

ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»

МЕТОДИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ

до виконання індивідуальних завдань з
дисципліни «Теплотехніка»

Запоріжжя 2025



УДК 621.1(072)
М54

Рекомендовано Науково-методичною
радою ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ
УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ
ПОЛІТЕХНІКА»
(протокол № 2 від 21.11.2025 р.)

Укладачі

Біляєва В. В., д-р техн. наук, професор,

М54 Методичні рекомендації до виконання індивідуальних завдань з дисципліни «Теплотехніка» (для студентів технічних спеціальностей усіх форм навчання) / уклад. В. В. Біляєва, Запоріжжя : ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА». 2025. 41 с.

Методичні рекомендації містять відомості щодо формування індивідуальних завдань з дисципліни «Теплотехніка», теоретичні відомості з наведенням основних формул та етапів розв'язання. Крім цього наводяться довідкові дані та індивідуальні варіанти завдань. Матеріал методичних рекомендацій має на меті підвищити якість виконання роботи та виробити навички розв'язання задач прикладного спрямування. Рекомендовано для студентів технічних спеціальностей усіх форм навчання першого (бакалаврського) рівня вищої освіти.

УДК 621.1(072)

© ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА», 2025



ЗМІСТ

Вступ.....	4
1 Індивідуальна робота №1.....	6
Завдання 1.1	6
1.1.1 Загальні положення і формулювання завдання.....	6
1.1.2 Швидкість течії і витрата води у панелі.....	8
1.1.3 Максимальна довжина зміювика.....	9
1.1.4 Температура робочої поверхні панелі.....	10
1.1.5 Втрати тиску води в панелі.....	11
1.1.6 Довідкові дані і варіанти завдання.....	13
Завдання 1.2.....	15
1.2.1 Загальні положення і формулювання завдання.....	15
1.2.2 Методика розрахунку нагріву тіла в печі.....	16
1.2.3 Графічне вирішення завдання.....	19
1.2.4 Довідкові дані і варіанти завдання.....	22
2 Індивідуальна робота №2.....	24
Завдання 2.1	24
2.1.1 Загальні положення і формулювання завдання.....	24
2.1.2 Особливості пневматичного перемішування рідкої сталі	26
2.1.3 Порядок виконання завдання.....	29
2.1.4 Довідкові дані і варіанти завдання.....	30
Завдання 2.2.....	32
2.2.1 Загальні положення і формулювання завдання.....	32
2.2.2 Особливості надзвукового режиму сопла Лавалю.....	33
2.2.3 Розрахунок діаметру критичного перерізу сопла.....	34
2.2.4 Розрахунок діаметру вихідного перерізу сопла.....	35
2.2.5 Профіль сопла і довжина дифузора.....	38
2.2.6 Довідкові дані і варіанти завдання.....	38
Рекомендована література.....	40



ВСТУП


Освітня компонента «Теплотехніка» є базовою дисципліною, що забезпечує засвоєння знань про принципи роботи теплових машин і енергетичних установок, закономірності перетворення різних видів енергії та методи тепломасообміну, необхідних для розв'язання прикладних інженерних задач, пов'язаних із передачею теплоти.

Курс охоплює основи технічної термодинаміки, тепло- і масообміну, механіки рідин і газів, а також теорії горіння палива. Предметом вивчення дисципліни є закономірності перетворення теплової енергії у механічну роботу, а також зворотні процеси. Оволодіння матеріалом спрямоване на розв'язок актуальних завдань, пов'язаних із перенесенням теплоти в елементах енергетичного обладнання, підвищенням ефективності його роботи та впровадженням енергозберігаючих технологій у різних галузях промисловості, зокрема через утилізацію вторинних енергоресурсів.

У межах опанування курсу студенти виконують індивідуальні завдання, присвячені сучасним проблемам енергетичного сектора промисловості, що сприяють формуванню практичних навичок енергоефективного й екологічно орієнтованого інжинірингу.

Запропоновані методичні рекомендації містять опис порядку формування завдань, теоретичні положення з основними формулами та етапами розв'язання, а також довідкові матеріали й індивідуальні варіанти. Їх використання спрямоване на підвищення якості виконання робіт і розвиток умінь розв'язувати інженерні задачі прикладного характеру.

Індивідуальні завдання виконуються самостійно у зручний для студента час в межах терміну подачі роботи, передбачених у розділі «Розподіл балів за контрольними точками та графік їх виконання» та розміщується у відповідному розділі на платформі Moodle. Розв'язання



кожного завдання завантажується у вигляді файлу з розширенням .docx або .pdf, або .jpg, або .png, або .txt.

Максимальна кількість балів визначається в залежності від обґрунтування ходу розв'язання, рівня формалізації задачі, правильності отриманого розв'язку та аналізу результату.

Використання штучного інтелекту (ШІ) не забороняється, оскільки пропозиції відомих застосунків ШІ суттєво залежать від обміркованої постановки питання і уточнюючих питань; однак в разі, якщо відповідь, отримана з використанням ШІ, містить суттєві похибки або не є комплексною, або не відповідає за ustalеним оформленням, термінологією, або іншим вимогам до завдання, то оцінка за виконання знижується.

За бажання студента при наявності похибок або виконання індивідуального завдання не в повному обсязі допускається доопрацювання до передостаннього тижня навчання. Оскарження оцінки за індивідуальні завдання є можливим до завершення терміну теоретичного навчання.

Схема теплообміну в системі «робочий простір топки котла – захисна водоохолоджувана панель» наведено на рис. 1.2.

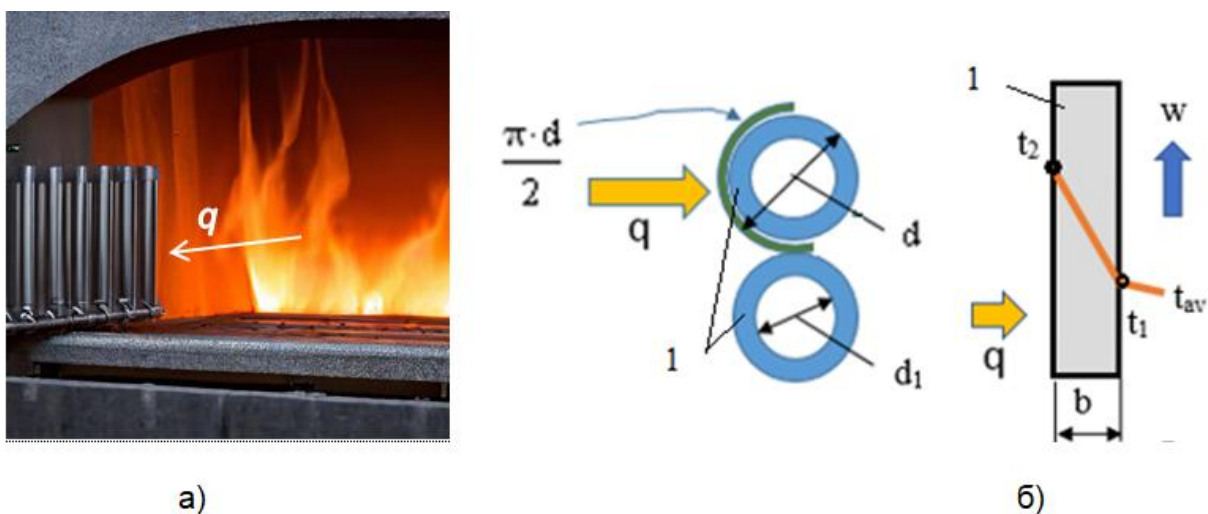


Рис. 1.2. Схема теплообміну у працюючій топці котла
а – сприйняття теплового потоку q панеллю (стрілкою вказано напрям теплового потоку до трубчастої водоохолоджуваної панелі);
б – відведення теплоти водою

Формулювання завдання. На основі заданого теплового потоку в робочому просторі топки котла провести тепловий та гідравлічний розрахунок захисної водоохолоджуваної панелі, а саме:

- визначити швидкість протікання та витрату води в панелі;
- оцінити максимальну довжину змійовика;
- встановити температуру робочої поверхні панелі;
- оцінити втрати тиску води в панелі.

Перші три пункти завдання стосуються теплового розрахунку панелі, четвертий – гідравлічного. В цілому метою даної задачі є забезпечення експлуатації трубчастої водоохолоджуваної панелі у штатному стаціонарному режимі.

Нижче наведено порядок розрахунку кожного шуканого параметру.

1.1.2 Швидкість течії і витрата води у панелі.

Теплообмін стінки труби зміювика з водою за умов турбулентного режиму описується критеріальним рівнянням (спрощеним для інженерних оцінок), що визначає число Нусельта $Nu = \alpha \cdot d_1 / \lambda$ через число Рейнольдса $Re = w \cdot d_1 / \nu$ та число Прандтля $Pr = \rho \cdot C \cdot \nu / \lambda$:

$$Nu = 0,021 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^{0,43}, \quad (1.1)$$

де α – коефіцієнт тепловіддачі конвекцією від стінки труби до потоку води (Вт/(м²·К)), w – швидкість течії води (м/с), q – променевий тепловий потік з робочого простору печі (Вт/м²), λ – коефіцієнт теплопровідності води (Вт/(м·К)); ν – коефіцієнт кінематичної в'язкості води (м²/с), ρ – щільність води (кг/м³), C – теплоємність води (Дж/(кг·К)), d_1, d – внутрішній і зовнішній діаметр зміювика, відповідно (м).


