 враховують вплив нерівномірності розподілу швидкостей по живому перерізі потоку. У наближених розрахунках приймається: **для ламінарного режиму течії $\alpha = 2$, для турбулентного – $\alpha = 1$.**

Розв'язок задач з застосуванням рівняння Бернуллі слід починати з наведення розрахункової схеми, на якій обов'язково треба показати площину порівняння 0-0 (горизонтальна площина) (Horizontal plane), два перерізи 1-1 і 2-2, геометричні висоти Z_1 і Z_2 – тобто відповідні відстані від площини порівняння до центрів 1-го і 2-го перерізів.

4. Гідравлічні опори

При русі в'язкої рідини в результаті опору рухові сума трьох питомих енергій потоку зменшується. Це в рівнянні Бернуллі враховується членом $h_{\text{втр}}$ який визначає частину механічної енергії, яка переходить в теплову і розсіюється. Ця частина безповоротно втрачається.

Опори (Resistances) бувають двох видів.

1. Опори, що виявляються *рівномірно вздовж потоку*. Вони називаються *втратами напору по довжині* – h_l .

2. Опори, що виявляються в місцях різкої зміни конфігурації потоку. Втрати називаються *місцевими* – h_m .

Причиною опорів в обох випадках є в'язкість. Питома втрата енергії між двома перерізами h_w складається із питомих втрат енергії по довжині h_l і в місцевих опорах Σh_m

$$h_w = h_l + \Sigma h_m. \quad (7)$$

Розмірність питомих втрат енергії в даному випадку – в метрах рідинного стовпа. Це слід розуміти так. Енергія виражається в джоулях $\text{Дж} = \text{Н} \cdot \text{м}$. Віднесемо енергію до одиниці ваги (вимірюємо в Ньютонах), маємо $\text{Дж}/\text{Н} = \text{м}$.

4.1. Втрати напору по довжині шляху потоку

Втрати напору (питомої енергії) по довжині визначаються за формулою Дарсі

$$h_l = \lambda \cdot \frac{l}{d} \cdot \frac{v^2}{2 \cdot g} \quad (8)$$

де λ – коефіцієнт опору тертя, що у загальному випадку залежить від режиму руху рідини (числа Рейнольдса Re) і відносної шорсткості стінок каналу Δ/d , тобто $\lambda = f(Re, \Delta/d)$;

l , d – відповідно довжина каналу, характерний розмір живого перерізу каналу, наприклад, для круглої труби це геометричний діаметр, м;

v – середня швидкість на перерізі каналу, м/с;

g – прискорення земного тяжіння, м/с².

При виборі залежності для розрахунку λ потрібно визначити режим течії розрахувавши число Re , а також геометричні особливості каналів і матеріал, із якого вони виготовлені (метал, поліетилен, скло тощо).

При ламінарному режимі руху фіксується істотна нерівномірність розподілу швидкостей по живому перерізу. Біля стінки рідина прилипає до неї, при цьому швидкість руху в більшості випадків дорівнює нулю.

Перший шар, що рухається, буде ковзати по стінці, покритій прилиплими частинками, другий – по першому і т. д. При достатньому віддаленні від стінки швидкість руху збільшується і досягає максимуму на осі труби. При такій схемі руху тертя характеризується зчепленням частинок рідини, що знаходяться в двох

сусідніх шарах і рухаються з різними швидкостями. При ламінарному русі коефіцієнт тертя залежить від числа Re і визначається за формулою Пуазейля

$$\lambda = \frac{64}{Re}. \quad (9)$$

Отже, коефіцієнт λ прямо пропорційний в'язкості і не залежить від шорсткості стінок труби.

Наведені залежності можна застосовувати для стабілізованих ділянок потоку. Коефіцієнт тертя на початковій ділянці буде більший, ніж на іншій зі стабілізованою течією частині труби. **Якщо довжина труби $l > 0,05 \cdot Re \cdot d$, розрахунок втрат напору можна вести за формулою Пуазейля і не враховувати початкову ділянку.**

Механізм турбулентного руху набагато складніший, ніж ламінарного. При турбулентному русі частинки рідини рухаються хаотично, а швидкість у будь-якій точці весь час змінюється за величиною і за напрямком біля деякого середнього значення. Коефіцієнт опору розраховують за емпіричними формулами залежно від міри гідравлічної шорсткості труб.

Розрізняють три випадки

1. Випадок **гідравлічно гладких труб**: виступи і шорсткості покриті ламінарним підшаром і не порушується його цілісність. У цьому випадку шорсткість не впливає на гідравлічні втрати і коефіцієнт тертя залежить тільки від числа Рейнольдса $\lambda = f(Re)$.

2. Випадок **гідравлічно шорстких** (Hydraulic roughness) труб: виступи і шорсткості набагато вищі товщини ламінарного підшару. Відривне обтікання виступів приводить до втрат тертя при обтіканні тіл і коефіцієнт тертя від числа Рейнольдса не залежить $\lambda = f(\Delta/d)$.

3. **Перехідний випадок**: висота виступів шорсткості того ж порядку, що і товщина ламінарного підшару. У цьому випадку на гідравлічні втрати впливає як число Рейнольдса, так і величина виступів. Для розрахунків можна використати формулу Альтшуля,

$$\lambda = 0,11 \cdot \left(\frac{68}{Re} + \frac{\Delta}{d} \right)^{0,25}, \quad (10)$$

формулою Альтшуля можна користуватись як у випадку гладких так і шорстких труб. При малих значення Re , коли $68/Re \gg \Delta/d$, вона перетворюється у формулу,

$$\lambda = 0,11 \left(\frac{68}{Re} \right)^{0,25}, \quad (11)$$

а при великих значення Re , коли $68/Re \ll \Delta/d$, вона має вигляд формули Шифринсона

$$\lambda = 0,11 \left(\frac{\Delta}{d} \right)^{0,25}. \quad (12)$$

4.2. Місцеві втрати напору

Місцеві втрати напору в трубах і каналах обумовлені різними факторами: різка зміна конфігурації потоку, рух зі зміною швидкостей, злиття потоків. **Втрати енергії обумовлені появою вихрових зон, переформуванням структури потоку.**

Місцеві втрати напору переважно розраховують за формулою

$$h_m = \zeta \cdot V^2 / 2g. \quad (13)$$

Коефіцієнт місцевих втрат напору ζ визначають експериментально. Наводимо деякі значення коефіцієнтів опору для квадратичної області: пробковий кран $\zeta = 0,4 \dots 1,5$; вентиль – $\zeta = 2,5 \dots 6,0$; засувка, що повністю відкрита, – $\zeta = 0,17$; вхід з резервуара в трубу – $\zeta = 0,5$; вихід із труби в резервуар – $\zeta = 1$.

Приклад 2. В круглій трубі довжиною $L=50\text{м}$ і внутрішнім діаметром $d=51\text{мм}$ тече вода з витратою $0,6\text{кг/с}$. Густина води 998кг/м^3 , коефіцієнт кінематичної в'язкості $\nu = 1,01 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$. Труба сталева з шорсткістю $\Delta = 0,1\text{мм}$. На трубі встановлено дві засувки з опором $\zeta = 1$ кожна. Визначити загальні втрати тиску потоку.

Розв'язання

Швидкість води в трубі, м/с

$$V_B = 4G / (\rho_B \cdot \pi \cdot d^2) = 4 \cdot 0,6 / (998 \cdot 3,14 \cdot 0,051^2) = 0,294.$$

Число Рейнольдса за (13)

$$Re_B = V_B \cdot d / \nu = 0,294 \cdot 0,051 / 1,01 \cdot 10^{-6} = 14846.$$

тобто режим руху – турбулентний.

Коефіцієнт тертя вздовж труби за формулою Альтшуля

$$\lambda_1 = 0,11 \cdot \left(\frac{68}{Re} + \frac{\Delta}{d} \right)^{0,25} = 0,11 \cdot \left(\frac{68}{14846} + \frac{0,0001}{0,051} \right)^{0,25} = 0,0312.$$

Втрати тиску на тертя вздовж труби, Па

$$\Delta P_\partial = \lambda_1 \cdot \frac{L}{d} \cdot \frac{\rho_g \cdot V_g^2}{2} = 0,0312 \cdot \frac{50}{0,051} \cdot \frac{998 \cdot 0,294^2}{2} = 1319$$

Втрати тиску в місцевих опорах, Па

$$\Delta P_m = \sum \zeta \frac{\rho_g \cdot V_g^2}{2} = (1+1) \cdot \frac{998 \cdot 0,294^2}{2} = 86,26$$

Загальні втрати тиску в трубопроводі, Па

$$\Delta P = \Delta P_\partial + \Delta P_m = 1319 + 86,3 = 1405,3.$$

Відповідь. Загальні втрати тиску потоку $\Delta P = 1405,3 \text{ Па}$.

Завдання для самостійної роботи

Завдання 3.4.1. По трубі діаметром d зі швидкістю w тече вода. Коефіцієнт кінематичної в'язкості води $\nu = 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$, густина води $950 \text{ кг}/\text{м}^3$. Шорсткість труби Δ м. Трубопровід довжиною L км має 4 повороти з коефіцієнтом опору ζ кожний. Визначити втрати тиску потоку. Зобразити схему руху води.

Таблиця 2.

Дані до розрахунку завдання 2.

Номер у списку	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Швидкість V , м/с	0,5	0,75	1	1,25	1,5	1,75	2	2,25	2,5	2,75
Δ , м	$2 \cdot 10^{-4}$	$3 \cdot 10^{-4}$	$4 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-4}$	$3 \cdot 10^{-4}$	$4 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-4}$	$6 \cdot 10^{-4}$	$3 \cdot 10^{-4}$	$7 \cdot 10^{-4}$
Діаметр, d , м	0,15	0,2	0,25	0,32	0,4	0,5	0,65	0,8	0,6	0,25
L , км	1.0	1.3	1.4	1.2	110	1.5	1.6	1.7	1.8	1.9
ζ	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	1.6	1.2	1.3	1.1

Література

1. Степанов Д. В., Ткаченко С. Й. Теплоенергетика. Вступ до спеціальності. Вінниця : ВНТУ. 2011. 100 с.
2. Карпюк А. А., Підгайний Ю. Б., Карпюк Л. А. Вступ до спеціальності. Рівне : НУВГП. 2017. 103 с.
3. Энергетика и охрана окружающей среды / Н. Г. Залогина и др. Москва : Энергия, 1979. 342 с.

ТЕМА 3. ОСНОВИ ТЕПЛОМАСООБМІНУ. ТЕПЛОПРОВІДНІСТЬ. КОНВЕКТИВНИЙ ТЕПЛООБМІН. ТЕПЛОВЕ ВИПРОМІНЮВАННЯ

1 Основні поняття

Теплопередача або теплообмін (Heat exchange) – вчення про самовільні необоротні процеси поширення теплоти у просторі. Під процесом поширення теплоти розуміють обмін внутрішньою енергією між окремими елементами, ділянками середовища, яке розглядається.

Перенесення теплоти здійснюється трьома основними способами: **теплопровідністю, конвекцією і тепловим випромінюванням.**

Теплопровідність (Heat Conductivity) – молекулярне перенесення теплоти в тілах (або між ними), обумовлене обміном кінетичною енергією молекул тіл при їх співударах внаслідок теплового руху.

Конвекція (Convection) можлива тільки в рухомому середовищі. Під конвекцією теплоти розуміють процес її перенесення при переміщенні об'ємів рідини або газу (рухомого середовища) в просторі з ділянок з однією

температурою в ділянки з іншою. При цьому перенесення теплоти нерозривно пов'язано з рухом самого середовища.

Теплове випромінювання (Thermal radiation) – процес поширення теплоти електромагнітними хвилями, обумовлений тільки температурою і оптичними властивостями випромінюючого тіла. При цьому внутрішня енергія тіла (середовища) переходить в енергію випромінювання. **Процес перетворення внутрішньої енергії речовини в енергію випромінювання, перенесення випромінювання і його поглинання речовиною називається теплообміном випромінюванням.**

Спільний процес перенесення теплоти конвекцією і теплопровідністю називається **конвективним теплообміном.**

Процеси теплопровідності і конвективного теплообміну можуть супроводжуватися випромінюванням. Теплообмін, обумовлений сумісним перенесенням теплоти випромінюванням і теплопровідністю, називають **радіаційно-кондуктивним теплообміном.**

Якщо перенесення теплоти здійснюється додатково і конвекцією, то такий процес називають **радіаційно-конвективним теплообміном.**

Іноді **радіаційно-кондуктивне і радіаційно-конвективне** перенесення теплоти називають **складним теплообміном.**

В техніці і в побуті часто відбуваються процеси теплообміну між різними рідинами, розділеними твердою стінкою. Процес передавання теплоти від гарячої рідини до холодної через стінку, що їх розділяє, називається **теплопередачею** (Heat transfer).

Теплопередача здійснюється різними елементарними процесами теплопереносу. Парогенеруючі труби котельного агрегату, наприклад, одержують теплоту від продуктів горіння палива в результаті радіаційно-конвективного теплообміну. Через шар зовнішнього забруднення, металеву стінку і шар відкладень теплота передається теплопровідністю. Від внутрішньої поверхні труби до рідини, що її омиває, теплота переноситься конвективним теплообміном (**теповіддачею**).

Тепловий потік може бути визначений за основним рівнянням теплопередачі,

$$Q = k \cdot F \cdot \Delta \bar{t}, \quad \Delta t = (t_r - t_x) / \ln[\max t / \min t], \quad \max t = t_r - t_x, \quad \min t = t_r - t_r, \quad (1)$$

t_r , t_x – температури теплоносія на виході і вході в котел; t_r – середня температура в топці; Q – тепловий потік, Вт; k – коефіцієнт теплопередачі, Вт/(м² · К); F – площа поверхні теплообміну, м²; $\Delta \bar{t}$ – середньологарифмічний температурний напір, °С.

Коефіцієнти теплопередачі K_0 чистої та забрудненої відкладеннями трубних систем котла K зв'язані співвідношенням

$$K = K_0 / (1 + R_{\text{ТОВ}} \cdot K_0), \quad R_{\text{ТОВ}} = \delta_B / \lambda_B. \quad (2)$$

δ_B, λ_B – товщина та теплопровідність шару відкладень.

Багато процесів перенесення теплоти супроводжуються перенесенням речовини. Наприклад, при випаровуванні води в повітря, крім теплообміну, є і перенесення пари, що утворилася, в пароповітряну суміш. В загальному випадку перенесення пари здійснюється як молекулярним, так і конвективним шляхом.

Сумісний молекулярний і конвективний перенос маси називають **конвективним масообміном**.

