ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»

МЕТОДИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ:

до виконання індивідуальних завдань з дисципліни «Теплотехніка»

Запоріжжя 2024

metinvest polytechnic

УДК 621.1 (072)
М54

Рекомендовано Науково-методичною радою
ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»
(протокол № 1 від 27.09.2024 р.)

Укладач
Тімошенко С. М., д-р техн. наук, професор,
Біляєва В. В., д-р техн. наук, професор,
Мирошниченко С. О.

М54 Методичні рекомендації до виконання індивідуальних завдань з дисципліни «Теплотехніка» (для студентів спеціальності 136 «Металургія» усіх форм навчання першого (бакалаврського) рівня вищої освіти) / уклад.: С. М. Тімошенко, В. В. Біляєва, С. О. Мирошниченко. Запоріжжя : ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА». 2024. 39 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 спеціальності 136 «Металургія» усіх форм навчання першого (бакалаврського) рівня вищої освіти.

УДК 621.1 (072)

© ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА», 2024

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. 7
1.1.3 Максимальна довжина змійовика 9
1.1.4 Температура робочої поверхні панелі 10
1.1.5 Втрати тиску води в панелі 10
1.1.6 Довідкові дані і варіанти завдання 12
Завдання 1.2 14
1.2.1 Загальні положення і формулювання завдання 14
1.2.2 Методика розрахунку нагріву тіла в печі 16
1.2.3 Графічний розв’язок задачі 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 Довідкові дані і варіанти завдання 29
Завдання 2.2 30
2.2.1 Загальні положення і формулювання завдання 31
2.2.2 Особливості надзвукового режиму сопла Лаваля 32
2.2.3 Розрахунок діаметру критичного перерізу сопла 33
2.2.4 Розрахунок діаметру вихідного перерізу сопла 33
2.2.5 Профіль сопла і довжина дифузора 36
2.2.6 Довідкові дані і варіанти завдання 36
РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРА 38

ВСТУП

Освітня компонента «Теплотехніка» є базовим курсом, який сприяє формуванню знань із фундаментальних теоретичних основ теплових машин та енергоустановок, законів взаємного перетворювання різних видів енергії, забезпеченню навичок використання методів тепломасообміну для розв'язку спеціалізованих інженерних задач, пов'язаних з передачею теплової енергії.

Даний курс дає базові знання щодо технічної термодинаміки, теорії тепло- і масообміну, механіки рідини і газу, теорії горіння палива. Предметом вивчення навчальної дисципліни є вивчення процесів перетворення теплової енергії у механічну роботу та навпаки. Опанування дисципліни «Теплотехніка» спрямовано на розв'язок сучасних проблем перенесення теплоти та практичних задач, пов'язаних з тепломасообміном в елементах енергетичного обладнання, а також дозволить підвищити операційну ефективність спеціалістів у справі відродження металургійної галузі шляхом впровадження енергозберігаючих технологій та утилізації вторинних енергоресурсів.

В рамках освоєння дисципліни «Теплотехніка» студентам пропонується виконати індивідуальні завдання, які охоплюють актуальні питання металургійного виробництва і формують загально-інженерний досвід вирішення практичних задач з позицій енергоефективності і екологічного інжинірингу. Представлені методичні рекомендації містять відомості щодо формування завдань, теоретичні відомості з наведенням основних формул та етапів розв'язання. Крім цього наводяться довідкові дані та індивідуальні варіанти завдань. Матеріал даних методичних рекомендацій має на меті підвищити якість виконання роботи та виробити навички розв'язання задач прикладного спрямування.

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 усталеним 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.

1 ІНДИВІДУАЛЬНА РОБОТА №1

Завдання 1.1

Завдання стосується теплового і гідравлічного розрахунків захисної водоохолоджуваної панелі дугової сталеплавильної печі (ДСП).

1.1.1 Загальні положення і формулювання завдання

В сучасних ДСП широко застосовують трубчасті водоохолоджувані захисні панелі стін і зводу (рис. 1.1) взамін цегляної футерівки. Така заміна, попри збільшення витрати енергії через втрати теплоти з водою, є доцільною з огляду економії вогнетривів.