Основний параметр, що визначає теплову роботу панелі α при заданому q обчислюється із рівняння Ньютона-Ріхмана:

$$q = \alpha \cdot (t_1 - t_{av}), \quad (1.2)$$

де $t_{av} = (t_{out} + t_{in})/2$ – середня температура води в панелі між температурою на вході t_{in} та виході $t_{out} \leq 55$ °С.

З урахуванням виразів для складових, рівняння (1.1) приймає вид:

$$q \frac{d_1}{\lambda \cdot (t_1 - t_{av})} = 0,021 \left(\frac{w d_1}{\nu} \right)^{0,8} (\rho \cdot C \cdot \nu / \lambda)^{0,43}. \quad (1.3)$$



Швидкість руху води w (м/с), що входить у вираз для числа Рейнольдса критеріального рівняння (1.1, 1.3), визначається таким чином:

$$w = \left(\frac{\alpha \cdot d_1^{0,2} \cdot \nu^{0,8}}{0,021 \cdot (\rho \cdot c \cdot \nu / \lambda)^{0,43} \cdot \lambda} \right)^{1,25}. \quad (1.4)$$

Зазвичай швидкість води в панелях складає 0,6-2,5 м/с.

Витрата води в панелі Q (м³/с) дорівнює добутку швидкості течії води та площі перерізу каналу і становить:

$$Q = w \cdot \pi d_1^2 / 4 \quad (1.5)$$


1.1.3 Максимальна довжина змійовика

Довжина змійовика L (м) визначається з міркувань забезпечення теплового балансу панелі запобігання відкладення солей жорсткості на поверхні водяного каналу у разі перегріву води.

Перегрів води призводить до випадіння солей жорсткості при температурі 50-60 °С, що характерно для типової схеми водопідготовки на тепловій електростанції. За даних умов температуру стінки водяного каналу панелі рекомендують задавати $t_1 \leq 75$ °С (рис. 1.2), а температуру води на виході із контуру охолодження підтримувати ≤ 55 °С.

Стаціонарний режим панелі передбачає рівність енергії, що надходить в одиницю часу з променевим тепловим потоком q скрізь робочу поверхню панелі $\pi(d/2)L$ (рис. 1.1) – ліва частина рівняння (1.6), і теплоти, що відбирає вода через конвекцію – права частина (1.6).

$$q \cdot \pi(d/2) \cdot L = w \cdot \rho \cdot \pi(d_1^2/4) \cdot C(t_{out} - t_{in}). \quad (1.6)$$



За умов теплового балансу панелі в топці котла, максимально допустима довжина змійовика панелі L (м) із рівняння (1.6) становить:

$$L = [w \cdot \rho \cdot \pi(d_1^2/4) \cdot C(t_{out} - t_{in})]/[q \cdot \pi(d/2)]. \quad (1.7)$$

Зазвичай, довжина змійовика панелі 10 – 30 м.

1.1.4 Температура робочої поверхні панелі

Температура зовнішньої поверхні змійовика t_2 визначається на основі закону Фур'є для циліндричної одношарової стінки через задані тепловий потік з печі q , коефіцієнт теплопровідності труби λ_{pipe} і температуру стінки з боку води $t_1 = 75^\circ\text{C}$ за умов попередження утворення накипу, згідно з практикою. Гарнісаж на робочій поверхні і накип на внутрішній поверхні, а також можливі газові зазори на шляху теплопередачі, як теплові опори, в учбовому завданні не враховуються.

$$t_2 = t_1 + [q \ln(d/d_1)/2\pi\lambda_{pipe}]. \quad (1.8)$$

Перегрів труби спричинює утворення тріщин малоциклової втоми через перевищення еквівалентних термічних напружень певної межі плинності матеріалу. В довідниках, у даному контексті, приводять експлуатаційну температуру конструкційних матеріалів, яку рекомендують не перевищувати. Для сталі 20 та міді гранична температура становить 450 та 260 °С, відповідно (t_2 , рис. 1.2). В певних межах t_2 можна знизити за рахунок зменшення товщини стінки b . Оскільки умови роботи панелей передбачають ударні навантаження через падіння фрагментів скрапу, товщина стінки труби b має бути > 8 -10 мм.

1.1.5 Втрати тиску води в панелі

Втрати тиску ΔP_{loss} (Па) при протіканні рідини в каналі є надлишковими. Таким чином, абсолютний тиск води на вході в панель має становити, як мінімум, $\Delta P_{loss} + 10^5$ (Па). Величина ΔP_{loss} включає динамічні, пропорційні динамічному тиску $\rho \cdot w^2/2$, складові, а саме, втрати на тертя (ΔP_{fr}) і місцеві опори (ΔP_{lr}), а також статичні (геометричні) складові, пов'язані із взаємним розташуванням патрубків живлення і зливу води (ΔP_g).

$$\Delta P_{fr} = \mu_{fr} \cdot (L/d_1) \cdot \rho \cdot w^2/2, \quad (1.9)$$

$$\Delta P_{lr} = \sum_{i=1}^n \varepsilon_{lr}^i \cdot (\rho \cdot \frac{w^2}{2}), \quad (1.10)$$

$$\Delta P_g = \rho \cdot g \cdot (h_{out} - h_{in}), \quad (1.11)$$

$$\Delta P_{loss} = \Delta P_{fr} + \Delta P_{lr} + \Delta P_g, \quad (1.12)$$

де μ_{fr} – коефіцієнт тертя, ε_{lr}^i – коефіцієнт місцевого опору i -го типу, n – число місцевих опорів i -го типу, h_{out} , h_{in} – висота розташування патрубків зливу води і живлення над умовною лінією цехової магістралі (м), g – прискорення сили тяжіння (м/с²).

Умови розрахунку ΔP_{loss} в захисній панелі пояснюються на рис. 1.3. Зазвичай, конструкційні рішення живлення панелей водою передбачають $h_{out} \approx h_{in}$, тому $\Delta P_g \approx 0$. У загальному ж випадку $\Delta P_g > 0$, тому що для виходу з системи охолодження газових бульбашок, розчинених у воді, має бути $h_{out} > h_{in}$.

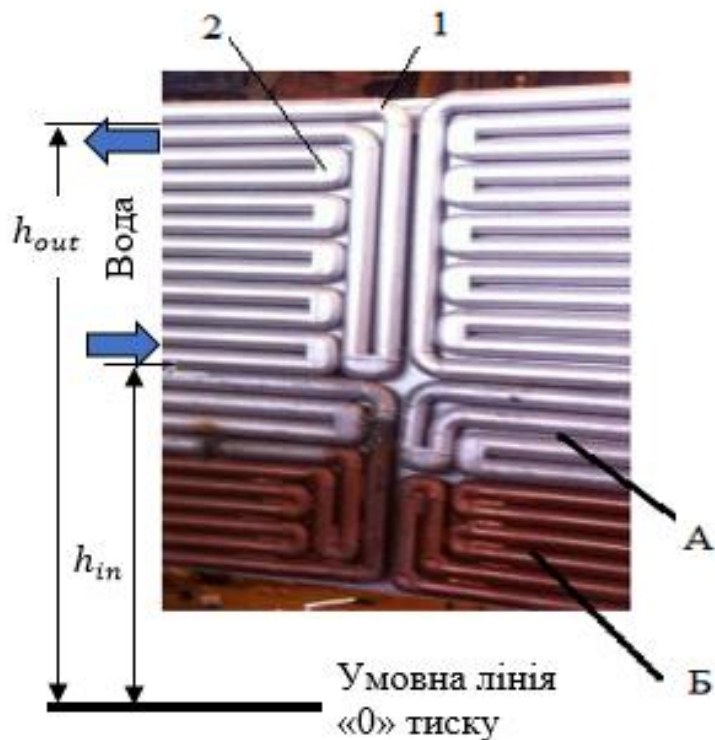


Рис. 1.3. Структура змійовика захисної водоохолоджуваної панелі і оцінка втрат тиску

А – сталева панель, Б – мідна панель

1 – місцевий опір – поворот на 90°, 2 – місцевий опір – поворот на 180°

Відповідність гідравлічного розрахунку панелі експлуатаційним нормам полягає в тому, що загальні втрати тиску води ΔP_{loss} мають не перевищувати можливостей цехової водної магістралі P_{wat} з коефіцієнтом запасу 1,25.

$$\Delta P_{loss} \cdot 1,25 \leq P_{wat}. \quad (1.13)$$

Зазвичай абсолютний тиск води в цеховій магістралі становить 0,3-0,4 МПа.

1.1.6 Довідкові дані і варіанти завдання

При виконанні завдання прийняти щодо розрахунків наступні теплофізичні параметри.

- Теплопровідність води $\lambda = 0,63 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К});$
- Теплопровідність сталі Ст20 $\lambda_{pipe} = 39 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К});$
- Теплопровідність міді $\lambda_{pipe} = 370 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К});$
- Щільність води $\rho = 1 \text{ т}/\text{м}^3;$
- Теплоємність води $C = 4,2 \text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К});$
- Коефіцієнт кінематичної в'язкості води $\nu = 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с};$
- Коефіцієнт тертя води в трубі $\mu_{fr} = 0,045;$
- Коефіцієнт місцевого опору поворот потоку на 90° $\varepsilon_{lr}^i = 0,22;$
- Коефіцієнт місцевого опору поворот потоку на 180° $\varepsilon_{lr}^i = 0,31.$

Прийняти в розрахунках: $t_1 = 75 \text{ }^\circ\text{C}$, $t_{out} = 55^\circ\text{C}$, $\Delta P_g = 0$.