2 Теплопровідність

Необхідною умовою поширення теплоти є нерівномірність розподілу температури в середовищі. Таким чином для передачі теплоти необхідний градієнт температури в різних точках тіла. За законом Фур'є теплота dQ_τ , Дж, що проходить через елемент ізотермічної поверхні dF , m^2 , за проміжок часу dt , с, в напрямі dl пропорційна температурному градієнту $\partial t/\partial l$

$$dQ(\tau) = -\lambda \cdot \frac{\partial t}{\partial l} \cdot dF \cdot dt \quad (3)$$

Теплота, що проходить за одиницю часу через одиницю площі ізотермічної поверхні називається **густиною теплового потоку**, $Вт/м^2$, яка в скалярному вигляді записується так

$$q = -\lambda \frac{\partial t}{\partial l} \quad (4)$$

Залежність (4) – математичний запис **основного закону теплопровідності** – **густина теплового потоку пропорційна градієнту температури**.

Коефіцієнт пропорційності λ в рівняннях (3) і (4) характеризує здатність речовини переносити теплоту і називається **коефіцієнтом теплопровідності**.

Таблиця 1.

Коефіцієнти теплопровідності речовин λ , Вт/(м · К).

<i>Речовина</i>	<i>Значення λ</i>	<i>Речовина</i>	<i>Значення λ</i>
Мідь (0...100 °С)	384...393	Цегляна кладка (0 °С)	0,81...0,87
Алюміній (0...100 °С)	202...206	Скло (0..100 °С)	0,7...0,88
Сталь (100 °С)	50...54	Вода (0..100 °С)	0,55...0,683
Лід (0 °С)	2,2	Деревина (дуб) (0...50 °С)	0,2...0,43
Карбонат кальцію	1,8...2,9	Папір (20 °С)	0,12...0,16
Котлові відкладення	2,3...3,8	Азбестовий картон	0,03+0,85 · 10 ⁻⁴ t
Залізобетон	1,35...1,48	Пінополістирол	0,03+ 0,00015 · t
Бетон зі щебенем	1,28...1,36	Повітря (0..100 °С)	0,0244...0,0321

Густина теплового потоку для теплопровідності через одношарову плоску стінку (див. рис. 1 а) визначається за формулою, Вт/м²

$$q = \frac{\lambda}{\delta}(t_{c1} - t_{c2}), \quad (5)$$

де δ – товщина стінки, м; t_{c1}, t_{c2} – температура з обох боків стінки, °С.

Відношення λ/δ називають **тепловою провідністю** стінки, а обернену величину δ/λ – **термічним опором** стінки.

Для одношарової циліндричної стінки (див. рис. 1в) визначають **лінійну густину теплового потоку, Вт/м**

$$q_1 = \frac{t_{c1} - t_{c2}}{\frac{1}{2\pi\lambda} \cdot \ln(d_2/d_1)}. \quad (5)$$

Густина теплового потоку для двошарової плоскої (рис. 1б) Вт/м²

$$q = \frac{t_{c1} - t_{c3}}{\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2}}, \quad (6)$$

лінійна густину теплового потоку для циліндричної двошарової стінки (рис.1г Вт/м),

$$q_1 = \frac{t_{c1} - t_{c3}}{\frac{1}{2\pi\lambda_1} \cdot \ln(d_2/d_1) + \frac{1}{2\pi\lambda_2} \cdot \ln(d_3/d_2)}$$

d_1, d_2, d_3 – діаметри циліндричних стінок, λ_1, λ_2 – теплопровідності стінок.

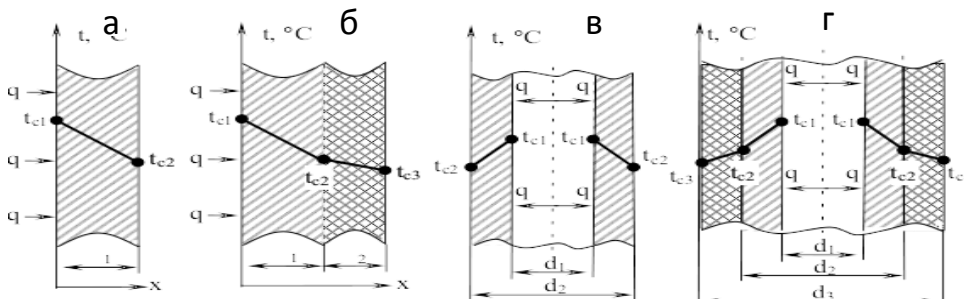


Рис. 1. Теплопровідність через плоску (а, б), циліндричну (в, г), одношарову (а, в) та багатошарову (б, г) стінки.

Завдання для самостійної роботи

Приклад 2.1. Порівняти теплові потоки через одно та дворядну (покриту теплоізоляцією) стінку товщиною d_1 , якщо стінка складена з цегли у півтора ряду, а теплоізоляцію служить шар пінополістиролу товщиною $d_2=10$ см.

Розв'язання

1. За табл. 1 знаходимо теплопровідності матеріалів: цегла $\lambda_1 = 0.84$ Вт/(м·К); Пінополістирол, $\lambda_2 = 0.03$ Вт/(м·К); товщину цегельної кладки приймаємо рівною $d_1=45$ см, а шару пінополістиролу $d_2=10$ см; зовнішню температуру приймаємо $t_1 = -15$ °С, а внутрішню $t_2 = +15$ °С.

2. Тепловий потік через стінку з ізоляцією дається виразом,

$$Q_1 = \frac{t_2 - t_1}{\frac{d_1}{\lambda_1} + \frac{d_2}{\lambda_2}} = \frac{15 - (-15)}{\frac{0.45}{0.84} + \frac{0.1}{0.03}} = 7.75 \text{ Вт/м}^2$$

3. Тепловий потік через стінку без ізоляції дається виразом,

$$Q_2 = \frac{t_2 - t_1}{\frac{d_1}{\lambda_1}} = \frac{15 - (-15)}{\frac{0.45}{0.84}} = 56 \text{ Вт/м}^2$$

4. Порівняємо теплові потоки $Q_2/Q_1 = 56/7.75 = 7.22$.

Відповідь: тепловий потік через ізольовану стінку зменшився в 7.22 раз порівняно з неізольованою.

Використовуючи схему розв'язку прикладу 2.1 та дані табл. 2.1, виконайте за варіантом, що рівний порядковому номеру у списку групи *своє завдання*.

Таблиця 2.

Дані до розрахунку завдання 2.1.

Варіанти Параметри	1	2	3	4	5	6	7	78	9	10
$\lambda_1, \text{ Вт/м}^2\text{К}$	0.6	0.7	0.8	0.9	0.65	0.75	0.85	0.95	1.0	1.1
$\lambda_2, \text{ Вт/м}^2\text{К}$	0.01	0.02	0.025	0.03	0.035	0.04	0.045	0.05	0.055	0.06
$d_1, \text{ м}$	0.3	0.35	0.4	0.45	0.5	0.55	0.6	0.65	0.7	0.75
$d_2, \text{ м}$	0.03	0.05	0.07	0.09	0.11	0.13	0.15	0.17	0.19	0.21

Приклад 2.2. Розрахуйте коефіцієнт теплопередачі (КТП) котла, що має площу теплопередачі трубної системи $F = 30 \text{ м}^2$, потужність $Q = 25 \text{ МВт}$, якщо екранні трубки виготовлені зі сталі Ст-20, середня температура газів в топці $t_{ТЗ} = 970^\circ\text{С}$, середня температура води в екранних трубках $t_r = 130^\circ\text{С}$, температура води на вході в котел $t_x = 30^\circ\text{С}$. Порівняти КТП чистого та покритого відкладеннями CaCO_3 котла, якщо товщина шару відкладень 1.5мм.

Розв'язання

1. Розраховуємо КТП чистого котла k_0 . Для цього використовуємо (1).

$$Q = K \cdot F \cdot \Delta \bar{t}, \quad \Delta t = (t_r - t_x) / \ln[\text{max}t / \text{min}t], \quad \text{max}t = t_{ТЗ} - t_x, \quad \text{min}t = t_{ТЗ} - t_r,$$

$$\text{min}t = t_{ТЗ} - t_r = 970 - 130 = 840; \quad \text{max}t = t_{ТЗ} - t_x = 970 - 30 = 940.$$

$$\Delta t = (130 - 30) / \ln(940 / 840) = 889.$$

$$K_0 = \text{КТП} = Q / (F \cdot \Delta t) = 2.5 \cdot 10^3 / (30 \cdot 889) = 937 \text{ Вт/м}^2$$

2. Визначаємо за формулою (2) КТП забрудненого котла.

$$K = K_0 / (1 + R_{\text{ТОВ}} \cdot K_0), \quad R_{\text{ТОВ}} = \delta_B / \lambda_B.$$

Коефіцієнт теплопровідності карбонату кальцію прийемо рівним такому для цегли, тобто $\lambda_b = 0.87 \text{ Вт}/(\text{м}^2\text{К})$. Тоді

$$K = 937 / (1 + 937 \cdot 1.5 \cdot 10^{-3} / 0.87) = 358.$$

3. Порівнюємо КТП чистого та покритого відкладеннями CaCO_3 котла

$$K/K_0 = 358/937 = 0.38.$$

Тобто КТП котла зменшується на 62%. Це означає, що 62% тепла не передається теплоносію в трубній системі котла, а призводить до росту температури вихідних газів і відповідних непродуктивних втрат палива.

Відповідь. Внаслідок відкладень КТП котла зменшується на 62%. Відповідно зростають теплові втрати котла з вихідними газами та зростає теплове забруднення оточення.

Використовуючи схему розв'язку прикладу 2.2 та дані табл. 2.2, виконайте за варіантом, що рівний порядковому номеру у списку групи *своє завдання*.

Таблиця 2

Дані до розрахунку завдання 2.2.

Варіанти Параметри	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Q, МВт	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28
F, м ²	10	15	20	25	30	40	45	50	55	60
t _{гз} , °С	500	550	600	650	700	750	800	850	900	950
t _г , °С	90	100	110	120	130	140	150	160	170	180
t _х , °С	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65
Δ, м	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002

Приклад 2.3. Визначіть теплові втрати через вікно з подвійним склом, якщо його площа $F = 4 \text{ м}^2$, товщина шибок $d_2 = 4 \text{ мм}$, а товщина повітряного проміжку $d_1 = 10 \text{ см}$. Температура повітря на вулиці $t_3 = -15^\circ\text{C}$, а в кімнаті $t_b = +20^\circ\text{C}$. Порівняйте теплові втрати з вікном з одинарною шибкою при аналогічних умовах.

Розв'язання

1. Для визначення потужності теплових втрат Q через вікно (кількості тепла, що втрачається через вікно за одиницю часу) використаємо формулу розрахунку теплового потоку через тришарову плоску стінку,

$$q = \frac{t_b - t_3}{\frac{d_1}{\lambda_1} + \frac{d_2}{\lambda_2} + \frac{d_3}{\lambda_3}} = \frac{t_b - t_3}{\frac{d_1}{\lambda_1} + 2 \cdot \frac{d_2}{\lambda_2}}$$

Використано, що $d_2/\lambda_2 = d_3/\lambda_3$, оскільки маємо дві однакових шибки. Відповідно, потужність тепла, що втрачається через вікно рівна,

$$Q = q \cdot F = 4 \cdot \frac{20 - (-15)}{\frac{0.1}{0.03} + 2 \cdot \frac{0.004}{0.8}} = 4 \cdot 10.47 = 41.87 \text{ Вт.}$$

Якщо б була лише одна скляна шибка, то втрати були б рівні

$$q_1 = 4 \cdot \frac{t_b - t_3}{\frac{d_2}{\lambda_2}} = 4 \cdot \frac{20 - (-15)}{\frac{0.004}{0.8}} = 28000 \text{ Вт.}$$

Тобто у 668 раз більшими ніж для випадку з подвійною шибкою з повітряним проміжком між шибками.

Відповідь. Втрати тепла через вікно з подвійним склом і 10-ти см проміжком повітря становлять ≈ 42 Вт. Якщо ж маємо одинарне вікно, то втрати зростають у 668 раз і становлять 28 000 Вт.

Використовуючи схему розв'язку прикладу 2.3 та дані табл. 3, виконайте за варіантом, що рівний порядковому номеру у списку групи *своє завдання*.

Таблиця 3

Дані до розрахунку завдання 2.3.

Варіанти Параметри	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
F, м ²	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0	5.5	6.0	6.5
t _в , °С	15	17	19	21	23	25	11	13	15	17
t _з , °С	-5	-7	-9	-11	-13	-15	-17	-19	-21	-23
d ₁ , см	5	7	9	11	13	12	10	9	8	7
d ₂ , мм	3	3	3	3	3	4	4	4	4	4

Література

1. Степанов Д. В., Ткаченко С. Й. Теплоенергетика. Вступ до спеціальності. Вінниця : ВНТУ. 2011. 100 с.
2. Карпюк А. А., Підгайний Ю. Б., Карпюк Л. А. Вступ до спеціальності. Рівне : НУВГП. 2017. 103 с.
3. Энергетика и охрана окружающей среды / Н. Г. Залогина и др. Москва : Энергия, 1979. 342 с.

ТЕМА 4. СКЛАД ПАЛИВА. ТЕПЛОТА ЗГОРАННЯ. ГАЗОГЕНЕРАЦІЯ. ЕНЕРГІЯ СОНЦЯ, ВІТРУ ТА ЗЕМЛІ

1. Склад палива, теплота згорання

Паливо (Fuel) – речовина, яку доцільно використовувати для отримання теплоти у великих кількостях. Основним джерелом теплоти на промислових підприємствах є органічне паливо.

Для отримання теплоти використовується хімічна реакція швидкого окиснення – *горіння* (Burning).

Теплота згорання палива коливається в межах 3800...46000 кДж/кг або кДж/м³. Для порівняння показників котлоагрегатів, що працюють на різних видах палива використовується поняття "*умовне паливо*", теплота згорання якого прийнята 29300 кДж/кг.

Вугілля (Coal) використовується в основному для виробництва електроенергії на теплових електростанціях та теплоелектроцентралях великих підприємств, *мазут* (Fuel Oil) і *природний газ* (Natural gas) використовується в комунальній теплоенергетиці і в котельнях промислових підприємств.

Органічне паливо містить: горючі речовини, внутрішній баласт, негорючі мінеральні домішки і вологу.

До горючої частини палива відносяться вуглець С, водень Н, сірка S та їх сполуки. Основне виділення теплоти відбувається завдяки окисненню вуглецю С.

Вміст водню Н у стандартних палив коливається в межах 2...10 %, але при його згоранні виділяється у 4,4 рази більше теплоти, ніж при згоранні вуглецю.