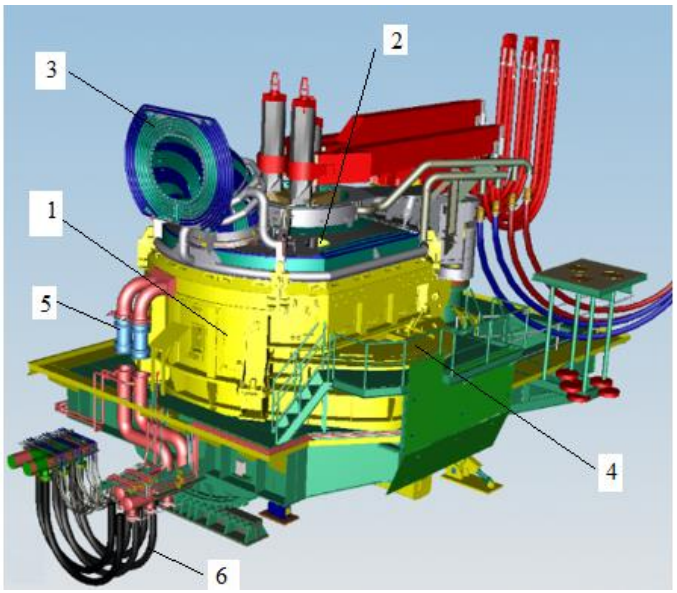

Рис. 1.1. Дугова піч із водо-охолоджуваними елементами
1 – стінові панелі (вище лінії шлаку),
2 – звід (окрім центральної частини),
3 – аспіраційний газохід,
4 – кришка еркера (вузлу випуску),
5 – водяні колектори,
6 – гнучкі шланги.

Схема теплообміну в системі: робочий простір ДСП – захисна водоохолоджувана панель наведена на рис. 1.2.

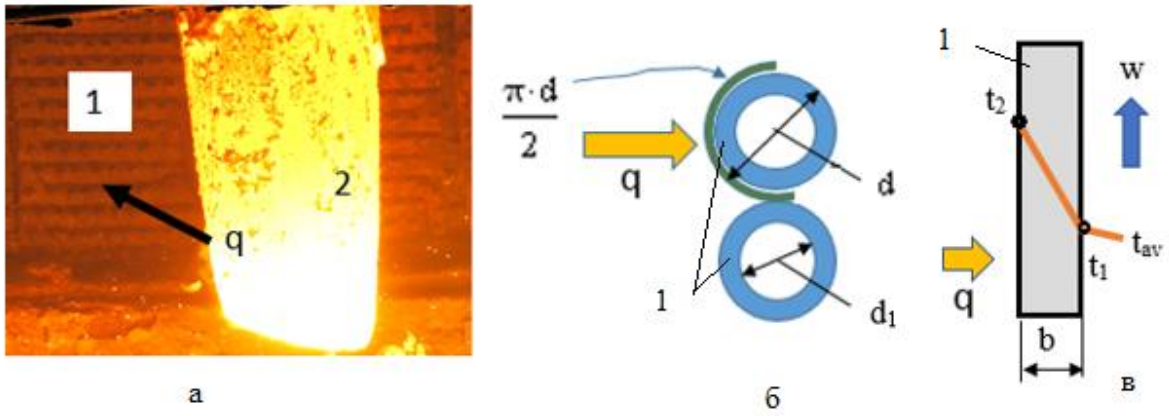

Рис. 1.2. Схема теплообміну в ДСП

а – сприйняття теплового потоку q панеллю; б – відведення теплоти водою;

1 – водоохолоджувана панель (трубчастий змійовик), 2 – графітований електрод

Формулювання завдання. На основі заданого теплового потоку в робочому просторі ДСП 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. Завдання в цілому ставить мету забезпечити експлуатацію панелі у штатному стаціонарному режимі.

1.1.2 Швидкість течії і витрата води у панелі.