Варіанти завдань наведено в табл. 1.1. Слідкуйте за розмірністю величин в розрахункових формулах і в завданні.

Варіанти завдання 1.1

Номер варіанту	Тепловий потік q (кВт/м ²)	Діаметр труби d/d_1 (мм)	Кількість місцевих опорів n		Темпера- тура води вихідна t_{in} (°C)	Тиск води в цеху P_{wat} (МПа)	Матеріал труби
			90°	180°			
1	155	76 / 56	2	10	20	0,45	Сталь Ст20
2	280	89 / 65	2	68	25	0,35	Мідь
3	210	73 / 53	2	10	25	0,27	Сталь Ст20
4	170	76 / 56	2	8	20	0,34	Сталь Ст20
5	160	89 / 65	3	10	15	0,40	Сталь Ст20
6	250	73 / 53	3	12	18	0,26	Мідь
7	305	76 / 52	2	5	22	0,36	Мідь
8	190	89 / 69	2	8	24	0,32	Сталь Ст20
9	175	73 / 49	4	12	23	0,28	Сталь Ст20
10	230	76 / 56	2	8	20	0,30	Сталь Ст20
11	165	89 / 65	2	6	19	0,25	Сталь Ст20
12	150	73 / 53	3	12	18	0,35	Сталь Ст20
13	140	76 / 54	4	10	25	0,27	Сталь Ст20
14	235	89 / 69	4	12	25	0,34	Мідь
15	255	73 / 49	2	10	25	0,40	Мідь
16	200	76 / 56	2	68	20	0,26	Сталь Ст20
17	185	89 / 65	3	10	15	0,36	Сталь Ст20
18	285	73 / 53	3	8	18	0,32	Мідь
19	140	60 / 44	4	10	22	0,28	Сталь Ст20
20	210	73 / 49	3	12	24	0,30	Сталь Ст20
21	170	76 / 56	2	5	23	0,25	Сталь Ст20
22	260	89 / 65	2	8	20	0,35	Мідь
23	155	73 / 53	3	12	19	0,27	Сталь Ст20
24	295	60 / 44	2	8	18	0,34	Мідь
25	200	89 / 65	4	6	25	0,39	Сталь Ст20

Завдання 1.2

Завдання 1.2 присвячено нестационарному теплообміну і полягає в розрахунку нагріву в методичній печі сталевих заготовок під прокатку.

1.2.1 Загальні положення і формулювання завдання

Об'єкт даного дослідження зображено на рис. 1.4. В методичній печі нагрівають сталеву заготовку 1. Штовхачем 2 заготовка переміщується вздовж робочого простору печі по трубах 3, що охолоджуються водою. В печі забезпечується двосторонній нагрів заготовок випромінюванням факелів газо-повітряних пальників 4, розташованих над і під поверхнею переміщення. Нагрітий метал через вікно видачі потрапляє на рольганг і по ньому заготовки прямують до прокатного стану.

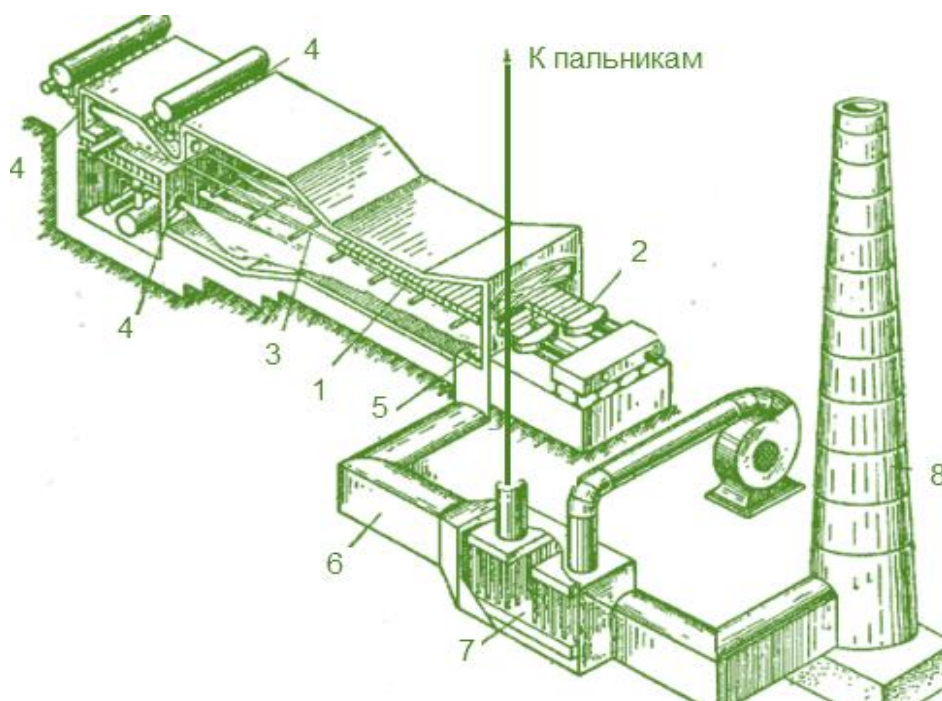



Рис. 1.4. Методична піч для нагріву сталевих заготовок



Продукти згоряння через димові канали 5 видаляються в борів 6 і з нього через рекуператор 7 і димову трубу 8 – в атмосферу.

В рекуператорі нагрівають повітря для підвищення ККД газоповітряних пальників за рахунок набутої фізичної теплоти повітря через використання ентальпії димових газів.

Формулювання завдання. В методичній печі за граничних умов III роду (постійна температура печі і променевий двосторонній теплообмін) нагрівають сталеву заготовку. В табл. 1.2 наведено основні параметри процесу:

- температура в робочому просторі печі $T_{\text{печ}} (^{\circ}\text{C})$,
- температура поверхні сталевий заготовки перед прокаткою $T_{\text{пов2}}$,
- форма заготовки (плита/циліндр діаметром/товщиною s (мм)),
- вихідні температури поверхні $T_{\text{пов1}} (^{\circ}\text{C})$ та осі $T_{\text{ц1}} (^{\circ}\text{C})$ заготовки,
- теплофізичні характеристики сталі (щільність ρ (кг/м³), коефіцієнт теплопровідності λ (Вт/(м·К)), теплоємність C (Дж/(кг·К)),
- приведений ступінь чорноти печі $\epsilon_{\text{пр}}$.

Необхідно визначити:

- час нагріву τ (с) заготовки до регламентованої перед прокаткою температури поверхні $T_{\text{пов2}} (^{\circ}\text{C})$,
- температуру на осі заготовки по завершенню нагріву $T_{\text{ц2}} (^{\circ}\text{C})$.

1.2.2 Методика розрахунку нагріву тіла в печі

Процес нагріву тіла в інженерному розрахунку розбивають зазвичай на три етапи. Кінцеві дані попереднього етапу є вихідними для наступного. В учбовому завданні представимо процес одним етапом. Загальна тенденція зміни температури поверхні і центру сталевий заготовки (T) у часі (τ) в контексті завдання показана на рис. 1.5.

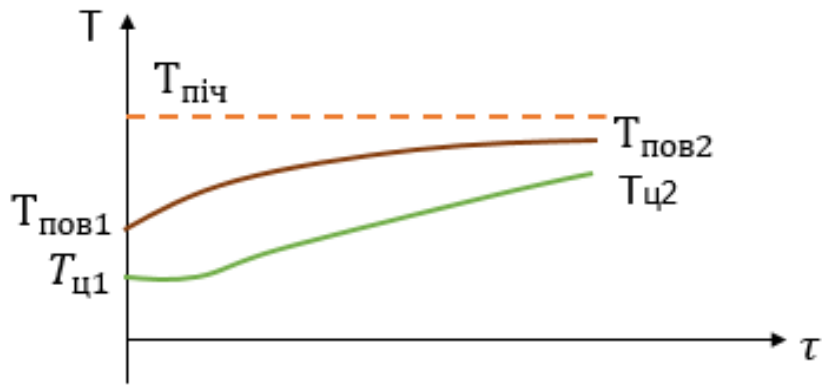


Рис. 1.5. Процес нагріву сталевій заготовці в методичній печі.

Розрахунку нагріву тіла передуює визначення променевого теплового потоку q (Вт/м²) і коефіцієнту тепловіддачі випромінюванням α (Вт/м²·К) на початку (індекс 1) та в кінці (індекс 2) інтервалу нагріву:

$$q_1 = \varepsilon_{\text{пр}} C_0 \left[\left(\frac{T_{\text{пiч}} + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{\text{пов1}} + 273}{100} \right)^4 \right], \quad (1.14)$$

$$\alpha_1 = q_1 / (T_{\text{пiч}} - T_{\text{пов1}}), \quad (1.15)$$

$$q_2 = \varepsilon_{\text{пр}} C_0 \left[\left(\frac{T_{\text{пiч}} + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{\text{пов2}} + 273}{100} \right)^4 \right], \quad (1.16)$$

$$\alpha_2 = q_2 / (T_{\text{пiч}} - T_{\text{пов2}}), \quad (1.17)$$

де $C_0 = 5,67$ коефіцієнт випромінювання абсолютно чорного тіла.

В подальших розрахунках застосовується приведений коефіцієнт тепловіддачі в печі в процесі нагріву $\bar{\alpha}$ (Вт/м²·К), як середнє арифметичне значення складових параметру на початку і в кінці нагріву:


$$\bar{\alpha} = (\alpha_1 + \alpha_2)/2. \quad (1.18)$$

Для визначення параметрів завдання залучають відомі графічні розв'язки нестационарної задачі нагріву/охолодження тіл через залежності між безрозмірними геометричними комплексами, безрозмірними температурами і безрозмірними числами (критеріями) Біо та Фур'є. Такі розв'язки наведено у довідниках.