Вміст сірки S у твердому паливі сягає 7...8 %, в рідкому – 3...3,5 %, а в природному газі – майже відсутній. Сірка є найшкідливішою складовою палива, оскільки при її згоранні утворюються ангідриди SO₂ і SO₃, які агресивно впливають на навколишнє середовище і на металічні поверхні агрегатів.

Кисень О і азот N є внутрішнім баластом палива.

Вологість палива W коливається в діапазоні 5...60 %. При горінні вологого палива частина теплоти затрачається на випаровування води, що зменшує теплотворну здатність палива.

Зольність палива А складається з Al₂O₃, SiO₂, оксидів заліза, карбонатів та сульфатів магнію, кальцію, заліза. Збільшення зольності зменшує вміст горючих речовин, збільшує забруднення поверхонь, стираються труби в котлах, тощо.

Склад палива, в такому вигляді як воно поступає до споживача, називається *робочим складом палива*

$$C^P + H^P + O^P + N^P + S^P + A^P + W^P = 100 \% . \quad (1)$$

Від хімічного складу палива залежать його властивості.

Найважливішими характеристиками палива є: теплота згорання; вихід легких речовин; склад мінеральних домішок; вологість; сірчистість.

Розрізняють *вищу на нижчу теплоту* згорання палива.

Вища теплота згорання палива Q_в^р – теплота, що виділяється при повному окисненні горючих складових палива, *і теплота, що виділяється при конденсації водяної пари, яка міститься в продуктах згорання палива.*

Нижча теплота згорання палива Q_н^р – теплота, що виділяється при повному окисненні всіх горючих складових палива.

В СРСР було прийнято рахувати теплові баланси за нижчою теплотою згорання палива, а в Англії, США та інших – за вищою.

Теплоту згорання визначають експериментально за допомогою калориметра. При розрахунках нижчої робочої теплоти згорання палива використовують такі емпіричні формули:

– для твердого та рідкого палива, кДж/кг

$$Q_{\text{нр}} = 338 \cdot C^{\text{P}} + 1025 \cdot H^{\text{P}} - 108,5 \cdot (O^{\text{P}} - S^{\text{P}}) - 25 \cdot W^{\text{P}}; \quad (2)$$

– для газового палива, кДж/м³

$$Q_{\text{н}}^{\text{P}} = 108 \cdot H^{\text{P}} + 126 \cdot CO^{\text{P}} + 234 \cdot H_2S^{\text{P}} + 358 \cdot CH_4^{\text{P}} + 591 \cdot C_2H_4^{\text{P}} + \\ + 638 \cdot C_2H_6^{\text{P}} + 860 \cdot C_3H_6^{\text{P}} + 913 \cdot C_3H_8^{\text{P}} + 1135 \cdot C_4H_8^{\text{P}} + \\ + 1187 \cdot C_4H_{10}^{\text{P}} + 1461 \cdot C_5H_{12}^{\text{P}} + 1403 \cdot C_6H_6^{\text{P}}. \quad (3)$$

Для розрахунку вищої робочої теплоти згорання можна скористатись формулою

$$Q_{\text{в}}^{\text{P}} = Q_{\text{н}}^{\text{P}} + 25,1 \cdot (W^{\text{P}} + 9 \cdot H^{\text{P}}). \quad (4)$$

На підставі рівнянь хімічних реакцій отримані емпіричні залежності для визначення теоретичної витрати повітря для спалювання палива:

– для твердого та рідкого палива, м³/кг

$$V^0 = 0,0889 \cdot (C^{\text{P}} + 0,375 \cdot S^{\text{P}}) + 0,265 \cdot H^{\text{P}} - 0,033 \cdot O^{\text{P}}; \quad (5)$$

– для газового палива, м³/м³

$$V^0 = 0,0476 \cdot \left[0,5CO^{\text{P}} + 0,5H^{\text{P}} + 1,5H_2S^{\text{P}} + \sum \left(m + \frac{n}{4} \right) \cdot C_mH_n - O^{\text{P}} \right] \quad (6)$$

Завдання для самостійної роботи

Приклад 1. Розрахувати нижчу та вищу теплоту згорання та теоретичну витрату повітря для горіння газового палива, що має склад: H^P =15%, CO^P =25%, CH₄^P =25%, C₂H₄^P =10%, C₄H₈^P =10%, O^P = 5%, W^P = 10%. Порівняйте ці теплоти згорання.

Розв'язування

1. За формулою (3) знаходимо нижчу теплоту згорання,

$$Q_{\text{н}}^{\text{P}} = 108 \cdot 15 + 126 \cdot 25 + 358 \cdot 25 + 591 \cdot 10 + 1135 \cdot 10 = 30980 \text{ кДж/м}^3.$$

2. За формулою (3) знаходимо вищу теплоту згорання,

$$Q_{\text{в}}^{\text{P}} = 30980 + 25,1 \cdot (10 + 9 \cdot 15) = 34620 \text{ кДж/м}^3.$$

3. Порівняємо обидві теплоти згорання

$$Q_{\text{в}}/Q_{\text{н}}^{\text{P}} = 1,12.$$

Тобто вища теплота згорання на 12відсотків більша за нижчу.

4. Розрахуємо кількість повітря потрібного для спалювання 1 м^3 палива. Для цього використаємо формулу (6),

$$V^0 = 0.0476 \cdot [0.5 \cdot 25 + 0.5 \cdot 15 + 2 \cdot 25 + 3 \cdot 10 + 6 \cdot 10 - 5] = 7.38\text{ м}^3$$

Відповідь

Нижча теплота згорання палива 30980 кДж/м^3 , а вища на 12% більша. Для згорання 1 м^3 палива потрібно 7.38 м^3 повітря.

Використовуючи схему розв'язку прикладу 1 та дані табл. 1, виконайте за варіантом, що рівний порядковому номеру у списку групи *своє завдання*. Отримані результати порівняйте з даними, що знайдете в Інтернеті, або в інших довідниках.

Таблиця 1.

Дані до розрахунку завдання 1.

Варіанти Параметри	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
H	8	10	12	14	16	18	8	10	12	14
CO	4	6	8	10	12	14	4	6	8	10
CH ₄	10	14	18	22	26	30	10	14	18	22
C ₂ H ₆	20	18	16	14	12	10	20	18	16	14
C ₅ H ₁₂	18	16	14	12	10	8	18	16	14	12
W	24	22	20	18	16	14	24	22	20	18
O	16	14	12	10	8	6	16	14	12	10

2 Горіння палива. Газогенерація та піроліз

Спалювання палива відбувається за ланцюговою реакцією. Найпростіший випадок горіння газового палива, коли проходить окиснення горючих складових у вуглекислий газ і воду. Для горіння разом з горючим газом подається необхідна кількість окисника. Якщо окисника не вистачатиме – будуть утворюватись продукти неповного згорання CO, SO, сажа C, вуглеводні C_nH_m тощо.

Якщо окисник подавати з надлишком, то температура в зоні горіння буде знижуватись. Горіння палива можливе при дотриманні двох основних умов:

– температура в *зоні горіння вища температури спалаху* (табл. 1);

– концентрація палива в паливо-повітряній суміші (для газових палив) повинна відповідати певному діапазону (табл. 2).

Температура спалаху – температура, за якої утворення ланцюгів реакцій горіння і обривання таких ланцюгів знаходяться у рівновазі.

Таблиця 1

Температури спалаху деяких палив у повітрі при атмосферному тиску.

Паливо	Температура, °С	Паливо	Температура, °С
--------	-----------------	--------	-----------------

Водень Н ₂	530...590	Бензин	410...560
Окис вуглецю СО	610...658	Деревина	295
Метан СН ₄	645...850	Буре вугілля	450
Сірководень Н ₂ S	290	Кокс	600...700

Щоб газова паливо-повітряна суміш спалахнула, концентрація палива повинна бути між **верхньою та нижньою концентраційними межами спалаху**.

Таблиця 2.

Верхня та нижня концентраційні межі спалаху деяких газових палив.

Паливо	Концентрація палива у суміші, %	
	нижня межа	верхня межа
Метан СН ₄	5,0	15,0
Водень Н ₂	4,1	24,0
Окис вуглецю СО	12,5	24,0
Сірководень Н ₂ S	4,5	45,0
Природний газ	4,5	13,5
Генераторний газ	20,7	73,7
Коксовий газ	7,0	21,0

Наявність верхньої та нижньої концентраційних меж пов'язана із автотермічністю процесу. Якщо замало повітря (концентрація палива вища верхньої межі), то для проведення процесу недостатньо окисника і реакція припиняється. Якщо повітря забагато (концентрація палива нижча нижньої межі), то виділення теплоти при горінні недостатньо для нагріву суміші до температури спалаху і реакція також припиняється.

Якщо температура суміші підтримується вище температури спалаху, то суміш горить при будь-якій концентрації палива.

Важливим показником горіння палива є **нормальна швидкість горіння**.

Це така швидкість, з якою фронт полум'я насувається на нерухому газоповітряну суміш.

Якщо по трубі подавати суміш із нормальною швидкістю горіння, то фронт полум'я буде нерухомим. Якщо подавати із більшою швидкістю – полум'я буде відриватись, якщо із меншою – буде проскакування полум'я в трубу, рух полум'я назустріч суміші.

Проскакування полум'я неможливе через отвір розміром < 1 мм, тому в промисловості і побуті використовують пальники із малими отворами.

Найпростіше спалювати природний газ, його підготовка – тільки зниження та підтримання певного тиску перед пальником.

Для спалювання рідкого палива (мазуту, дизельного пального) необхідно використовувати форсунки (Sprayers). Ці пристрої розпилюють паливо, після цього воно випаровується і пізніше спалахує.

Тверде паливо подрібнюють, підсушують і потім спалюють кусками розміром 20...30 мм, або у вигляді пилу 1...100 мкм.

Газогенерація (Gasgeneration) – термічна деструкція вуглеводневої сировини або палива у присутності поданого ззовні окислювача. Термін "газифікація" також застосовується щодо реакцій окиснення вугілля з утворенням, наприклад, CO або CO₂. **Процес газогенерації оптимізують за максимальним виходом газу.** Температура газогенерації складає 600...1100 °C. Газ, що виділяється, містить в основному CO, CO₂, H₂O, H₂, CH₄ і інші вуглеводні. Газогенерація може здійснюватися такими окисниками, як повітря, кисень, пара, CO₂.

Піроліз (Pyrolysis) – термічна деструкція вуглеводневої сировини чи палива у відсутності поданого ззовні окисника. Піроліз проходить при відносно низьких температурах (500...800 °C). Продуктами піролізу є в основному смола, вугілля і газу з низькою молекулярною вагою. Також можуть виділятися значні кількості CO і CO₂. При термічній переробці біомаси процеси піролізу, газогенерації та повного спалювання часто відбуваються одночасно (див. рис. 1).

Швидкість кожного з цих процесів визначається, в тому числі, концентрацією окисника.

Однією з основних задач сучасної теплоенергетики є зменшення використання викопних палив – природного газу, мазуту, вугілля шляхом використання нетрадиційних джерел енергії та альтернативних палив, наприклад, органічних відходів, енергій вітру, сонця та води.

Приклад 2. Паливо складається з 10% сірководню та 20% метану, останнє повітря. Визначити до якої температури можна нагрівати цю суміш щоб вона спалахнула і при якій температурі буде повноцінне згорання палива? Прийняти, що повітря (окисника) вистачає.

Розв'язування

1. Визначимо температуру спалаху суміші за табл. 1. Для сірководню вона рівна 290°C, а концентраційна межа 4.5%. Отже суміш спалахне і почне горіти при температурі більшій від 290°C, Якщо температура суміші зросте вище 645°C, то спалахне метан і при достатній кількості повітря суміш буде повноцінно горіти. Проте, якщо кількості повітря буде недостатньо для нагріву суміші до 645°C, то після вигорання сірководню горіння припиниться.

Завдання 2 для самостійної роботи. Прийняти, що склад палива наведений в табл. 2. Визначіть і поясніть умови за яких паливо буде повноцінно горіти.

Таблиця 3.

Дані до розрахунку завдання 2.

Варіант Параметр,	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Водень Н ₂	8	10	12	14	16	18	8	10	12	14
Окис вуглецю СО	4	6	8	10	12	14	4	6	8	10
Метан СН ₄	10	14	18	22	26	30	10	14	18	22
Сірководень Н ₂ S	20	18	16	14	12	10	20	18	16	14
Дерево	18	16	14	12	10	30	18	16	14	12

Відновлювані джерела енергії

Відновлювані джерела енергії (Renewable energy sources) є альтернативою первинним вичерпним енергоресурсам – природному газу, нафті, вугіллю.

До *відновлюваних джерел енергії* відносять: енергію Сонця, вітру; ґрунту і ґрунтових вод; енергію припливів та хвиль; енергію біомаси. Ресурсна база основних джерел енергії наведена в таблиці 3.

Таблиця 4.

Енергетичний потенціал основних джерел енергії.

Джерело енергії	Потенціал
Вугілля	$2,96 \cdot 10^{22}$ Дж
Нафта	$8,3 \cdot 10^{18}$ Дж
Природний газ	$7 \cdot 10^{18}$ Дж
Ядерна енергія (уран)	$4,2 \cdot 10^{25}$ Дж
Енергія річок	$1,01 \cdot 10^{17}$ Дж/рік
Енергія хвиль	$(1,8...18) \cdot 10^{16}$ Дж/рік
Енергія припливів	$3,24 \cdot 10^{17}$ Дж/рік
Енергія вітру	$(1,8...18,7) \cdot 10^{18}$ Дж/рік
Температурний градієнт: морів і океанів	$(3,6...36) \cdot 10^{18}$ Дж/рік
повітря	$(3,6...36) \cdot 10^{15}$ Дж/рік
надр Землі	$(1,8...7,2) \cdot 10^{18}$ Дж/рік
Сонячне випромінювання на поверхню Землі	$(7,2...10,08) \cdot 10^{20}$ Дж/рік
Енергія біомаси і торфу	$3,6 \cdot 10^{19}$ Дж/рік

3.1. Енергія вітру

Вітровий потенціал виникає в зв'язку із нерівномірним нагрівом поверхні Землі. Основними характеристиками вітрового потенціалу є швидкість вітру і повторюваність вітрів. Найбільш ефективно використовувати вітроустановки в

районах зі швидкістю вітру більше 5 м/с. Значний потенціал вітроенергетики має в Азово - Чорноморському регіоні. Недоліками вітроенергетики є шум і вібрація, які супроводжують роботу вітроагрегатів, нестабільність вітрів, що вимагає дублювання джерел енергії, і, відповідно, здорожує установку і вартість енергії.