Критерій Біо (Bi) в задачах нестационарної теплопровідності є аналогом критерія Нусельта при конвективному теплообміні і являє собою характеристику теплової інерції тіла, що нагрівають. Якщо $Bi > 0,5$, тіло розглядають як термічно масивне, що потребує врахування перепаду температур у поперечному перерізі. У разі $Bi < 0,25$ тіло вважають термічно тонким і перепадом температур у перерізі нехтують.

При двосторонньому нагріві тіла енергією випромінювання факелів газо-повітряних пальників (рис. 1.4) характерним розміром у виразі числа Біо є половина товщини (або діаметру) заготовки $s/2$.

$$Bi = \bar{\alpha}(s/2)/\lambda, \quad (1.19)$$

де λ – коефіцієнт теплопровідності заготовки (Вт/(м·К)).

Критерій Фур'є (Fo) пов'язує час (τ) нагріву тіла з його коефіцієнтом температуропровідності ($a = \frac{\lambda}{\rho c}$) і характерним геометричним розміром (s), наприклад, товщиною або діаметром. Таким чином, через вираз для температуропровідності враховуються важливі теплофізичні характеристики тіла, що нагрівають: коефіцієнт теплопровідності (λ), щільність (ρ) і теплоємність (C).

При двосторонньому нагріві тіла характерним розміром у виразі числа Фур'є, як і числа Біо, є половина товщини (або діаметру) заготовки $s/2$.


$$Fo = a\tau / (s/2)^2 \quad (1.20)$$

Температурна функція (безрозмірна температура) щодо поверхні тіла (сталевий заготовки) має наступний вигляд:

$$\theta_{\text{пов}} = (T_{\text{печ}} - T_{\text{пов2}}) / (T_{\text{печ}} - T_{\text{ср1}}) \quad (1.21)$$

де $T_{\text{ср1}} = T_{\text{ц1}} + |T_{\text{пов1}} - T_{\text{ц1}}| / k_T$; k_T – коефіцієнт усереднення температури по перерізу тіла на початку нагріву. Величина $k_T = 3$ для плити, $k_T = 2$ для циліндра.

1.2.3 Графічний розв'язок задачі

За формулами (1.14 – 1.18) для вихідних даних, наведених в табл. 1.2, визначити приведений коефіцієнт тепловіддачі в печі в процесі нагріву $\bar{\alpha}$ (Вт/м²·К).

За формулою (1.19), з урахуванням вихідних даних, визначити критерій Біо (Bi).

За формулою (1.21), з урахуванням вихідних даних, визначити температурну функцію поверхні заготовки $\theta_{\text{пов}}$.

Визначити Критерій Фур'є (Fo) – на горизонтальній осі на графіку для поверхні заготовки (рис. 1.6, 1.7), як функцію критерія Біо (Bi) – числа у кривих і безрозмірної температури ($\theta_{\text{пов}}$) – вертикальна вісь. Для плити розв'язок провести за допомогою рис. 1.6, для циліндру – рис. 1.7. Лініями зі стрілками показано порядок дій.

Із виразу для Fo визначити час нагріву τ (с) заготовки до вказаної в завданні температури поверхні $T_{\text{пов2}}$ (°С), регламентованої технологічними інструкціями перед прокаткою. Попередньо має бути

обчислена температуропровідність заготовки $a = \frac{\lambda}{\rho c}$ (м²/с), що входить до числа Fo , на основі вихідних даних. Потрібна в завданні тривалість нагріву τ (с) визначається із числа Фур'є, отриманого за допомогою графіків рис. 1.6 (плита), або рис. 1.7 (циліндр):

$$\tau = Fo \cdot (s/2)^2/a. \quad (1.22)$$

Отримати безрозмірну температуру центру заготовки ($\theta_{ц}$) за час нагріву із графіка для осі заготовки, як функцію критеріїв Фур'є та Біо. Використати для даної цілі рис. 1.8 для плити, або рис. 1.9 для циліндру. Лініями зі стрілками показано порядок дій.

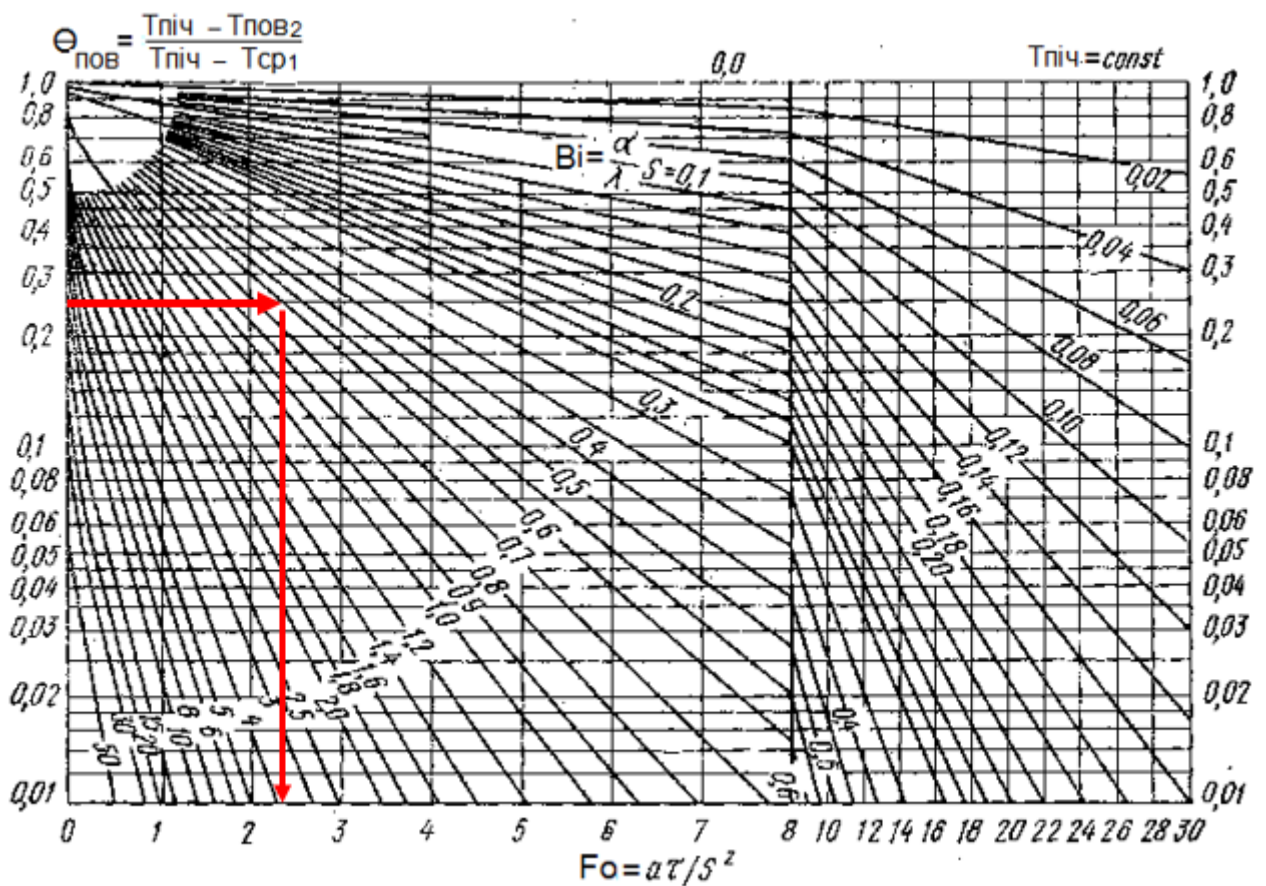


Рис. 1.6. Графік для нагріву (охолодження) поверхні пластини (плити)

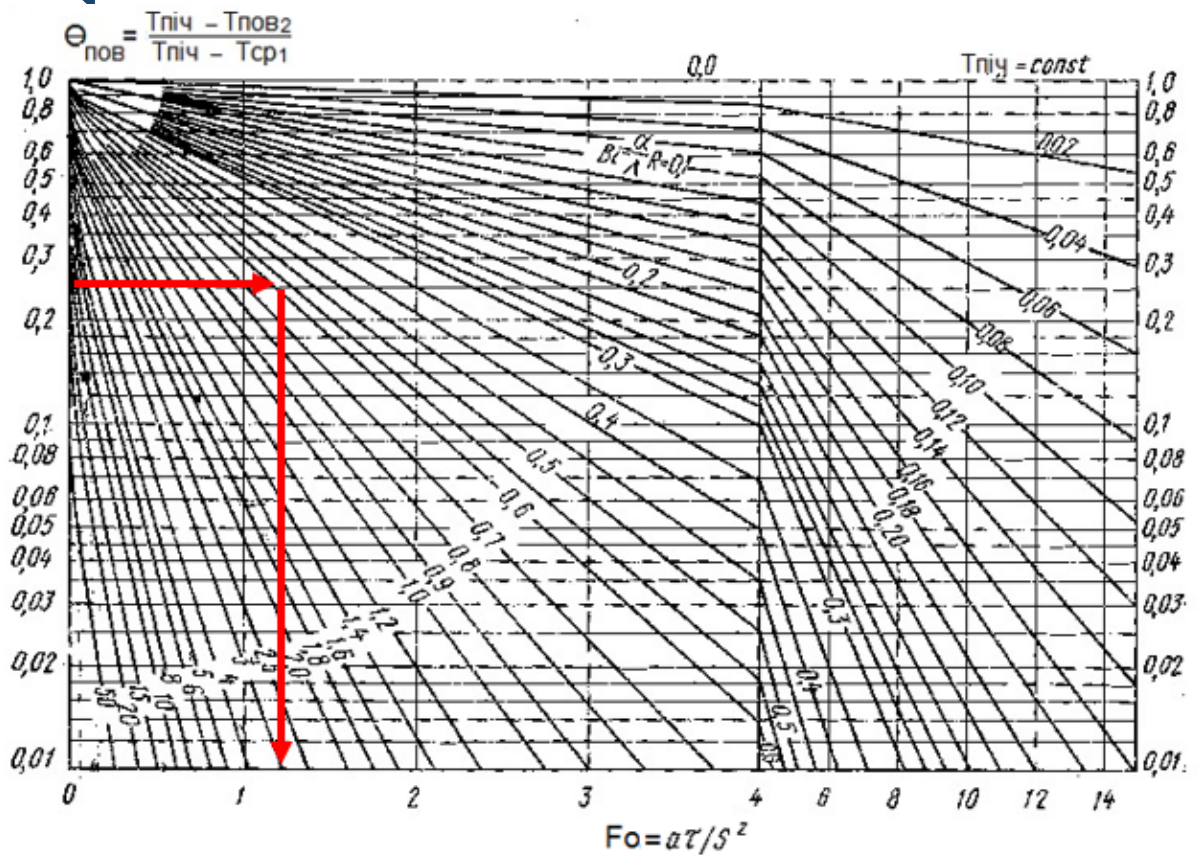


Рис. 1.7. Графік для нагріву (охолодження) поверхні циліндру

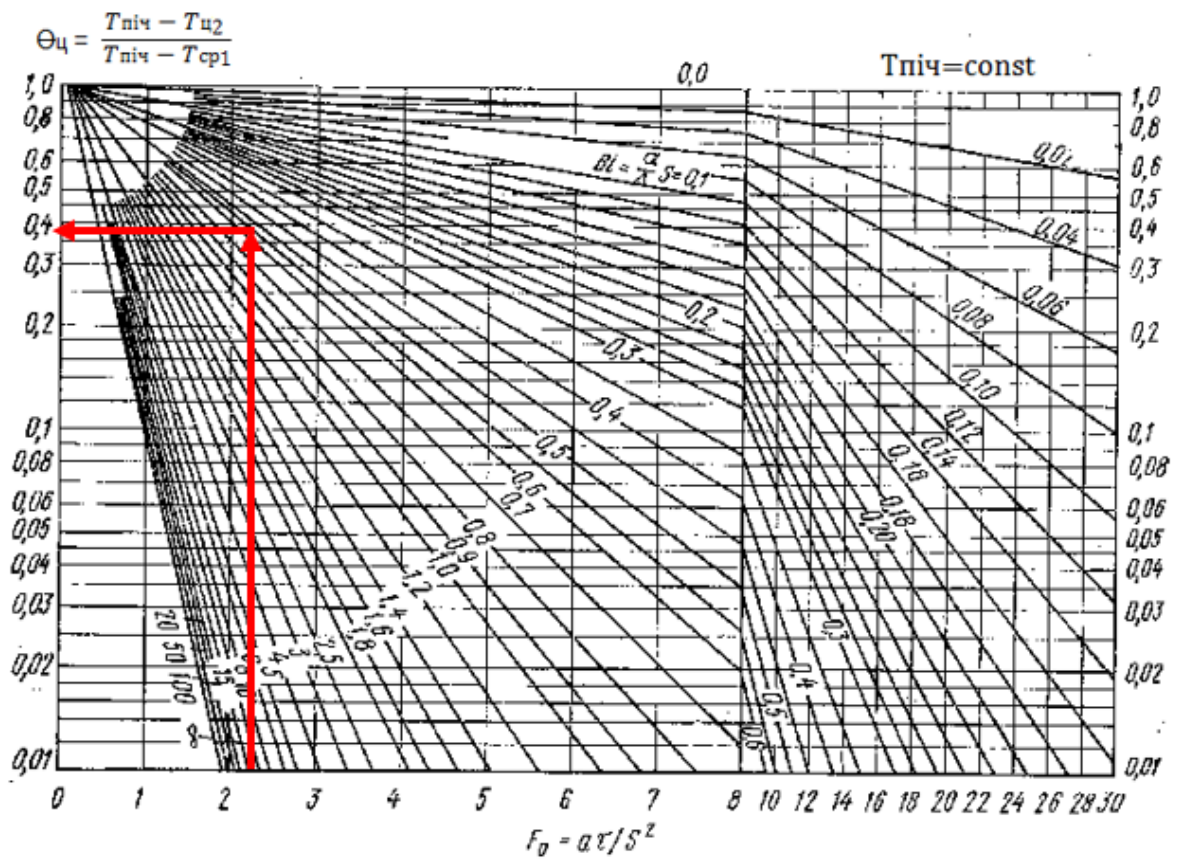


Рис. 1.8. Графік для нагріву (охолодження) центру пластини (плити)

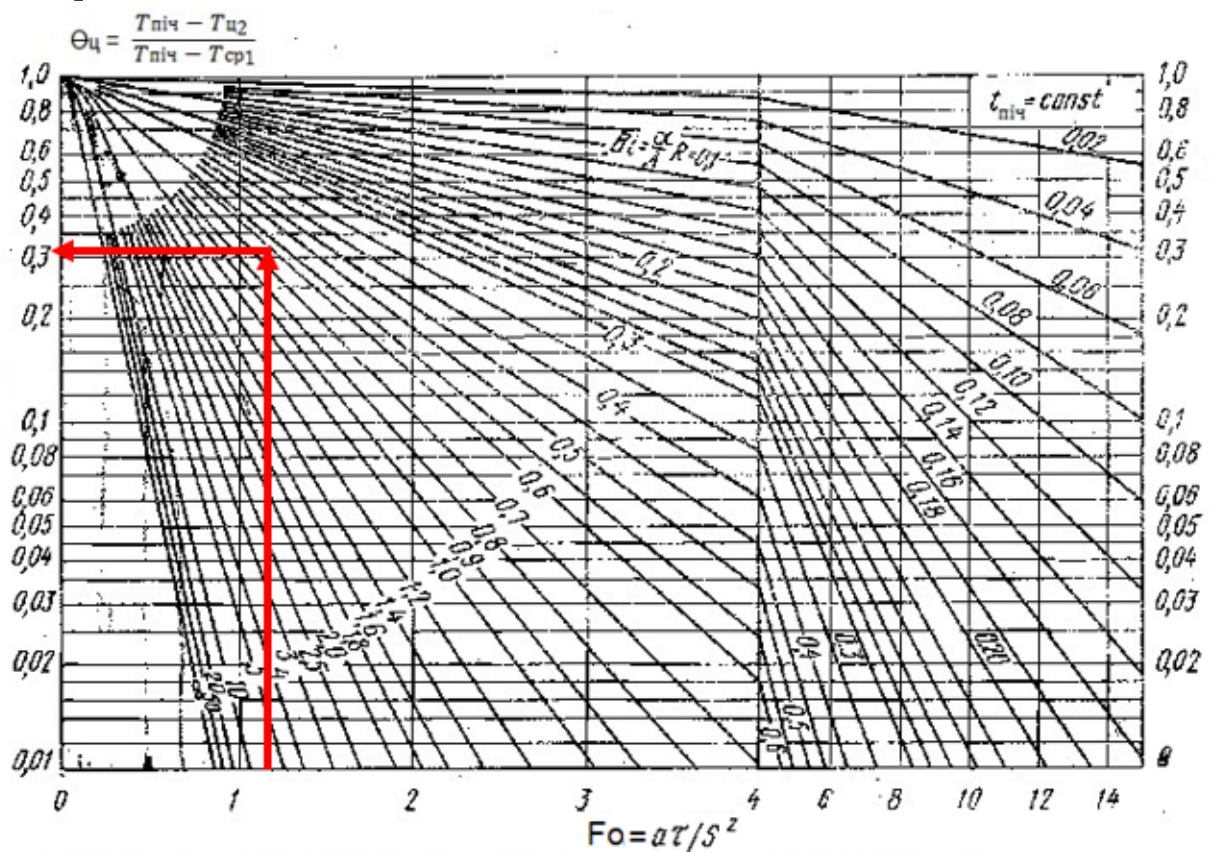


Рис. 1.9. Графік для нагріву (охолодження) центру циліндру

На основі отриманої безрозмірної температури центру заготовки ($\theta_{ц}$) визначити цю температуру таким чином:

$$T_{ц2} = T_{п1ч} - \theta_{ц}(T_{п1ч} - T_{ср1}). \quad (1.23)$$

1.2.4 Довідкові дані і варіанти завдання

Варіанти завдань наведено в табл. 1.2. Щільність сталі прийняти $\rho = 7780 \text{ кг/м}^3$. Слідкуйте за розмірністю величин в розрахункових формулах і в завданні.