Приклад 3.1. Оцінити середню потужність вітроустановки (ВЕУ) з колесом діаметром $D = 3\text{м}$, якщо швидкість вітру $V = 5\text{м/с}$, ККД установки $\eta = 65\%$, ймовірність вітру $W = 0.7$. Густина повітря прийняти $\rho = 1.24\text{кг/м}^3$.

Розв'язування

1. Беремо до уваги, що потужність потоку повітря, яка пройде через колесо ВЕУ рівна

$$K = S \cdot V \cdot 0.5 \cdot \rho \cdot V^2 = \pi \cdot D^2 / 4 \cdot V \cdot \rho \cdot V^2 / 2 = 0.392 \cdot 9 \cdot 125 \cdot 1.24 = 546.8 \text{ Вт.}$$

2. Врахуємо ККД ВЕУ, а також, що вітер дме лише з ймовірністю W . Тоді середня потужність вітроустановки рівна,

$$P = W \cdot \eta \cdot K = 0.7 \cdot 0.65 \cdot 546.8 \approx 279 \text{ Вт.}$$

Відповідь

Отримана потужність ВЕУ рівна ≈ 280 Вт і при заданих умовах близька до реальної. Для ефективного використання енергії потрібно мати електрогенератор та електричний акумулятор. Поясніть для чого?

Домашнє завдання виконуєте за схемою прикладу 3.2.

Таблиця 5.

Дані до розрахунку завдання 3.1.

Варіант Параметр,	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
D, м	3	4	5	7	2	9	5	6	7	8
V, м/с	4	6	8	5	7	10	3	4	5	2
η , %	65	70	60	75	80	55	50	65	75	60
W	0.7	0.8	0.5	0.7	0.6	0.4	0.7	0.6	0.4	0.7

За Інтернетом визначіть зони України де доцільно використовувати ВЕУ? Вкажіть їх та очікувану в них швидкість вітру. Розшукайте країни Європи з максимальним використанням енергії вітру.

3.2. Енергія Сонця

Сонячне випромінювання вкрай нерівномірне по земній поверхні та протягом року. Сонячна енергетика є найбільш екологічно чистою, але її недоліком є мала густина падаючого потоку енергії $(0.6-0.8)\text{кВт/м}^2$. Це призводить до високої вартості сонячних енергоустановок. Сонячна енергія використовується за допомогою двох видів установок:

- отримання електричного струму (фотоелектричні перетворювачі, капітальні вкладення в такі системи складають приблизно 200...500 у.о. на 1 м² поверхні;
- отриманням теплової енергії (сонячні колектори), капіталовкладення складають до 200 у.о. на 1 м² поверхні.

3.3. Енергія Землі

Геотермальна енергетика є потужним і екологічно чистим джерелом енергії, але гарячі геотермальні джерела зустрічаються рідко, вода в них має велику кількість солей і вимагає додаткової обробки. Такі джерела використовуються для теплопостачання та виробництва електроенергії на геотермальних електростанціях. Використання теплоти ґрунту вимагає великих витрат і значних територій. Теплота ґрунту використовується переважно для теплопостачання, причому потенціал цієї теплоти необхідно підвищувати за допомогою теплових насосів.

Холод ґрунту влітку використовують для кондиціонування повітря. Для цього повітря прокачується через закопані в землю труби, де воно охолоджується і подається в приміщення.

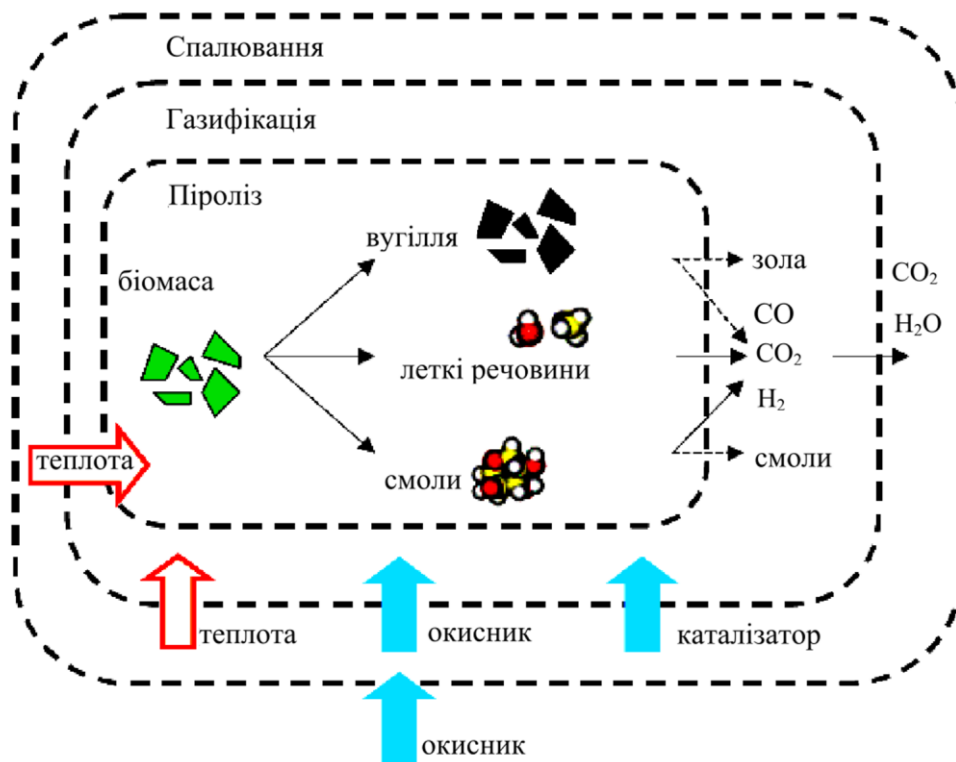


Рис. 1. Схема процесів термічної переробки біомаси.

3.4. Енергія біомаси

Біомаса (Biomass) відіграє домінуючу роль серед інших поновлюваних джерел енергії в Україні. Існують різні біоенергетичні технології, які дозволяють отримувати корисні продукти: *електричну і теплову енергію, паливо, високоякісні добрива, будівельні матеріали, тощо*. З біомаси можна отримувати

біогаз, синтез-газ, біоетанол, біодизель, тверде паливо. Технології перероблення біомаси дозволяють також вирішувати проблему утилізації шкідливих побутових та промислових відходів.

Лідерами з використання біогазових технологій є: Німеччина, Велика Британія, США, Канада, Бразилія, Данія, Китай, Індія та ін.

В біогазових установках утилізують органічні відходи, виробляючи біогаз з теплою згорання 20...24 МДж/м³ та якісні добрива. Для виробництва біогазу можна використати будь-які органічні відходи, зокрема відходи харчової і переробної промисловості, комунальні стічні води і тверді побутові відходи, відходи тваринництва і рослинництва. На сміттєзвалищах за допомогою спеціальних свердловин можна отримувати звалищний газ (dumppgas), який використовується для виробництва теплової та електричної енергій.

З багатьох сільськогосподарських культур (наприклад рапс, кукурудза, соняшник) можна отримувати моторне паливо – біодизель.

Для вискоєфективного спалювання біомаси її підсушують (вологість не повинна перевищувати 10-15%) і пресують у вигляді брикетів, або пелетів (гранул).

Література

1. Степанов Д. В., Ткаченко С. Й. Теплоенергетика. Вступ до спеціальності. Вінниця : ВНТУ. 2011. 100 с.
2. Карпюк А. А., Підгайний Ю. Б., Карпюк Л. А. Вступ до спеціальності. Рівне : НУВГП. 2017. 103 с.
3. Энергетика и охрана окружающей среды / Н. Г. Залогина и др. Москва : Энергия, 1979. 342 с.

ТЕМА 5. ТЕПЛОЕНЕРГЕТИЧНІ УСТАНОВКИ: КОТЛИ, ТЕПЛООБМІННИКИ, ТЕПЛОВІ ДВИГУНИ

Теплоенергетичні установки на сьогодні дуже поширені. До них належать котельні установки, різного роду теплогенератори, нагнітачі (поршневі, шестерневі, струменеві та пластинні, відцентрові та вихрові). До теплоенергетичних установок також належать двигуни внутрішнього згорання, парові та газові турбіни, випарні та ректифікаційні установки, а також теплові помпи, кондиціонери та холодильники. Практично всі установки в яких відбувається перетворення енергії в тій чи іншій мірі відносяться до теплоенергетичних, оскільки кінцевою фазою перетворення енергії є її розсіювання в довкілля у вигляді тепла.

1 Котельні установки

Котельна установка – пристрій, призначений для виробництва теплоти у вигляді пари або гарячої води заданих параметрів для енергетичних, технологічних або опалювальних цілей. Котельна установка складається з котлоагрегату і допоміжного обладнання.

Котельний агрегат (котлоагрегат, котел) (Boiling aggregate) включає топкові пристрої, теплообмінні поверхні для використання теплоти димових газів, каркас, обмурівку, сходи, арматуру та ін.

Допоміжне обладнання – димосмоки, вентилятори, живильні насоси, водопідготовка, паливopідготовка, системи паливopодача, золо- і шлаковидалення.

Котельні установки поділяють на **три класи**: парові (з виробництва водяної пари); водогрійні (відпуск гарячої води); комбіновані (відпуск пари і гарячої води). Схема парогенератора (Steam boiler) наведена на рис. 1. **Котельна установка** виробляє теплову енергію у вигляді гарячої води або водяної пари. Це корисна теплота. Крім того, будь-який реальний процес супроводжується втратами.

При роботі котла є **теплові втрати**:

- втрати з відхідними газами;
- втрати від хімічної неповноти згорання палива;
- втрати від механічної неповноти згорання палива;
- втрати теплоти через стіни котла;
- втрати теплоти зі шлаком.

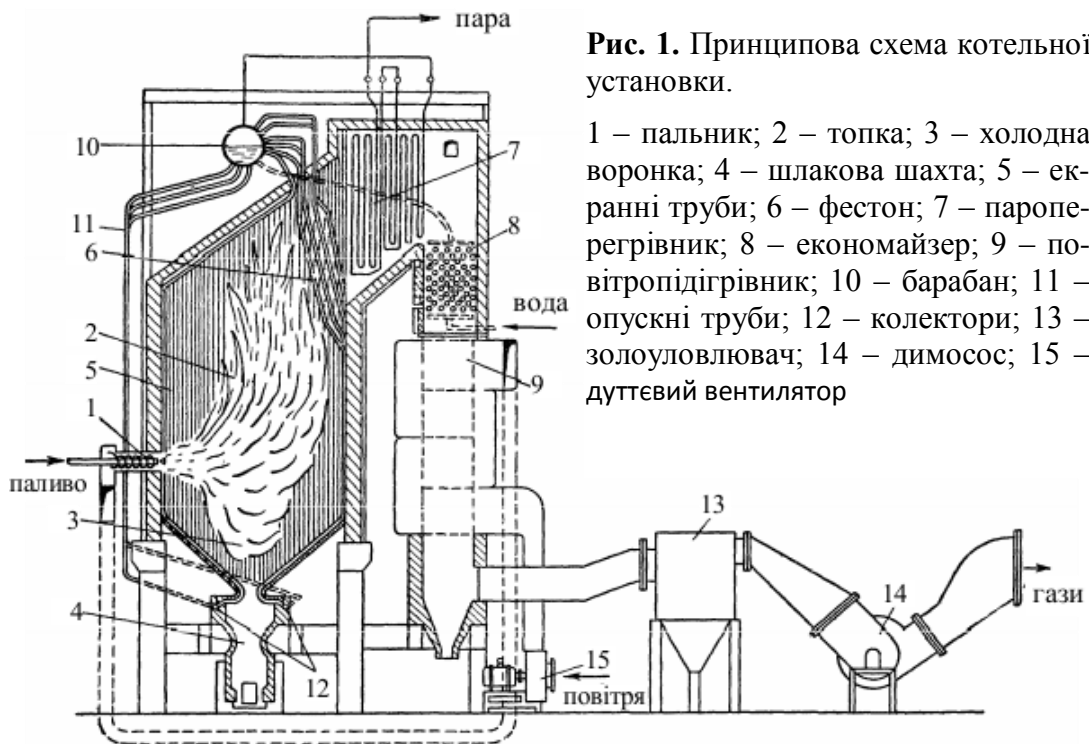


Рис. 1. Принципова схема котельної установки.

1 – пальник; 2 – топка; 3 – холодна воронка; 4 – шлакова шахта; 5 – екранні труби; 6 – фестон; 7 – пароперегрівник; 8 – економайзер; 9 – повітропідігрівник; 10 – барабан; 11 – опускні труби; 12 – колектори; 13 – золоуловлювач; 14 – димосос; 15 – дуттєвий вентилятор

Коефіцієнт корисної дії котлоагрегатів залежить від виду палива, потужності котла, режиму його роботи тощо. В середньому значення ККД коливається в межах $\eta_k = 86\text{...}94\%$. В конденсаційних газових котлах значення

ККД, розраховане за *нижчою теплою згорання*, може сягати 109 %, а за вищою – 97 % і вище.

Витрата палива для котла визначається за формулою, кг/с, м³/с,

$$B = \frac{Q_k}{\eta_k \cdot Q_n} \quad (1)$$

Q_k – теплова потужність котла або корисна теплота, кВт; Q_n – теплота, що виділяється при спалюванні палива, кДж/кг або кДж/м³.

Водогрійні котли мають більш просту конструкцію і складаються з топки і конвективних пучків, де димові гази, охолоджуючись, нагрівають мережеву воду.

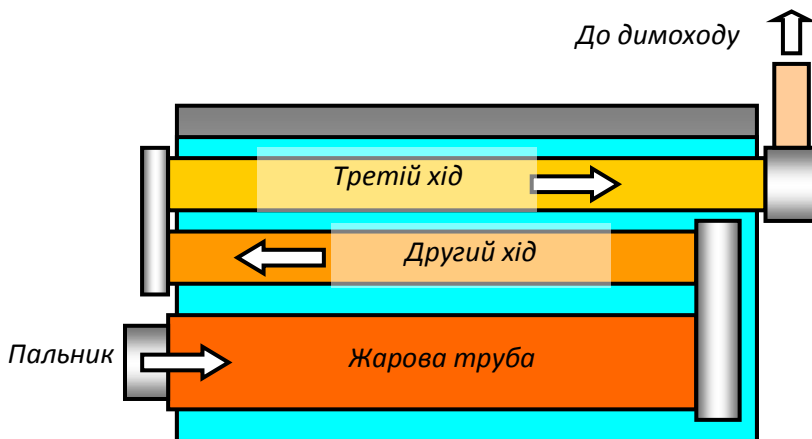


Рис. 2. Триходовий жаротрубний котел.