Варіанти індивідуального завдання 1.2

№ вар	$T_{пов2}$ (°C)	s (мм)	Форма заготовки	λ (Вт/(м·К))	$T_{пiч}$ (°C)	C (Дж/(кг·°C))	$T_{пов1}$ (°C)	$T_{ц1}$ (°C)	$\epsilon_{пр}$
1	1220	105	плита	48	1300	672	670	1010	0,80
2	1200	85	циліндр	52	1290	630	685	1005	0,83
3	1210	90	плита	46	1300	615	680	1015	0,77
4	1225	100	циліндр	45	1280	600	665	1000	0,75
5	1205	95	плита	44	1290	610	660	995	0,84
6	1215	80	циліндр	48	1285	625	650	990	0,82
7	1205	110	плита	51	1295	635	670	1020	0,79
8	1200	115	циліндр	47	1288	607	675	1025	0,78
9	1240	100	плита	49	1296	612	670	1010	0,76
10	1230	105	циліндр	46	1290	640	685	1005	0,74
11	1225	85	плита	45	1282	632	680	1015	0,85
12	1235	90	циліндр	42	1290	619	665	1000	0,83
13	1275	100	плита	48	1300	621	670	995	0,77
14	1225	95	циліндр	50	1280	600	685	990	0,75
15	1230	80	плита	46	1290	610	680	1020	0,84
16	1200	110	циліндр	45	1285	625	665	1025	0,82
17	1230	115	плита	44	1295	635	660	990	0,79
18	1235	100	циліндр	53	1288	607	650	1020	0,78
19	1215	85	плита	49	1296	612	670	1025	0,76
20	1225	90	циліндр	47	1283	640	675	1010	0,74
21	1245	100	плита	49	1282	632	670	1005	0,77
22	1220	95	циліндр	46	1280	619	685	1015	0,75
23	1200	80	плита	45	1290	621	680	1000	0,84
24	1210	110	циліндр	42	1300	622	665	995	0,82
25	1205	115	плита	43	1280	630	670	990	0,79



2 ІНДИВІДУАЛЬНА РОБОТА №2

Завдання 2.1

Завдання 2.1 присвячено питанням теорії горіння палива, а саме дослідженню процесів займання та горіння газоповітряної суміші в замкнутому об'ємі калориметричної бомби. Такі процеси мають важливе значення для вивчення кінетики хімічних реакцій згорання, визначення енергії активації та швидкості перебігу реакції в адіабатичних умовах.

Основними характеристиками інтенсивності процесу є період індукції, час затримки займання, швидкість наростання тиску та температура в зоні реакції. Отримані результати дозволяють оцінити ефективність згорання паливних сумішей, а також використовуються при розрахунку параметрів камер згорання теплотехнічних і енергетичних установок.

2.1.1 Загальні положення і формулювання завдання

Вивчення процесів займання та горіння газових сумішей є важливою складовою теплотехнічних і хімічних дисциплін, що забезпечують розуміння механізмів перетворення хімічної енергії палива у теплову. У сучасній енергетиці, металургії, хімічній та машинобудівній промисловості ефективність і безпечність роботи теплових установок безпосередньо залежать від точного знання кінетики процесів горіння, а також умов, за яких відбувається запалювання паливних сумішей.

Для теоретичного та експериментального дослідження цих процесів широко застосовуються закриті калориметричні камери (бомби

згоряння) (рис.2.1), які дозволяють створити контрольовані умови для проведення реакції при сталому об'ємі. Така установка забезпечує адіабатичний режим, що дозволяє визначити основні кінетичні параметри реакції – енергію активації, швидкість хімічного перетворення, температуру та тиск під час горіння.

Проведення розрахунку в адіабатичних умовах дозволяє виключити вплив тепловіддачі на стінки та сконцентрувати увагу на внутрішніх процесах тепломасообміну й хімічній кінетиці. Відомо, що швидкість реакції горіння визначається критерієм Арреніуса, а визначальними параметрами є енергія активації та передекспоненційний множник. Ці характеристики визначають інтенсивність протікання реакції та момент, коли температура досягає критичного значення, достатнього для самопідтримуваного горіння.

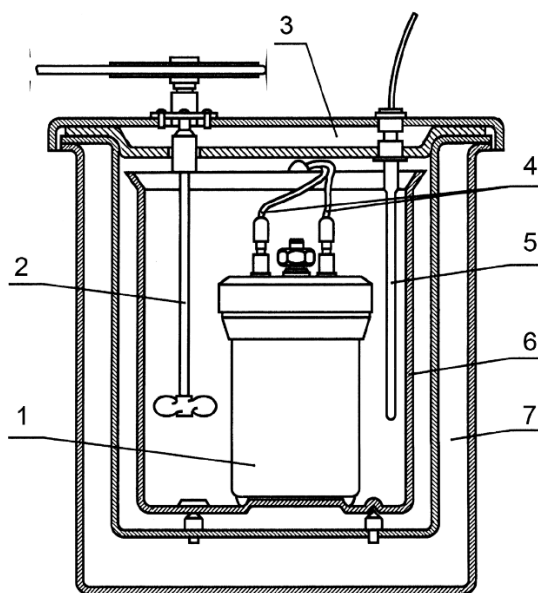



Рис. 2.1. Принципіальна схема класичного калориметра з бомбою спалювання та термостатом для визначення теплоти спалювання твердих палив

1 – калориметрична бомба; 2 – мішалка; 3 – кришка термостату; 4 – контактні дроти ланцюга запалювання; 5 – вимірювач температури; 6 – калориметрична судина; 7 – термостат



У межах даного завдання розглядається модель займання газоповітряної суміші в замкнутому об'ємі калориметричної бомби, де процес описується законами термодинаміки та кінетики реакцій горіння. Особливу увагу приділено впливу початкової температури суміші на характер реакції.

Формулювання завдання. Визначити основні параметри займання та горіння газової суміші в закритій судині з кінетичними характеристиками: енергія активації E , мДж/кмоль, $k_0 = 5 \cdot 10^6 \text{ c}^{-1}$ за адіабатних умов, якщо початкова температура суміші T_{01} , К та T_{02} , К, а теоретична температура горіння T_a , К.

2.1.2 Особливості адіабатного теплового самозаймання

Тепловиділення та саморозігрів реагуючої системи вносить істотні зміни в процес хімічного реагування. За відсутності відведення тепла від реагуючої системи (адіабатний процес) усе тепло, що виділяється в результаті хімічної реакції за час $d\tau$, йде на нагрівання суміші:

$$-Q_p W V d\tau = \rho_0 c_v V dT$$

де V – об'єм посудини, у якій протікає реакція, м³.

В адіабатному процесі внаслідок подібності полів концентрацій і температур диференціальне рівняння, що описує процес самозаймання суміші (якщо вважати його реакцією першого порядку), у безрозмірному вигляді можна записати як

$$\frac{d\theta}{d\xi} = (1 - \theta)e^{-Arr/\theta}$$

— для закритої судини:

$$\frac{d\theta}{d\xi} = (1 - \theta) \frac{\theta_0}{\theta} e^{-Arr/\theta}$$

— для проточної камери з початковими умовами: $\theta = \theta_0$ при $\xi = 0$; $\theta = 1$ при $\xi \rightarrow \infty$.

Час прихованого протікання процесу між початком його (або моментом змішування реагуючих компонентів, або початком нагріву, або моментом впуску суміші в реагуючу камеру - залежно від виду експерименту) і моментом появи зовнішніх ефектів називають періодом індукції (часом індукції). Для кількісного опису цієї величини доцільно пов'язати її з якою-небудь характерною точкою процесу. У якості періоду індукції можна прийняти час досягнення максимального темпу зростання швидкості тепловиділення, тобто максимуму другої похідної температури за часом. Це представлення відповідає фізичному сенсу періоду індукції, оскільки з цього моменту починається різке збільшення швидкості реакції. Розв'язання диференціальних рівнянь на ЕОМ дає такі значення періоду індукції з урахуванням вигорання:

— для закритої судини

$$\xi_a = 0,0125 \exp \frac{Arr}{\theta_0}; \quad (2.1)$$

— для проточної камери

$$\xi_a = 2 \exp \left(0,9 \frac{Arr}{\theta_0} \right). \quad (2.2)$$

Період індукції для закритої судини, розрахований аналітично без урахування вигорання (наближення Д. А. Франк-Каменецького), визначається як

$$\xi'_a = \frac{\theta_0^2 \exp \frac{Arr}{\theta_0}}{(1 - \theta_0) Arr}. \quad (2.3)$$

За досить низьких початкових температур у сумішей з малою реакційною здатністю період індукції може виявитися досить великим. Оскільки за розглянутих (адіабатних) умов підвищення температури можливе тільки за рахунок хімічної реакції, то вигорання пального буде також великим. Чим більша початкова температура або менший критерій Арреніуса, тим меншим буде вигорання. Для того щоб займання відбулося в заданий проміжок часу, з формули (2.1) або (2.2) можна знайти необхідну мінімальну початкову температуру.


Температуру, що відповідає максимуму другої похідної температури за часом, назвемо температурою займання. Вона може вважатися фізико-хімічною константою суміші, оскільки для адіабатних умов не залежить ані від початкової температури, ані від схеми організації процесу. Для займання і в закритій судині, і в проточній камері цю температуру можна обчислити за формулою:

$$\theta_B = 0,6 \exp(0,04 Arr), \quad (2.4)$$

справедливою для сумішей у діапазоні $0,5 < Arr \leq 10$.

Температура в точці перегину температурної кривої, що відповідає максимуму тепловиділення (максимум першої похідної температури за часом), не залежить від початкової температури і дорівнює

$$\theta^* = 0,5 Arr \left(\sqrt{1 + \frac{4}{Arr}} - 1 \right). \quad (2.5)$$



Якщо прийняти за період горіння час різкого зростання температури, то з деяким наближенням він визначається як

$$\xi_{\Gamma} = \frac{1 - \theta_0}{1 - \theta^*} e^{Arr/\theta^*}.$$

Як показують розрахунки, період горіння становить незначну частку процесу займання, так як весь процес реагування визначається переважно періодом індукції, особливо за низьких початкових температурах суміші.