На рис. 2 показана схема триходового жаротрубного водогрійного котла. Його особливість у тому, що топка знаходиться у широкій жаровій трубі, а продукти спалювання поширюються у вузьких жарових трубах, що оточені водою. Використовують *дво- та триходові котли мокрооборотні і*

чотириходові сухооборотні. У мокрооборотних поворотна камера для газів оточена водою. Характерною особливістю цих котлів є доволі значна інертність через великий об'єм води, що знаходиться у котлі.

Останнім часом внаслідок переходу на відновлювані джерела енергії використовують твердопаливні котли, схема якого показана на рис.3. Побутові водогрійні котли можуть встановлюватись на підлозі, див. рис. 3, або підвішуватись на стіну. Вони можуть бути одно- та двоконтурними. В першому

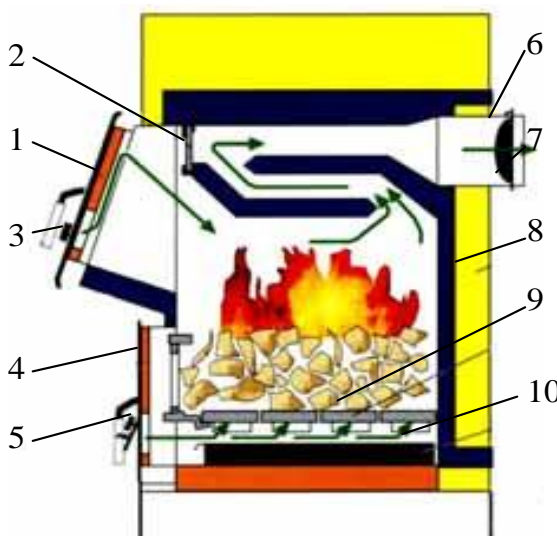


Рис. 3. Газогенераторний твердопаливний котел.

1 – люк для завантаження палива; 2 – засувка; 3 – клапан вторинного повітря; 4 – люк золовидалення; 5 – клапан первинного повітря; 6 – шибер; 7 – газохід; 8 – теплоізоляція; 9 – решітка; 10 – піддон; 11 – основа.

випадку гаряча вода використовується як для опалювання, так і для побутових потреб (гаряче водопостачання, ГВП). У другому випадку контур опалення відділений від контуру ГВП, що дозволяє частково уникати забруднень водних контурів твердими відкладеннями типу CaCO₃.

Приклад 1.

Розрахувати втрати палива у паровому котлі, який генерує насичену пару при тиску 10 МПа з продуктивністю $M = 5$ т пари за годину та споживає $0.12 \text{ м}^3/\text{с}$ природного газу. Прийняти теплотворну здатність газу $Q_{\text{Г}} = 36.5 \text{ МДж}/\text{м}^3$. Визначити шкоду, яку завдає оточенню цей котел.

Розв'язування

1. Визначаємо за таблицями ентальпію насиченої пари при тиску в 10 МПа, отримуємо $h = 2.725 \text{ МДж}/\text{кг}$. Теплова потужність пари (котла),

$$Q_{\text{П}} = h \cdot M / 3600 = 2.725 \cdot 5000 / 3600 \approx 3.785 \text{ МВт.}$$

2. Розраховуємо теплоту, що виділяється при повному згоранні газу,

$$Q_{\text{Г}} = V_{\text{Г}} \cdot Q_{\text{Г}} = 0.12 \cdot 36.5 = 4.38 \text{ МВт.}$$

3. Визначаємо ККД котла η .

$$\eta = Q_{\text{П}} / Q_{\text{Г}} = 0.864.$$

4. Визначаємо шкоду довікілью, що завдається котлом. Ця шкода рівна кількості тепла, що не перетворилася в тепло пари,

$$Q_{\text{Д}} = Q_{\text{Г}} - Q_{\text{П}} = 0.6 \text{ МВт.}$$

Відповідь. ККД котла рівний $0.864 \rightarrow 86.4\%$. Потужність теплового забруднення довікілья рівна $Q_{\text{Д}} = 0.6 \text{ МВт}$.

Домашнє завдання виконуєте за схемою прикладу 1.

Таблиця 1.

Дані до розрахунку завдання 1.

Варіант Параметр,	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
P, МПа	3	4	5	7	2	9	5	6	7	8
V, м ³ /с	1.2	0.6	0.8	0.5	0.7	1.0	0.3	0.4	0.5	0.2
M, т/год.	3	2	5	3	5	4	6	4	3	2
Q _Г , МДж/м ³	34.3	36.7	38.9	33.8	35.9	38.3	36.4	37.2	34.4	35.8

2 Нагнітачі

2.1 Класифікація нагнітачів

Нагнітачами називають пристрої, які призначені для стиску та переміщення рідин і газів. Нагнітачі (НГ) для рідин називаються насосами (pumps), а для газів – **вентиляторами** (ventilators) (із напором 2...12 кПа), **газодувками** (15...30 кПа), **компресорами** (compressors) (30 кПа і більше).

За принципом дії НГ поділяються на **лопатеві, об'ємні і струминні**.

Об'ємні НГ поділяються на поршневі, зубчасті та пластинчасті.

Поршневий об'ємний НГ у найпростішому випадку (див. рис. 4) має розташований в циліндричному корпусі поршень, при русі якого вниз потік всмоктується через всмоктувальний клапан і надходить в робочу камеру. При зворотному русі поршня (вверх) потік стискається і виштовхується з камери через

нагнітальний клапан. Позитивними якостями такого НГ є високе значення ККД, можливість стиснення до високих тисків, незалежність подачі від створеного тиску. Недоліками поршневих нагнітачів є: громіздкість, труднощі з'єднання з електродвигуном, складність системи управління клапанами, нерівномірність подачі газу. Останню проблему вирішують встановлюючи ресивери – об'єми для збору стисненого газу після першого ступеня стиснення.

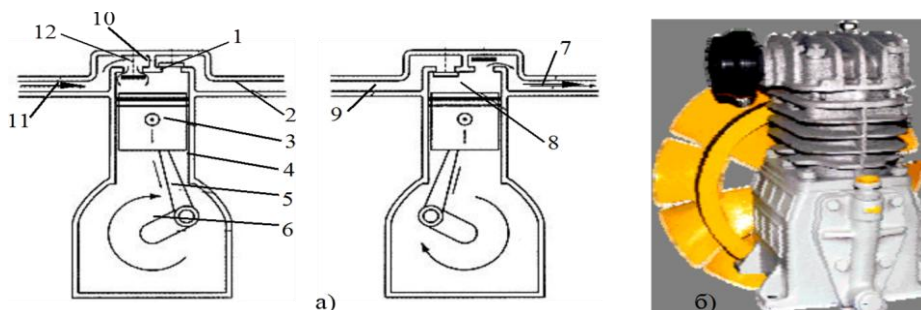


Рис. 4. Принцип дії (а) та зовнішній вигляд (б) поршневого компресора: 1, 12 – нагнітальний та всмоктувальний клапани; 2, 7 – нагнітальна лінія; 3 – поршень; 4 – корпус; 5 – шток; 6 – вал; 8 – робоча камера; 9, 11 – всмоктувальна лінія; 10 – перегородка.

Пластинчасті НГ (рис. 5) мають циліндричний корпус 2, в якому ексцентрично розташований ротор 1, в пазах якого розміщені рухомі пластини 3, що відсовуються одна від другої пружиною.

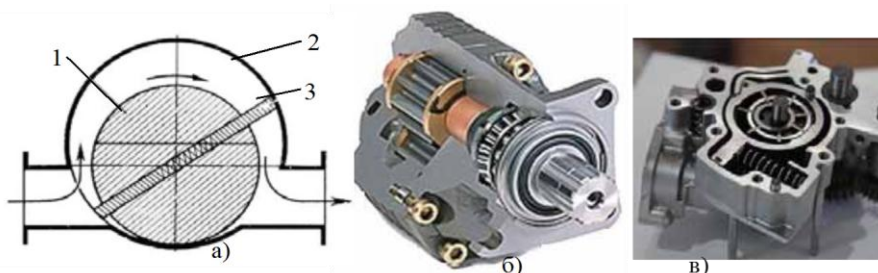


Рис. 4. Конструкція (а) та зовнішній вигляд (б, в) пластинчастих насосів: 1 – ротор; 2 – корпус; 3 – пластини.

Під час обертання ротора пластини пересуваються в пазах. Внаслідок зменшення простору між пластиною і стінкою при обертанні робоча рідина, яка надходить через всмоктувальний патрубок, стискається і виштовхується через нагнітальний патрубок. На відміну від поршневих НГ ротаційні нагнітачі простіші в обслуговуванні та з'єднанні з електродвигуном

В **струминних НГ** (ежекторах) для нагнітання використовується енергія рухомої струмини рідини або газу. Схема струминного НГ показана на рис. 5.

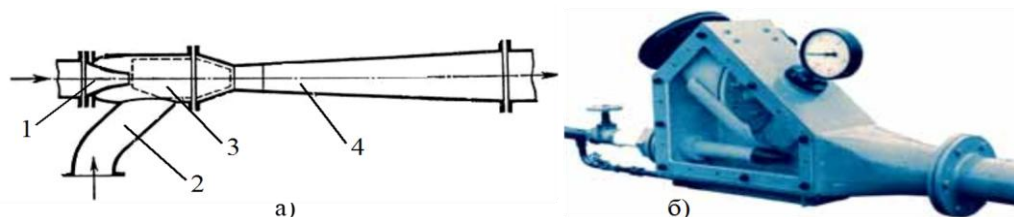


Рис. 5. Конструкція (а) та зовнішній вигляд (б) струминних насосів: 1 – сопло; 2 – всмоктувальна лінія; 3 – робоча камера; 4 – дифузор.

Він складається з корпусу, сопла 1, всмоктувального патрубку 2, камери змішування 3, дифузора 4. Рідина з великим тиском надходить в сопло, де швидкість її зростає, а тиск зменшується. Це дозволяє всмоктувати через патрубок 2 іншу рідину чи газ. В процесі перемішування струмин відбувається обмін кількостями руху між частинками середовищ. В дифузорі тиск суміші збільшується. Перевагою таких НГ є простота конструкції, але вони мають порівняно низький ККД.

Лопатеві нагнітачі поділяють на відцентрові, осьові, вихрові.

Відцентрові НГ (рис. 6) мають лопатеве колесо 2, яке розташоване у спіральній камері 3. Під час обертання колеса потік надходить в осьовому напрямку через всмоктувальну трубу 1, відхиляється на 90° і надходить в міжлопатеві канали. Під дією відцентрових сил потік закручується і виштовхується через нагнітальний патрубок 4.

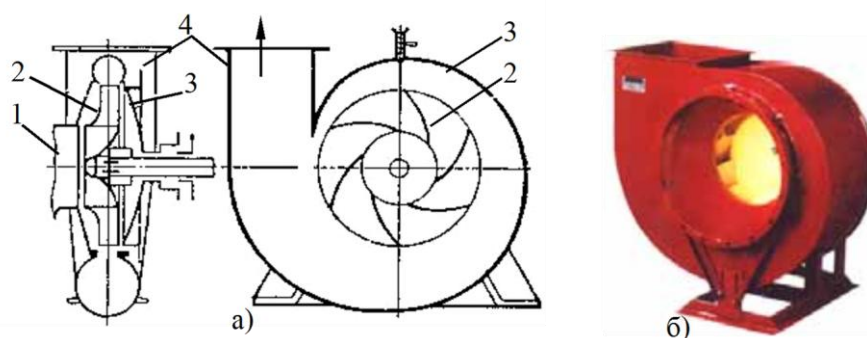


Рис. 6. Конструкція (а) та зовнішній вигляд (б) відцентрового нагнітача: 1 – всмоктувальний патрубок; 2 – робоче колесо; 3 – камера; 4 – нагнітальний патрубок.

Відцентрові НГ мають порівняно високий ККД, достатньо прості за конструкцією, мають плавну подачу. Але їх подача залежить від опору системи. Відцентрові НГ використовують як насоси, вентилятори, а також як багатоступеневі компресори.

2.2 Характеристики та робоча точка нагнітача

Характеристиками (рис. 7) **лопатевого нагнітача називають графіки залежності напору H або P (м в. ст. або Па), ККД η та потужності N (кВт) від об'ємної подачі V (м³/год).**

Значення цих характеристик залежать від швидкохідності НГ та конструкції робочого колеса. Потужність N , кВт, подача V , м³/с, напір H , Па, та ККД η пов'язані залежністю

$$N = \frac{V \cdot H}{\eta}. \quad (2)$$

Характеристика мережі $H = f(V)$ має переважно параболічний характер. Для виявлення характеристик робочої точки нагнітача, що працює на мережу, знаходять точку перетину А характеристик нагнітача та характеристик мережі.

Характеристика мережі – це залежність опору мережі від витрати робочого середовища. Для визначення робочої точки нагнітача в осях $H = f(V)$ на одному рисунку будують характеристика нагнітача і мережі (рис. 7).

Якщо опір системи при розрахунковій подачі V_p нижчий, ніж розрахунковий опір $H_c < H_{cp}$, то замість розрахункової подачі V_p , що відповідає точці B , нагнітач матиме більшу подачу $V > V_p$, яка відповідає робочій точці A (див. рис. 7, а).

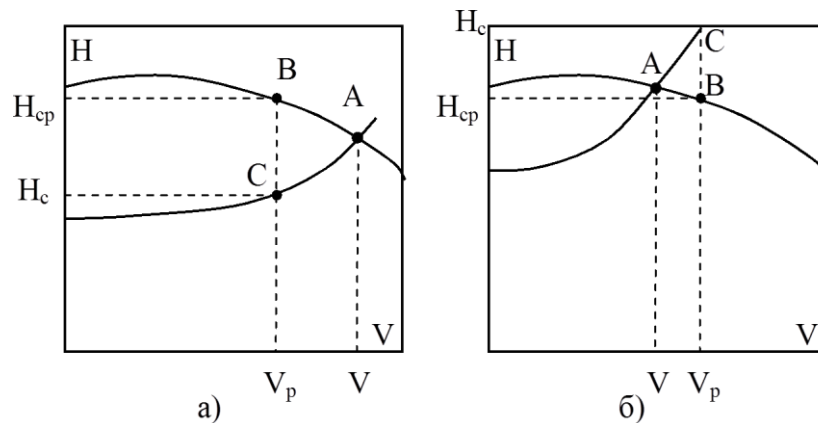


Рис. 7. Характерні випадки сумісної роботи нагнітача та мережі.

Якщо опір системи більший від розрахункового $H_c > H_{cp}$ для подачі V_p , то замість розрахункової подачі V_p , що відповідає точці B , нагнітач матиме нижчу подачу $V < V_p$, що відповідає робочій точці A (див. рис. 7, б).

3 Теплові двигуни

Сучасними тепловими двигунами в теплоенергетиці є парові та газові турбіни, двигуни внутрішнього згорання. **Турбіна** (Turbine) є ротаційним двигуном лопатевого типу. Струмина пари (газу) за допомогою напрямних (соплових) апаратів надходить на криволінійні лопаті, які закріплені на робочому колесі (диску) двигуна. Соплові апарати призначені для перетворення потенціальної енергії тиску та теплової енергії робочого тіла на кінетичну енергію потоку. Крім того, вони забезпечують необхідний кут входу потоку на робочі

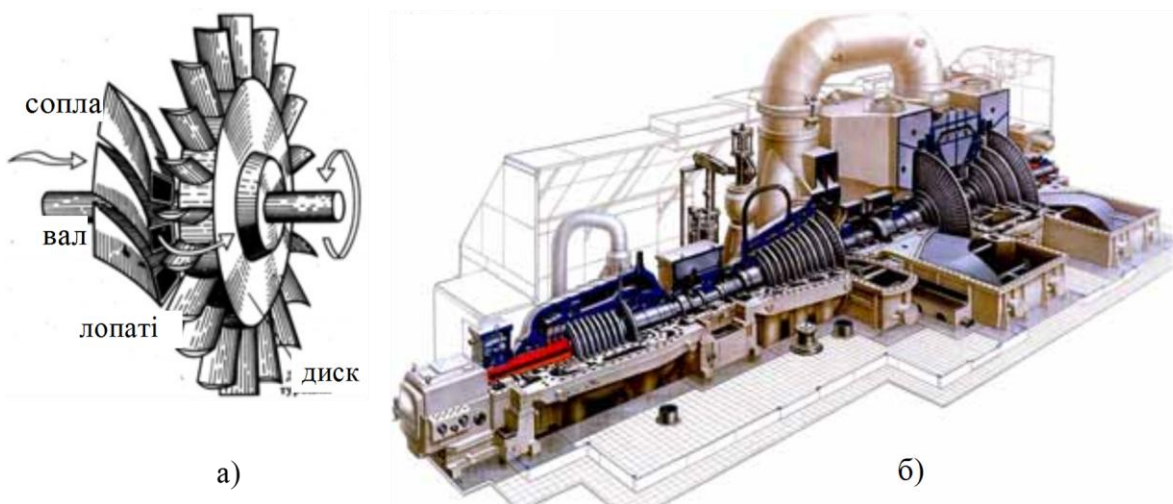


Рис. 8. Схема ступеня (а) та вигляд розрізу (б) турбіни.

лопаті. Робоче тіло уникаючи удару обтікає профілі лопатей і змінює вектор швидкості як за модулем, так і за напрямом. Внаслідок цього виникає колова

швидкість, яка створює крутний момент на валу і ротор турбіни обертається. Схема та зовнішній вигляд турбіни показані на рис. 15.

Приклад 2.

Розрахувати потужність парової турбіни для створення тиску 1МПа при подачі води з витратою $V = 30\text{м}^3/\text{с}$, якщо ККД турбіни 0.94.

Розв'язування.

Для розрахунку використовуємо формулу (2).

Потужність турбіни

$$N = V \cdot H / \eta = 30 \cdot 10^6 / 0.94 = 31.91 \cdot 10^6 \text{Вт} = 31.91 \text{МВт}.$$

Відповідь. Потрібна турбіна з потужністю більшою ніж 32 МВт.

Домашнє завдання виконуєте за схемою прикладу 2.

Таблиця 2.

Дані до розрахунку завдання 2.

Варіант Параметр,	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
H, МПа	3	4	5	7	2	9	5	6	7	8
V, м ³ /с	1.2	0.6	0.8	0.5	0.7	1.0	1.3	1.4	2.5	3.2
η	0.85	0.88	0.95	0.87	0.86	0.88	0.98	0.80	0.83	0.84

4 Тепломасообмінні установки

Теплообмінні установки – пристрої для передавання теплоти від нагрівного середовища до нагріваного. В тепломасообмінних установках крім теплоти переноситься і маса робочих тіл. До тепломасообмінних установок можна віднести теплообмінні апарати (теплообмінники) та технологічне обладнання, де використовуються теплоносії – теплотехнологічні установки: сушильні; ректифікаційні; випарні та інші.

Теплообмінники (Heat exchangers) поділяють на такі види: **рекуперативні**, **регенеративні** та **змішувальні** (контактні).

В рекуперативних теплообмінниках теплота передається від одного середовища до іншого через стінку, яку ці середовища омивають з різних боків. В регенеративних теплообмінниках середовища по чергово омивають



ту саму сторону поверхні (а) та кожухотрубний (б)

відповідно нагріваючи її, а потім охолоджуючи. Найбільш поширеними конструкціями рекуперативних теплообмінників є пластинкові і кожухотрубні апарати (рис. 9). В хімічній технології широко використовуються оболонкові та змішувальні теплообмінники.

Регенеративні теплообмінники в теплоенергетиці зустрічаються рідше. Наприклад, обертові повітропідігрівники в котлах великої потужності або теплоутилізатори у вентиляційних установках (рис. 10). Недоліком регенеративних теплообмінників є ймовірність підмішування одного теплоносія в інший.

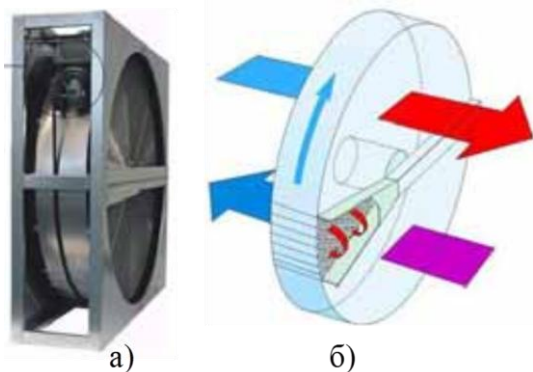


Рис.10. Вигляд (а) та схема руху теплоносіїв (б) роторного регенеративного теплообмінника.

Змішувальні (контактні) теплообмінники використовуються для охолодження димових газів, охолодження оборотної води тощо. **Змішувальні (контактні) теплообмінники** використовуються для охолодження димових газів, охолодження оборотної води тощо. Теплова потужність теплообмінника, в якому охолоджуються або нагріваються теплоносії визначається з рівняння теплового балансу,

$$Q_{\text{то}} = G \cdot c_p \cdot (t' - t''), \text{ кВт}, \quad (3)$$

G – витрата теплоносія, кг/с; c_p – середня теплоємність теплоносія, кДж/(кг · К);

t', t'' – температури теплоносія на вході і виході з теплообмінника, °С.

Для теплообмінників із фазовим переходом, наприклад при конденсації пари, потужність визначається за формулою, кВт,

$$Q_{\text{то}} = G \cdot (h_{\text{парі}} - h_{\text{конд}}). \quad (4)$$

$h_{\text{парі}}, h_{\text{конд}}$ – ентальпії пари та конденсату

Приклад 3.

Розрахуйте потужність теплообмінника для утилізації теплоти, що виділяється при конденсації 500кг/с насиченої пари з початковим тиском $P_{\text{п}} = 400$ кПа та сухістю 90% Температура конденсації пари $t_{\text{к}} = 20^\circ\text{C}$.

Розв'язання.

1. За термодинамічними таблицями знаходимо ентальпії пари та конденсату

$$h_{\text{п}} = 2525 \text{ кДж/кг}, \quad h_{\text{к}} = 83.9 \text{ кДж/кг}.$$

2. За формулою (4) визначаємо теплову потужність ТО.

$$Q_{\text{то}} = 500 \cdot (2525 - 83.9) = 1.22 \cdot 10^6 \text{ Вт} = 1.22 \text{ МВт}.$$

Відповідь. Для утилізації теплоти потрібно мати ТО з потужністю не меншою від 1.22 МВт.

Домашнє завдання виконуєте за схемою прикладу 3. Сухість прийняти 100%.

Таблиця 3.

Дані до розрахунку завдання 3.

Варіант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Параметр,										
$P_{\text{п}}, \text{ МПа}$	3	4	5	7	2	9	5	6	7	8
$t_{\text{к}}, ^\circ\text{C}$	12	60	80	50	70	20	13	18	25	32
$M, \text{ кг}$	800	700	400	300	350	800	900	850	750	600

Література

11. Степанов Д. В., Ткаченко С. Й. Теплоенергетика. Вступ до спеціальності. Вінниця : ВНТУ. 2011. 100 с.
2. Карпюк А. А., Підгайний Ю. Б., Карпюк Л. А. Вступ до спеціальності. Рівне : НУВГП. 2017. 103 с.

ТЕМА 6. СИСТЕМИ ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ

1 Джерела теплопостачання

До джерел теплопостачання (Sources of thermal supply) відносять парові і водогрійні котельні, теплоелектроцентралі ТЕЦ та електростанції: теплові ТЕС, АЕС та ін.

1. Парові та водогрійні котельні

Парові та водогрійні котельні (Boiler room) призначені для виробництва теплової енергії у вигляді насиченої або перегрітої пари та гарячої води.

Котельні складаються з кількох котельних установок. Вони включають котли, вентилятори, димососи, станцію хімводоочищення, конденсатне господарство, систему паливопідготовки, теплообмінники, насоси тощо.

Парові котельні на відміну від водогрійних не тільки постачають теплоту на опалення, вентиляцію, гаряче водопостачання та кондиціювання, а й забезпечують технологічні потреби підприємства паром необхідних параметрів.

Приклади компонування котельень показані на рис. 1.

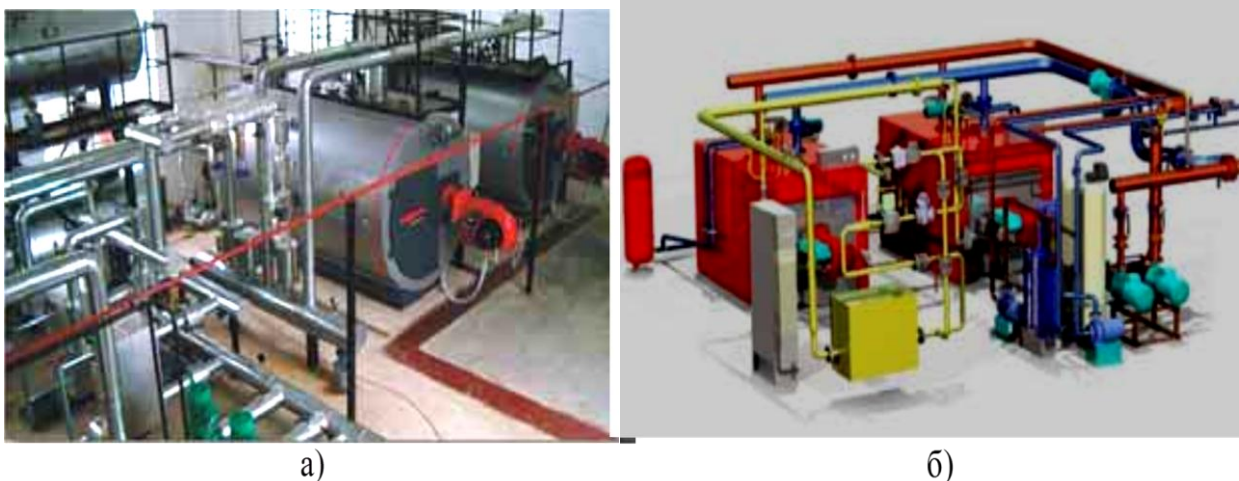


Рис. 1. Компонування парової (а) та водогрійної (б) котельні

Компонування обладнання котельень виконують згідно з вимогами СНіП П-35-76 – "Котельні установки". Вибір і компонування обладнання котельень повинні задовольняти вимоги щодо надійності та довговічності системи, якості теплопостачання, економічності при спорудженні та експлуатації, концентрацій

шкідливих викидів, безпечності обслуговування. Потужність котелень розраховують на забезпеченням теплом у найхолоднішу п'ятиденку року.

2. Теплові електричні станції (ТЕС) та теплоелектроцентралі (ТЕЦ)

ТЕС бувають конденсаційні (коли відпрацьована в турбіні пара подається в конденсатор турбіни їх називають КЕС) та з протитиском і тепловими відборами. На ТЕС основна частина теплоти палива використовується для генерації електроенергії.

Недоліком КЕС є малий коефіцієнт використання тепла (η_Q), яке отримує робоче тіло у паровому котлі (ПК). При ККД ПТУ біля 40% та загальностанційних втратах тепла 10-13 %, враховуючи 5-8 % втрат у ПК, приходимо до величини коефіцієнта перетворення тепла в електричну енергію

$$\eta_c^e = \eta_i \cdot (1 - v_{втр}) = 0.40 \cdot 0.87 = 0.348, \quad (5)$$

η_c^e – електричний ККД ТЕС; $v_{втр}$ – коефіцієнт загальностанційних втрат.

Отже лише 35 % початкової енергії палива перетворюється у електроенергію, а 65 % розсіюється у вигляді втрат тепла у довкілля, у т.ч. в конденсаторі (45-50%). На ТЕС коефіцієнт використання тепла рівний електричному ККД

$$\eta_Q = \frac{Q_k}{B \cdot Q_{\Gamma}^H} = \frac{E}{B \cdot Q_{\Gamma}^H} = \eta_{ст}^e, \quad (6)$$

Q_k – корисна частина тепла (ця, що перетворюється у електроенергію); E – електрична потужність, що генерується з теплоти $B \cdot Q_{\Gamma}^H$; B – витрата палива; Q_{Γ}^H – нижча теплота згорання палива.

Щоб утилізувати хоча б частину теплоти $(1 - \eta_c^e) \cdot B \cdot Q_{\Gamma}^H$, яка становить 60 – 65% від теплоти згорання палива, застосовують **теплофікаційні цикли** паротурбінних установок (**комбіноване виробництво тепла і електроенергії**). Нижче ознайомимось з найбільш поширеними теплофікаційними циклами, розглянемо їх недоліки і переваги, проаналізуємо їх загальну економічність та порівняємо економічність ТЕС і ТЕЦ.