2.1.3 Порядок виконання завдання

1. Визначаємо безрозмірні параметри:

$$\theta_{01} = \frac{T_{01}}{T_a}; \quad \theta_{02} = \frac{T_{02}}{T_a};$$
$$Arr_1 = Arr_2 = \frac{E}{R \cdot T_a}.$$

2. За формулою (2.1) знаходимо період індукції:

$$\xi_{a1} = 0,0125 \exp \frac{Arr}{\theta_{01}}; \quad \tau_{a1} = \frac{\xi_{a1}}{k_0} (c);$$
$$\xi_{a2} = 0,0125 \exp \frac{Arr}{\theta_{02}}; \quad \tau_{a2} = \frac{\xi_{a2}}{k_0} (c).$$

3. За формулою (2.4) знаходимо температуру займання суміші:

$$\theta_{B1} = \theta_{B2} = 0,6 \exp(0,04 \cdot Arr) \quad \text{і} \quad T_B = \theta_B \cdot T_a (K).$$

4. Визначимо за формулою (2.5) температуру в точці максимуму тепловиділення:

$$\theta_1^* = \theta_2^* = 0,5 \cdot Arr \cdot \left(\sqrt{1 + \frac{4}{Arr}} - 1 \right);$$

відповідно $T_1^* = T_2^* = T_a \theta^* (K)$.

За наступною формулою визначимо періоди горіння:

$$\xi_{\Gamma 1} = \frac{1 - \theta_{01}}{1 - \theta^*} e^{Arr/\theta^*}. \quad \tau_{\Gamma 1} = \frac{\xi_{\Gamma 1}}{k_0} (c);$$
$$\xi_{\Gamma 2} = \frac{1 - \theta_{02}}{1 - \theta^*} e^{Arr/\theta^*}. \quad \tau_{\Gamma 2} = \frac{\xi_{\Gamma 2}}{k_0} (c).$$

2.1.4 Довідкові дані і варіанти завдання

Довідкові дані: універсальна газова стала $R=8314$ Дж/(кмоль·К).

Варіанти завдання наведено в табл. 2.1. Слідкуйте за розмірністю величин в розрахункових формулах і в завданні.

Варіанти індивідуального завдання 2.1

Номер варіанту	Е, мДж/кмоль	T ₀₁ , К	T ₀₂ , К	T _a , К
1	50	300	1000	1800
2	60	320	1025	1900
3	70	340	1050	2000
4	80	350	1075	2100
5	90	370	1100	2200
6	100	400	1125	2300
7	110	430	1150	2400
8	120	450	1175	2500
9	130	485	1200	2600
10	140	500	985	2700
11	150	525	975	2800
12	160	550	950	2900
13	170	310	930	3000
14	180	330	1010	3100
15	190	360	850	3200
16	200	385	825	3300
17	195	410	1045	3400
18	185	425	1110	3500
19	175	475	800	3450
20	165	510	1165	3350
21	155	535	1185	3250
22	145	545	940	3150
23	135	365	650	3050
24	125	470	1065	2950
25	115	515	1020	2850



Завдання 2.2

Завдання належить до галузі механіки рідини й газу і полягає в розрахунку сопла Лавалю, яке використовується для формування надзвукового газового потоку в плазмових пальниках, що забезпечують подачу повітря або газової суміші у зону плазмоутворення.

2.2.1 Загальні положення і формулювання завдання

Плазмовий пальник — це теплотехнічна установка, призначена для створення високотемпературного струменя плазми за рахунок електричної енергії (рис.2.4). Основними елементами пальника є електроди, сопло та система подачі робочого газу. Газ (повітря, аргон, азот або водень) проходить крізь електричну дугу, унаслідок чого нагрівається до температур 5000–20 000 K і перетворюється на плазму. Сопло Лавалю в конструкції пальника забезпечує прискорення потоку до надзвукових швидкостей, що дозволяє сформувати вузький стабільний струмінь із високою концентрацією теплової енергії.

Плазмові пальники широко застосовуються в промисловості для різання, зварювання, напилення покриттів, плавлення та очищення матеріалів, а також у енергетичних і екологічних технологіях, наприклад, для утилізації відходів або газифікації палива. Завдяки високій температурі та енергоефективності плазмовий струмінь дає змогу обробляти тугоплавкі матеріали, інтенсифікувати тепломасообмін і здійснювати процеси, які неможливо реалізувати традиційними методами нагріву.

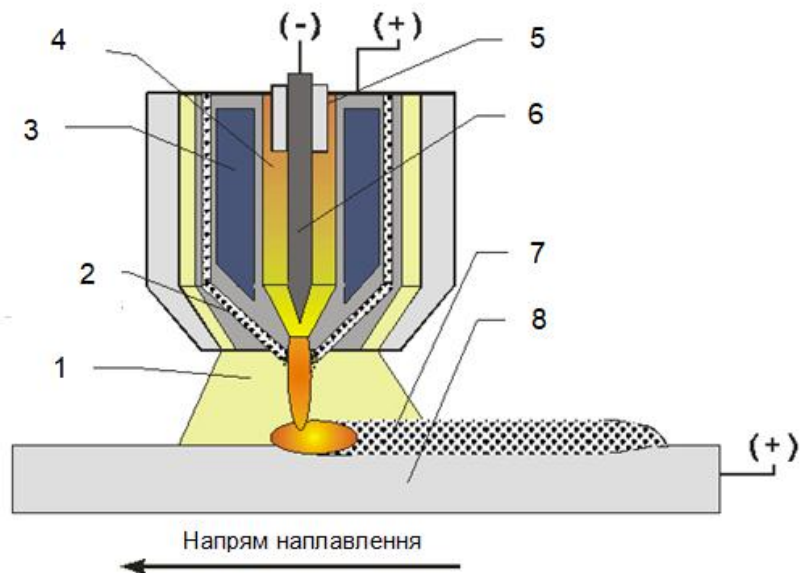


Рис. 2.4. Схема процесу плазмового наплавлення порошком
 1 – захисний газ; 2 – порошок та транспортний газ; 3 – охолодження; 4 – плазмагаз;
 5 – контакт для подавання напруги; 6 – вольфрамовий електрод; 7 – наплавлений шар; 8 – основний метал

Формулювання завдання. Виконати розрахунок сопла Лавалю, як конструктивного елемента плазмового пальника. Отримані результати розрахунку дозволять оцінити ефективність роботи пальника та оптимізувати його теплотехнічні характеристики.

Визначити:

- діаметр сопла в критичному перерізі,
- діаметр сопла в вихідному перерізі дифузора,
- число Маха в вихідному перерізі,
- довжину сопла.

2.2.2 Особливості надзвукового режиму сопла Лавалю

Особливостями сопла Лавалю (рис. 2.5) є форма каналу, що включає області звуження (конфузор) і розширення (дифузор). Отримання надзвукової швидкості на виході із сопла Лавалю F_{out}

потребує, щоб швидкість потоку в критичному перерізі F між конфузором і дифузором дорівнювала локальній швидкості звуку w_s , (м/с) за даної температури t_0 (°C) і тиску P_0 (ат) в камері гальмування.

У дифузорі потік кисню може прискоритися до надзвукової швидкості w , що характеризується числом Маха $M = w/w_s > 1$. Але для здійснення цього є певні умови, які розглянуто нижче.

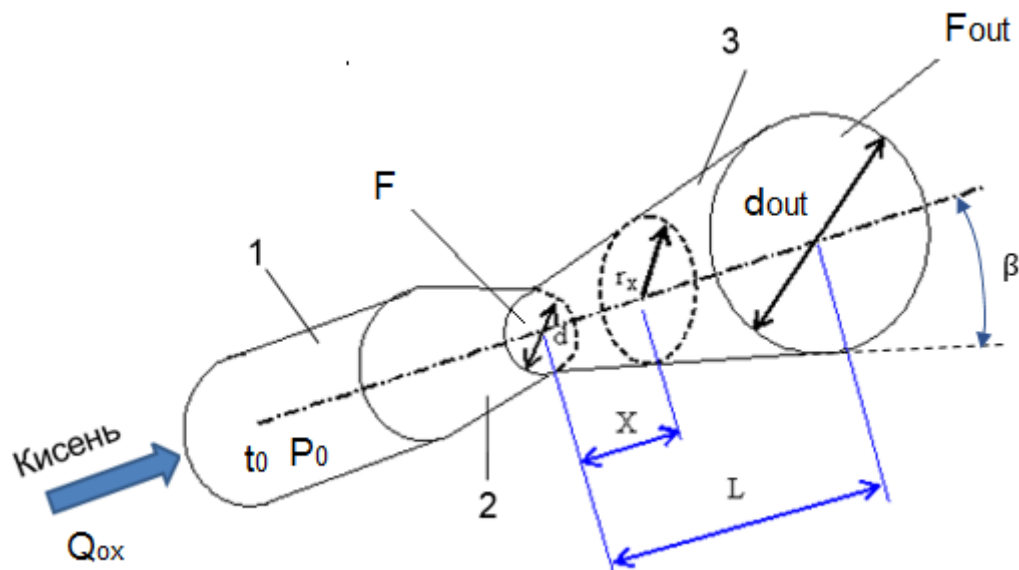


Рис. 2.5. Сопло Лавалля

1 – камера гальмування, 2 – конфузор, 3 – дифузор, F – критичний переріз

2.2.3 Розрахунок діаметру критичного перерізу сопла

Швидкість звуку локальна w_s в критичному перерізі дорівнює (м/с):

$$w_s = \sqrt{\gamma \cdot R(t_0 + 273)/\mu}, \quad (2.6)$$

де $R = 8,31$ – універсальна газова стала (Дж/(моль·К)); $\mu = 0,032$ – молекулярна маса кисню (кг/моль); $\gamma = 1,4$ – показник адіабати кисню.