3. Коефіцієнти корисної дії теплоелектроцентралі

Теплоелектроцентралі (ТЕЦ) призначені для **комбінованого виробітку теплоти у вигляді пари, яка відпрацьовала у турбіні, та електроенергії**. Для оцінки ефективності роботи ТЕЦ розподіляють витрату тепла і палива між цими двома видами енергії

$$Q_c = Q_c^e + Q_c^T; \quad (7)$$

Індекси „с” стосуються станції, „e” – електричної енергії, „T” –теплоти. Відповідно розрізняють два ККД ТЕЦ:

1. З виробництва і відпуску електричної енергії

$$\eta_c^e = \frac{N_e}{Q_c^e}; \quad (8)$$

2. З виробництва і відпуску теплоти

$$\eta_{\text{с}} = \frac{Q_{\text{T}}^0}{Q_{\text{с}}^{\text{T}}}; \quad (9)$$

$Q_{\text{T}}^{\text{T}} = Q_{\text{T}}$ – затрата теплоти на зовнішнього споживача; Q_{T}^0 – відпуск теплоти споживачу; η_{T} – ККД відпуску теплоти турбінною установкою, у якому враховують втрати теплоти при її відпуску (у мережевих підігрівачах, паропроводах і т.п.); $\eta_{\text{T}} = 0.98 \div 0.99$.

Загальний коефіцієнт використання теплоти на ТЕЦ рівний

$$\eta_{\text{T}} = \frac{N_{\text{е}}}{Q_{\text{с}}^{\text{е}}} + \frac{Q_{\text{T}}^0}{Q_{\text{с}}^{\text{T}}}. \quad (10)$$

Виріток електроенергії разом з використанням відпрацьованої теплоти ПТУ суттєво підвищує ККД з виробництва електроенергії на ТЕЦ порівняно з КЕС і обумовлює значну економію палива. Якщо втрати теплоти в мережах та

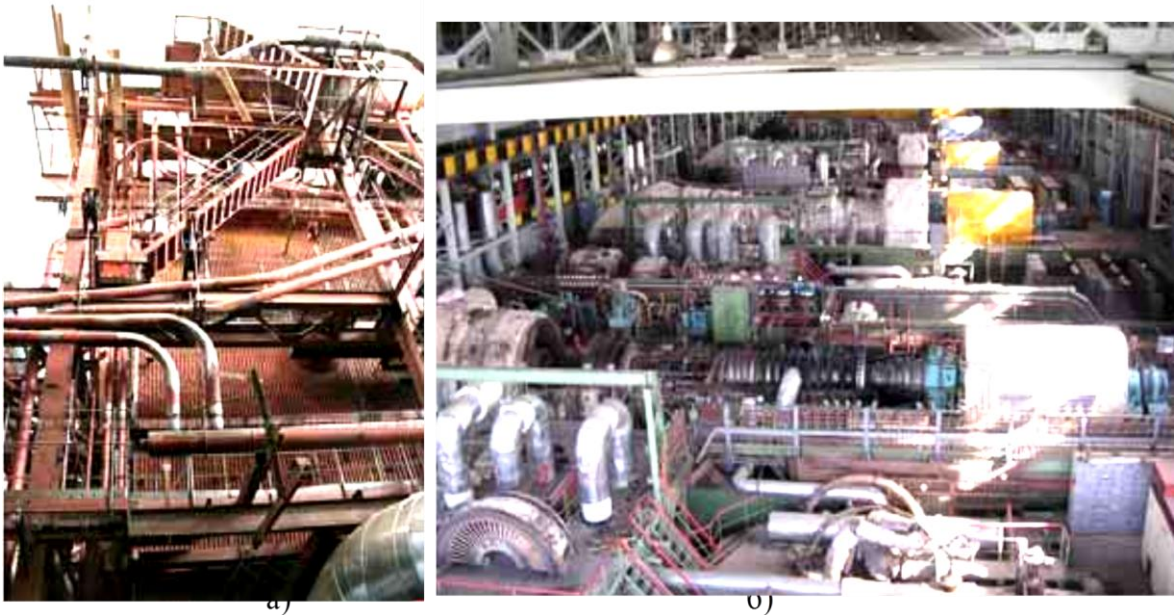


Рис. 2. Зовнішній вигляд обладнання ТЕЦ: а – паровий котел ТЕЦ; б – компонування обладнання в турбінному цеху.

зворотнім конденсатом не більші (10-15)%, то загальний коефіцієнт використання теплоти на ТЕЦ може сягати 0.85(порівняйте з 0.40 для КЕС). Компонування обладнання ТЕЦ показано на рис. 2.

Останнім часом широко впроваджуються міні-ТЕЦ обладнані двигунами внутрішнього згорання(ДВЗ) (рис. 3). Такі газопоршневі або дизельні двигуни, з'єднані з електрогенераторами, спалюючи газове або інше паливо, виробляють електричну енергію. Крім того, відпускається теплова енергія, відібрана від системи охолодження двигуна та гарячих димових газів. Такі системи називають когенераційними (спільне виробництво тепла і електроенергії). Від звичайних ТЕЦ відрізняються двигунами та масштабами.



Приклад 1. Розрахувати втрати тепла при роботі КЕС та ТЕЦ за таких режимних параметрів: електрична потужність ТЕЦ $Ne_{ТЕЦ} = 25$ МВт, теплова потужність ТЕЦ $Q_T = 45$ МВт, ККД КЕС $\eta_e = 38\%$, тепловий ККД ТЕЦ $\eta_T = 50\%$.

Розв'язування.

1. Визначаємо загальну кількість тепла, що генерується паливом при його згоранні в котлі КЕС, для цього використовуємо формулу (8),

$$Q_{КЕС} = Ne / \eta_e = 25 / 0.28 = 89.3 \text{ МВт.}$$

2. Теплові втрати при роботі КЕС рівні

$$Q_{втКЕС} = Q_{КЕС} - Ne = 89.3 - 25 = 64.3 \text{ МВт.}$$

3. За формулою (9) визначаємо кількість тепла, що виділяється в котлі ТЕЦ,

$$Q_{ТЕЦ} = Q_T / \eta_T = 45 / 0.50 = 90 \text{ МВт.}$$

4. За формулою (8) розраховуємо електричний ККД ТЕЦ,

$$\eta_{eТЕЦ} = Ne_{ТЕЦ} / Q_{ТЕЦ} = 25 / 90 = 0.28.$$

5. За формулою (10) визначаємо загальний ККД ТЕЦ,

$$\eta_{ТЕЦ} = \eta_{eТЕЦ} + \eta_T = 0.28 + 0.50 = 0.78.$$

6. Відповідно загальні теплові втрати ТЕЦ становлять

$$Q_{втТЕЦ} = Q_{ТЕЦ} - Ne = 90 \cdot (1 - 0.78) = 19.8 \text{ МВт.}$$

Відповідь. Загальні теплові втрати ТЕЦ (когенераційна система) становлять 19.8 МВт, тобто 22%, тоді як для КЕС вони рівні 64.3 МВт, тобто 62%. Отже перевага ТЕЦ(когенерація) перед ТЕС очевидна.

Домашнє завдання виконуєте за схемою прикладу 1.

Таблиця 1.

Дані до розрахунку завдання 3.

Варіант Параметр,	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10

Рп, МПа	3	4	5	7	2	9	5	6	7	8
тк, °С	12	60	80	50	70	20	13	18	25	32
М, кг	800	700	400	300	350	800	900	850	750	600

Література

1. Степанов Д. В., Ткаченко С. Й. Теплоенергетика. Вступ до спеціальності. Вінниця : ВНТУ. 2011. 100 с.
2. Карпюк А. А., Підгайний Ю. Б., Карпюк Л. А. Вступ до спеціальності. Рівне : НУВГП. 2017. 103 с.
3. Энергетика и охрана окружающей среды / Н. Г. Залогина и др. Москва : Энергия, 1979. 342 с.

ТЕМА 7. ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ В ЕНЕРГЕТИЦІ. ЕНЕРГОМЕНЕДЖМЕНТ.

1. Загальні поняття

Закон України «Про енергозбереження», термін «енергозбереження» визначає як «діяльність, яка спрямована на раціональне використання та економне споживання первинної та перетвореної енергії і природних енергетичних ресурсів».

Кількісно енергозбереження характеризують **«потенціалом енергозбереження»**. Потенціал енергозбереження - різниця між фактичним енергоспоживанням і його оптимальним значенням, що необхідне для забезпечення потреб суспільства [4-7] чи даного підрозділу економіки, в даному випадку енергетики.

Розрізняють такі потенціали енергозбереження:

Теоретичний потенціал енергозбереження (ТПЕ) – це максимальна економія паливно-енергетичних ресурсів (ПЕР), що досягається завдяки ліквідації всіх видів втрат.

Технічний потенціал енергозбереження рівний економії ПЕР, що може бути досягнута за фіксований проміжок часу доступними засобами залежно від стану науково-технічного рівня даного соціуму.

Економічний потенціал енергозбереження (ЕПЕ) – це частина технічного ПЕ, яка може бути прибутково впроваджена при наявності інвестицій, ЕПЕ завжди менший від технічного, оскільки регламентується окупністю та іншими вимогами до інвестицій.

Енергозберігаючий потенціал поведінки визначається розумінням актуальності енергозбереження суб'єктами ринку, що можуть (уповноважені) приймати рішення.

Енергоємність продукції – це відношення річного обсягу спожитої енергії (в натуральному обчисленні) до річного обсягу продукції (в натуральному та вартісному обчисленні). Аналогічно визначають електричну, або теплову ємність продукції.

2. Консалтингові схеми в енергетиці

Паливно-енергетичні кризи змусили переглянути ставлення суспільства до взаємодії процесів виробництва та використання енергії і навколишнього середовища. Цьому сприяла також цілеспрямована діяльність урядів у галузі енергетики, яка включала як роз'яснювальну роботу, так і жорсткі обмеження. Розроблення і реалізація комплексу заходів, метою яких є раціональніше використання енергії, є суттю державної політики багатьох країн світу. Один з важливих державних заходів – створення *консалтингових схем*.

Консалтингова схема – це система планових консультаційних заходів, здійснюваних у певній галузі, зокрема в енергетиці.

До таких заходів належать:

- створення консалтингових фірм, які надають споживачам енергії, розробникам, працівникам планово-економічного сектору, експлуатаційному персоналу і керівникам підприємств консультації у сфері економії енергії;
- розробка навчальних програм та ілюстративного матеріалу для підвищення рівня підготовки працівників з раціонального енерговикористання;
- проведення інформаційної компанії через засоби масової інформації, випуск друкованої продукції, що рекламує і пояснює саму ідею енергозбереження;
- висвітлення в пресі вдалих прикладів економії енергії, підготовка і публікація статей для фахівців у технічних журналах.

Створення і впровадження консалтингових схем зумовили зміни на краще у сфері економії енергії країн Західної Європи. Так, загальне споживання енергії в Данії 1990 р. залишалось на рівні 1973 р., тоді як валовий національний продукт виріс за цей же час на 40 %.

Такий же підхід застосовують для побудови системи заходів щодо економії енергії та захисту навколишнього середовища. За основу беруть раціональне планування енергоспоживання завдяки удосконаленню технології. Це стосується як способу і культури експлуатації енергетичного устаткування, так і загального психологічного підходу до споживання енергії. Удосконалення енерготехнологій та енергозбереження залежить від ефективності енергетичного устаткування та систем, зокрема: ТЕС, ТЕЦ, опалювально-виробничі котельні, котлоагрегати, печі; системи розподілу теплоти: теплові пункти, теплові мережі; системи вентиляції будинків різного призначення; устаткування для виробництва, постачання та споживання електричної енергії.

3. Енергетичний менеджмент

Енергетичний менеджмент (ЕМ) дозволяє одержати докладну інформацію щодо споживання енергії на підприємстві і порівняти ефективність існуючого споживання зі споживанням енергії на інших підприємствах.

Мета ЕМ – оцінка проектів економії енергії та планованих заходів щодо енергозбереження на певному підприємстві.

Енергетичний менеджмент – це система керування енергоспоживанням на підприємстві, яка опирається на проведення типових вимірювань і перевірок та забезпечує таку роботу підприємства, коли споживається тільки необхідна за даних умов виробництва кількість енергії.

Це основний інструмент скорочення споживання енергії і відповідно підвищення ефективності її використання, а також зниження негативного впливу енергетики на довкілля. За впровадження нового для підприємства виду діяльності щодо раціонального використання енергоресурсів тобто за енергетичну ефективність підприємства відповідає **енергетичний менеджер**.

Основні обов'язки енергоменеджера:

- участь у впорядкуванні карти споживання енергії на підприємстві, збирання даних про споживання ПЕР з використанням лічильників і контрольно-вимірювальної апаратури;
- упорядкування плану установаження додаткових лічильників і контрольно-вимірювальної апаратури;
- збирання даних про потоки сировини, первинних енергоресурсів і готової продукції;
- розробка пропозицій щодо підвищення ефективності використання енергії загалом і на окремих ділянках виробництва;
- визначення і впровадження заходів для економії енергії, що не потребують інвестицій або які можна реалізувати завдяки мінімальних інвестицій;
- оцінювання і визначення пріоритетності заходів щодо економії енергії, які потребують великих інвестицій;
- впорядкування схеми аварійної зупинки устаткування і варіантів енергопостачання для випадків аварійного припинення зовнішньої подачі енергії;
- інформування персоналу підприємства про діяльність енергетичного менеджменту та інформування про заходи, вжиті для економії енергії;
- упровадження нових технологій на існуючих і нових енергосистемах для підвищення енергоефективності виробництва;
- участь у розробці виробничого плану і стратегії енергоспоживання на підприємстві.

Енергетичний менеджер зобов'язаний підтримувати власну інформованість у галузі енергетики, а також знати законодавство, систему оподаткування, питання захисту навколишнього середовища тощо. Перелік обов'язків енергетичного менеджера дуже широкий і потребує від нього різнобічних і глибоких знань.

Систему енергетичного менеджменту можна розглядати як сукупність таких етапів.

Перший етап – це запуск системи. Початок впровадженню енергетичного менеджменту може покласти енергетичний аудит, який дасть уявлення про ситуацію щодо енергоспоживання на підприємстві.

Другий етап – аналіз і порівняння реальних рівнів споживання з ключовими цифрами з літератури, інших підприємств того ж профілю.

Третій етап – визначення стану і обрання пріоритетів у розробці проектів заощадження енергії.

На **четвертому етапі** розробляють бюджет виконання обраних проектів. Цей бюджет будують на вже відомих цифрах питомого споживання енергії на підприємстві.

П'ятий етап – контроль за споживанням енергоносіїв, рівень якого має не перевищувати того, що зазначено в бюджеті. На цьому етапі іноді вдається виявити додаткових несподіваних споживачів енергії і провести аналіз причин, через які вони виникають. На цьому перший цикл замикається.

Наступний цикл починається з тієї самої процедури. Такі системи енергетичного аудиту та енергетичного менеджменту працюють на більшості підприємств, які випускають конкурентоспроможну продукцію в країнах Європейського союзу.