Щоб таку w_s досягти, діаметр в критичному перерізі d (мм) має бути:

$$d = \sqrt{(4Q_{ox}/3600) \cdot [(t_0 + 273)/(273 \cdot P_0)] / (\pi \cdot w_s)} \cdot 1000, \quad (2.7)$$

де Q_{ox} витрата кисню через фурму згідно технологічному завданню ($\text{м}^3/\text{год}$), P_0 – тиск кисню в камері гальмування дорівнює тиску в магістралі (ат).

2.2.4 Розрахунок діаметру вихідного перерізу сопла

Відповідно до теорії газової динаміки, відношення площі будь-якого довільного перерізу F_x дифузора радіусом r_x (рис. 2.5) до площі критичного перерізу F є функцією числа Маха ($M = w/w_s$). Таким чином $F_x/F = \psi(M)$. Вказана залежність визначається лише числом Маха M і показником адіабати кисню $\gamma = 1,4$:

$$\psi(M) = \frac{1}{M} \cdot \left[1 + \left(\frac{\gamma-1}{2} \right) \cdot M^2 \right]^{\frac{\gamma+1}{2 \cdot (\gamma-1)}} \cdot \left(\frac{2}{\gamma+1} \right)^{\frac{\gamma+1}{2 \cdot (\gamma-1)}}. \quad (2.8)$$

Рішення рівняння (2.8) відносно M дає два корені (рис. 2.6), один з яких відповідає надзвуковому режиму ($M > 1$), інший – дозвуковому. Останній не розглядається, як не відповідний завданню.

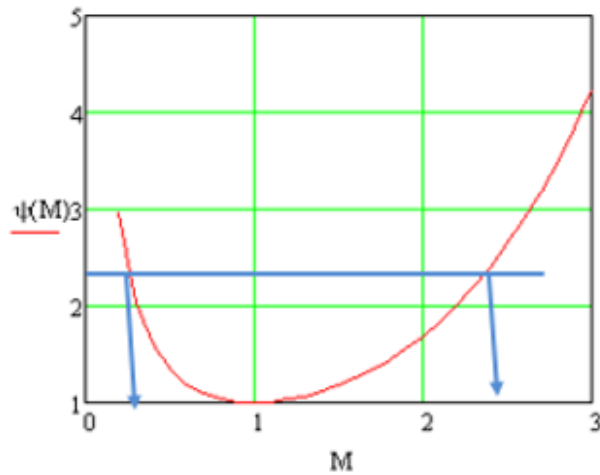


Рис. 2.6. Корені рівняння (2.8)

Щоб реалізувати розрахунковий режим із числом Маха на виході з дифузора $M_{out} > 1$, необхідно виконати умову: статичний тиск на виході з дифузора (P_{out}) дорівнює тиску в робочому просторі печі (для звичайної дугової печі - атмосферному тиску).

Згідно з теорією газової динаміки, тиск на виході з дифузора P_{out} (ат) пов'язаний з тиском P_0 (ат) у камері гальмування (перед критичним перерізом сопла) таким співвідношенням:

$$P_{out}(M_{out}) = \left[\frac{2}{\gamma+1} \cdot \left(1 + \frac{\gamma-1}{2} M_{out}^2 \right) \right]^{\frac{-\gamma}{\gamma-1}} \cdot \left(\frac{2}{\gamma+1} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} \cdot P_0. \quad (2.9)$$

Рівняння (2.9) можна вирішити чисельними методами в пакетах прикладних програм, а також графічним способом (рис. 2.7).

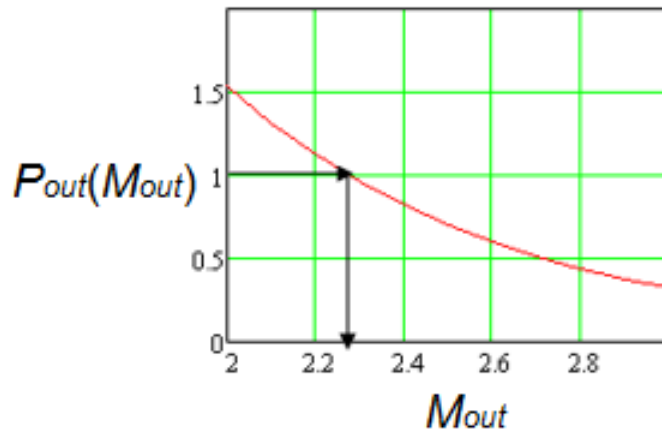


Рис. 2.7. Графічний розв'язок рівняння (2.9)

Згідно графічному розв'язку, щоб статичний тиск кисню на виході з сопла Лавалю P_{out} дорівнював тиску у пальнику (у даному випадку, нормальному атмосферному тиску), число Маха на виході M_{out} має бути приблизно 2,25. Лініями зі стрілками показано порядок дій.

Отримане значення M_{out} слід підставити в рівняння (2.8) і розв'язати його щодо площі вихідного перерізу F_{out} (мм²):

$$F_{out} = \left[\left[1 + \left(\frac{\gamma-1}{2} \right) \cdot M_{out}^2 \right]^{\frac{\gamma+1}{2 \cdot (\gamma-1)}} \cdot \left(\frac{2}{\gamma+1} \right)^{\frac{\gamma+1}{2 \cdot (\gamma-1)}} \right] \cdot \pi \frac{d^2}{4}, \quad (2.10)$$

де d – діаметр сопла Лавалю у критичному перерізі (мм) згідно з рівнянням (2.7).

Тоді, діаметр сопла Лавалю на виході d_{out} становить (мм):

$$d_{out} = \sqrt{4F_{out}/\pi}. \quad (2.11)$$

2.2.5 Профіль сопла і довжина дифузора

Знаючи діаметри вихідного (d_{out}) та критичного (d) перерізів, за практичними рекомендаціями щодо кута розкриття сопла Лавалю $\beta = 4-8$ градусів (рис. 2.5), можна з геометричних міркувань обчислити довжину дифузора сопла L (мм):

$$L = (d_{out} - d) / (2 \cdot \operatorname{tg} \beta). \quad (2.12)$$

Таким чином, всі основні геометричні розміри сопла Лавалю розраховано. Деякі з них, зокрема діаметр і довжина конфузора, не є критичними і встановлюються виходячи з конкретних умов.

2.2.6 Довідкові дані і варіанти завдання

Вихідні дані: робочий тиск пальника 1 ат; витрата, тиск, температура кисню наведено в табл. 2.2.

Довідкові дані: універсальна газова стала 8,314 Дж/(мольК); молекулярна маса кисню 0,032 кг/моль; показник адіабати кисню 1,4.

Варіанти завдань надано в табл. 2.2. Слідкуйте за розмірністю величин в розрахункових формулах і в завданні.

Варіанти індивідуального завдання 2.2

Номер варіанту	Витрата кисню (м ³ /годину (за н.у.))	Тиск кисню в магістралі P_0 (ат).	Температура кисню t_0 (°C)
1	3100	7	30
2	2400	10	32
3	1750	9	25
4	2970	10	27
5	2050	6	20
6	1630	8	25
7	1550	10	30
8	3200	9	32
9	3040	12	32
10	1820	11	30
11	1660	10	25
12	1770	8	30
13	1960	7	32
14	1850	10	25
15	3100	6	27
16	2400	12	20
17	1750	10	25
18	2970	11	30
19	2050	7	34
20	1630	9	32
21	1550	10	30
22	3200	11	25
23	3040	10	20
24	1820	12	27
25	1660	9	22



РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. Біляєва В. В., Бразалук Ю. В., Губін О. І. Практикум з теорії горіння. Дніпро : Ліра, 2024. 52 с.
2. Гусак О. Г., Шарапов С. О., Ратушний О. В. Гідрогазодинаміка : навчальний посібник. Суми : Сумський державний університет, 2022. 296 с.
3. Дреус А. Ю., Лисенко К. Є., Сясев В. О. Збірник задач з тепломасообміну : навчальний посібник. Дніпро, 2016. 124 с.
4. Toulouevski Yu., Zinurov I. Innovation in Electric Arc Furnaces. Scientific Basis for Selection. Berlin : Springer-Verlag, 2010. 258 p.
5. Смірнов О. М., Тімошенко С. М., Нарівський А. В., Семірягін С. В., Осипенко В. В., Скоробагатько Ю. П. Сталь України: відновлення та інновації. НВП Наукова думка, 2023. 267 с.
6. Тепломасообмін : навчально-методичні рекомендації до лабораторних робіт / упоряд.: В. В. Біляєва, А. Ю. Усенко, С. М. Форись; Укр. держ. ун-т науки і технологій. Дніпро : УДУНТ, 2024, 64 с.



Навчально-методичне видання

Біляєва Вікторія Віталіївна

**МЕТОДИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ
до виконання індивідуальних завдань
з дисципліни «Теплотехніка»**

Самостійне електронне мережеве видання

Публікується в авторській редакції