Найефективніше використання енергії пов'язано з такими основними показниками:

- високим рівнем використання потужностей виробництва (якщо обсяг виробництва 50% від максимального (проектного) рівня, то досить складно домогтися високої ефективності використання енергії);

- раціональним підбором типу енергоносіїв для основних енергоємних виробництв;

- початковою якістю сировини;

- ефективністю роботи окремих установок і систем загалом;

- низьким рівнем втрат у системах розподілу енергії (пари, стисненого повітря, електроенергії).

Основну увагу треба приділяти найбільш енергоємним виробничим системам як ТЕС, котельні установки, сушильне устаткування, схеми подачі тепла для

виробничих потреб, системи опалення і водопостачання, системи вентиляції і кондиціонування повітря, холодильні установки, системи освітлення, системи подачі стисненого повітря, насоси та ін.

Втрати енергії відбуваються у всіх компонентах системи, але вартість їх усунення різна. Тому, аналізуючи в процесі енергетичного менеджменту можливості енергозбереження, треба підходити до таких систем комплексно використовуючи принцип «міні-максу».

Завдання

Кожен студент вибирає собі реальний об'єкт для його аналізу з т.з. енергозбереження. Це може бути аудиторія університету, чи будь-яке інше приміщення і аналізує його енергетичний стан відповідно до підпунктів 1-3 теми. Розробляє план енергетичного обстеження відповідно до п.3.

Оформлює і представляє на занятті звіт про розробку і виступає з його обґрунтуванням. Звіт оформляється у форматі не менше 4-5 сторінок шрифтом 14 через 1.5 інтервалу.

Література

1. Степанов Д. В., Ткаченко С. Й. Теплоенергетика. Вступ до спеціальності. Вінниця : ВНТУ. 2011. 100 с.
2. Карпюк А. А., Підгайний Ю. Б., Карпюк Л. А. Вступ до спеціальності. Рівне : НУВГП. 2017. 103 с.
3. Энергетика и охрана окружающей среды / Н. Г. Залогина и др. Москва : Энергия, 1979. 342 с.

ТЕМА 8. ПРОБЛЕМА ТА СПОСОБИ ЗМЕНШЕННЯ ТЕХНОГЕННОГО НАВАНТАЖЕННЯ ТЕПЛОЕНЕРГЕТИКИ НА ДОВКІЛЛЯ

1 Техногенне навантаження енергетики на довкілля

Розвиток промисловості, енергетики, транспорту спричиняє забруднення, в першу чергу, атмосферного повітря. Наприклад, в процесі виплавки 1т сталі в атмосферу викидається 40кг пилу, 30кг сірчистого ангідриду, 50кг оксиду вуглецю, а у процесі виробництва 1т сірчаної кислоти 20кг оксиду азоту, 10кг сірчистого ангідриду.

Вироблення 1МВт · год електроенергії на електростанції на твердому паливі супроводжується виділенням 10кг золи, 15кг сірчистого ангідриду і 3кг оксидів азоту.

Основними джерелами забруднення повітряного басейну є промислові установки (особливо чорної та кольорової металургії, хімії), теплові електростанції, транспорт, побутові та комунальні установки.

Під час спалювання твердого палива атмосфера забруднюється золою та частинками неспаленого палива, сірчанам та сірчистим ангідридом, оксидами

азоту та іншими сполуками. Сама зола є нетоксичною речовиною, але в золі деяких видів міститься миш'як, двоокис кремнію та оксид кальцію.

При спалюванні рідкого палива атмосфера забруднюється оксидами сірки, азоту, продуктами неповного згорання, сполуками ванадію та іншими речовинами а при спалюванні газоподібного палива, в основному виділяється оксиди азоту та продукти неповного згорання.

У продуктах згорання можуть знаходитися **токсогени**, які отруйно діють на людей, тварин і рослинний світ як безпосередньо, так і опосередковано, поглинаючи короткохвильове сонячне випромінювання, яке відіграє важливу роль у життєдіяльності.

Шкідливими речовинами, що впливають на людину є: бензопірен, оксиди азоту, оксиди сірки, оксиди вуглецю, сірководень, формальдегід та інші сполуки, які вражають перш за все органи дихання, викликаючи або посилюючи такі хвороби, як ангіна, катар верхніх дихальних шляхів, фарингіт, бронхіт, пневмонія, астма, тонзиліт, туберкульоз і рак легенів.

Природний та інші паливні гази є вибухонебезпечними та отруйними. Метан CH_4 у 21 раз агресивніший, ніж продукти його згорання.

Забруднення повітря завдає серйозних збитків сільському і лісовому господарству, знижуючи їх продуктивність і врожайність, негативно впливає на тваринництво, прискорює корозію металів.

За ступенем впливу на організм людини викиди поділяють на 5 класів:

- 1 – надзвичайно небезпечні;
- 2 – високонебезпечні;
- 3 – помірковано небезпечні;
- 4 – малонебезпечні;
- 5 – безпечні.

Критерієм санітарного оцінювання середовища є **гранично допустимі концентрації (ГДК)** забруднювальних речовин. Це така концентрація, яка при щоденній дії протягом тривалого часу не викликає патологічних змін та захворювань. Значення граничних допустимих концентрацій основних шкідливих викидів наведені в таблиці 1.

Таблиця 1.
Значення ГДК шкідливих речовин.

Речовина	Клас небезпеки	ГДК в населених пунктах, мг/м ³		
		разова	середньодобова	в робочій зоні
Двоокис азоту NO_2	2	0,085	0,085	5
Бензопірен $\text{C}_{20}\text{H}_{12}$	1	—	10^{-6}	0,00015
Сірководень H_2S	2	0,008	0,008	10

Сірчаний ангідрид SO ₃	2	0,3	0,1	1
Сірчистий ангідрид SO ₂	3	0,5	0,05	10
Окис вуглецю CO	4	3	1	20
Формальдегід HCOH	2	0,035	0,012	0,5

Для визначення техногенного навантаження (Technogenic loading) на навколишнє середовище, що здійснюють промислові, енергетичні чи інші технології використовують програмне забезпечення, яке розроблено на основі методів врахування життєвого циклу виробу чи системи.

Тобто враховується техногенне навантаження, яке здійснює система, починаючи з видобування руди для виробництва матеріалів та обладнання, закінчуючи витратами пов'язаними із утилізацією елементів системи. Прикладом такого програмного забезпечення є продукт *Sima Pro*.

2. Методи зменшення техногенного навантаження

Проблему зменшення техногенного навантаження можна поділити на кілька напрямків:

По-перше, зменшення енергоємності технологічних процесів, що дозволить зменшити викиди під час виробництва теплової та електричної енергії.

По-друге, зменшення матеріалоємності технологій, що дозволить зменшити викиди в навколишнє середовище на всіх етапах від видобування руди і до утилізації залишків системи.

По-третє, підвищення екологічної ефективності теплогенеруючого обладнання.

По-четверте, розроблення маловідходних або безвідходних технологій, що дозволить зменшити викиди, пов'язані із витратами матеріалів та енергії.

Для зменшення техногенного навантаження на навколишнє середовище в теплогенеруючих установках використовують такі заходи.

1. Очищення палива перед спалюванням.
2. Збагачення палива перед спалюванням.
3. Підвищення повноти та якості спалювання палива.
4. Зменшення утворення шкідливих речовин при спалюванні палива.
5. Вловлювання утворених шкідливих речовин.
6. Розсіювання викидів.

Останній метод є обов'язковим, але найменш ефективним, оскільки шкідливі викиди все ж попадають в довкілля, хоча вдалині від місць концентрованого перебування людей. Для цього використовують димові труби. Їх зазвичай виконують сталевими або цегляними (див. рис. 1). Висота димової труби

визначається залежно від потужності джерела забруднення, атмосферних умов, фонові концентрації шкідливих речовин в цьому місці



Рис.1. Сталеві (а) та цегляні (б) димові труби

Очищення та збагачення палива є найбільш дорогими і енергоємними процесами. Очищення продуктів згорання обмежується переважно видаленням негорючих складових палива, що утворюють золу, оскільки видалення оксидів сірки і азоту, бензопірену тощо є, на сьогодні, технологічно складним і дорогим.

Тому максимальна увага повинна бути приділена питанням підвищення ефективності спалювання палива з паралельним зменшенням утворення шкідливих речовин.

Для двох основних шкідливих викидів з котельного обладнання – окислів вуглецю CO та азоту NO_x – існує така закономірність. Обмеження утворення одного з цих викидів призводить до збільшення утворення іншого.

Для зменшення кількості окислів азоту у димових газах необхідно зменшувати температуру в зоні горіння, а це призводить до погіршення горіння палива і збільшення утворення CO . І навпаки, підвищення температури горіння палива і зменшення викидів CO призводить до підвищення температури в зоні горіння і окислення азоту із утворенням NO_x .

3. Аналіз ефективності теплоенергетичного обладнання

Існує кілька методів оцінювання ефективності теплоенергетичного обладнання і систем: ексергетичний, енергетичний, термoeкономічний,

економічний або техніко-економічний та методи оцінювання життєвого циклу, наприклад, програма з використанням екологічних показників Sima Pro.

Ексергетичний метод показує ефективність системи та обладнання щодо абсолютної енергетичної ефективності. Показниками енергетичних методів є ККД, коефіцієнт використання палива тощо. Всі такі методи не мають узагальненого характеру, оскільки не враховують матеріалоемність системи, її екологічні показники.

Найбільш узагальненим серед традиційних, на нашу думку, є **техніко-економічний метод** в грошових показниках. Але екологічна складова теплоенергетики врахована лише штрафами за шкідливі викиди, а штрафи не завжди відповідають наслідкам, що спричиняють викиди.

На основі методів оцінювання життєвого циклу об'єкта розроблений програмний продукт *Sima Pro*, в якому ефективність життєвого циклу об'єкту визначається в екологічних одиницях *Eco-indicator point (Pt)*, які обчислюються шляхом розподілу загального навантаження на навколишнє середовище на кількість жителів Європи.

Для порівняння вищенаведених методів проведено розрахунок ефективності пластинчастого водоводяного теплообмінника, виконаного з легованої сталі, з тепловою потужністю 1 МВт. Результати числового експерименту наведені на рис. 2.

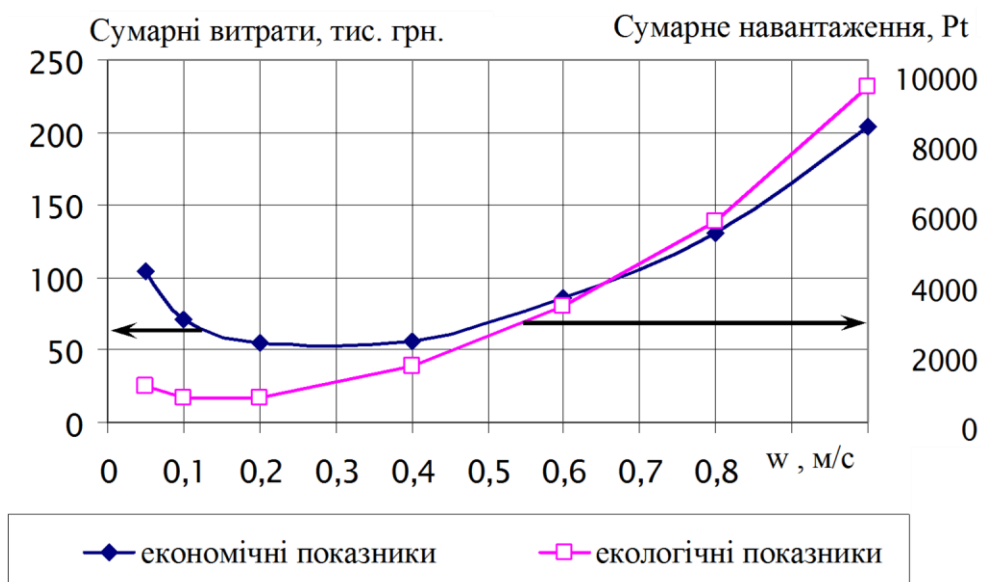


Рис.2. Порівняння результатів оптимізації швидкості води в каналах теплообмінника за економічним та екологічним показниками

До розгляду були прийняті дві найбільші складові витрат – витрати матеріалів на створення теплообмінника і витрати електроенергії на прокачування теплоносіїв через теплообмінник. Оптимізація конструкції відбувалася шляхом зміни швидкості холодного теплоносія в каналах в діапазоні (0,05...1,0) м/с. Оптимальна швидкість відповідає мінімуму грошових витрат та мінімуму

техногенного навантаження на навколишнє середовище. Тобто використання техногенного навантаження як критерію оптимізації дозволяє зекономити електроенергію на перекачування теплоносіїв через теплообмінник. За весь термін експлуатації (прийнято 15 років) це дозволить зекономити біля 7000кВт·год електроенергії. Таке енергозбереження приведе до відповідного зменшення використання палива і зменшення шкідливих викидів при його спалюванні в теплоенергетичних установках.

Згідно з даними на рис. 2, оптимальна швидкість за економічним показником складає біля 0,3м/с, а за екологічним показником – 0,15м/с.

Таким чином, метод оцінювання життєвого циклу виробу чи системи в екологічних одиницях є, на нашу думку, більш перспективним, особливо для теплоенергетичних об'єктів, що є одними з найбільших забруднювачами навколишнього середовища. Його більш широке застосування дозволить зменшити споживання енергоносіїв і поліпшити стан навколишнього середовища. Але, на жаль, в Україні методика використання техногенного навантаження як критерію оптимізації енергетичних установок і систем не знайшла широкого застосування при проектуванні нових енергооб'єктів.

4. Завдання для самостійної роботи

Виберіть на свій розсуд теплоенергетичну установку, наприклад, теплообмінник, нагрівник повітря, охолоджувач води в компресорі і т.д. і виконайте оцінку його життєвого циклу засобами програми *Sihma Pro*. Результат оформіть у вигляді звіту. Для роботи використовуйте Методичні рекомендації з Літератури, а також дані Internet.

Література

1. Методичні рекомендації до вивчення теми «Оцінювання життєвого циклу» з дисциплін “Стале промислове виробництво” і “Оцінка життєвого циклу та екодизайн” для студентів спеціальності 8.18010017 “Економіка довкілля і природних ресурсів”, кафедра екологічної економіки НЛТУ. Редакційно-видавничий центр НЛТУ України. 79057, м. Львів, вул. Генерала Чупринки, 103.

Ел. пошта: zahvoyska@ukr.net; mazhena_sh@ukr.net веб сайт: <http://zahvoyska.ho.ua/>