Теплообмін стінки труби змійовика 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 $Pr = \rho \cdot C \cdot \nu/\lambda$:

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

де α– коефіцієнт тепловіддачі конвекцією від стінки труби до потоку води (Вт/(м^2·К)), w – швидкість течії води (м/с), q – променевий тепловий потік з робочого простору печі (Вт/м^2), λ – коефіцієнт теплопровідності води (Вт/(м·К)); ν – коефіцієнт кінематичної в'язкості води (м^2/с), ρ – щільність води (кг/м^3), C – теплоємність води (Дж/(кг·К)), d_1, d – внутрішній і зовнішній діаметр змійовика, відповідно (м).

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

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

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

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

d

Швидкість руху води w (м/с), що входить у вираз для числа Р е й н о л ь д с а к р

$=$

λ

α

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

Витрата води в панелі Q (м^3/с) дорівнює добутку швидкості течії води та площі перерізу каналу і становить:

$($ d

t

$$Q = w \cdot \pi d_1^2 /4 \tag{1.5}$$

1 $\cdot$

$-$ ν

t

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 металургійному заводі. За даних умов температуру стінки водяного каналу панелі рекомендують задавати t_1 ≤ 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 ДСП, 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 ДСП 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 (рис. 1.1) через задані тепловий потік з печі q, коефіцієнт теплопровідності труби λ_{pipe} і температуру стінки з боку води t_1 = 75°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 °C, 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, ΔP_{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/с^2).

Умови розрахунку ΔP_{loss} в захисній панелі ДСП 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 $h_{out} > h_{in}$.

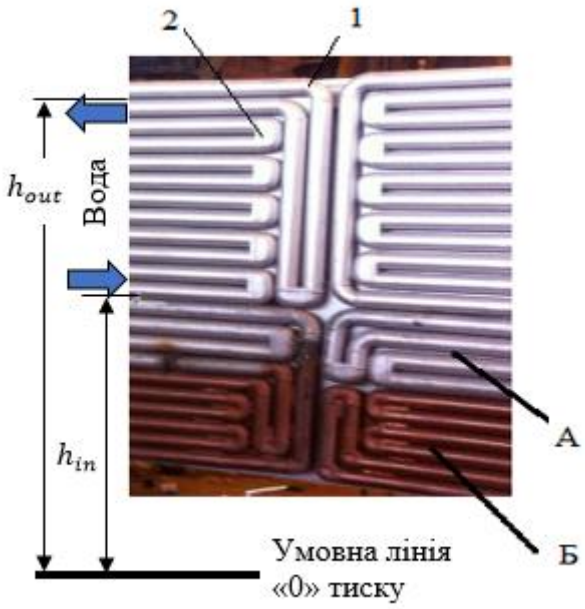

Рис. 1.3. Структура змійовика захисної водоохолоджуваної панелі ДСП і оцінка втрат тиску
А – сталева панель, Б – мідна панель.
1 – місцевий опір – поворот на 90°,
2 – місцевий опір – поворот на 180°.

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 λ = 0,63 Вт/(м·К);
- Теплопровідність сталі Ст20 λ_{pipe} = 39 Вт/(м·К);
- Теплопровідність міді λ_{pipe}= 370 Вт/(м·К);
- Щільність води ρ = 1 т/м^3;

- Теплоємність води C = 4,2 кДж/(кг·К);
- Коефіцієнт кінематичної в’язкості води ν = 10^{-6} м^2/с;
- Коефіцієнт тертя води в трубі μ_{fr} = 0,045;
- Коефіцієнт місцевого опору поворот потоку на 90° ε_{lr}^{i}= 0,22;
- Коефіцієнт місцевого опору поворот потоку на 180° ε_{lr}^{i} = 0,31.

Прийняти в розрахунках: t_1= 75 °С, t_{out} = 55°С, $\Delta P_g = 0$.

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

Таблиця 1.1

Варіанти завдання 1.1

Номер варіан-ту	Тепловий потік q (кВт/м^2)	Діаметр труби d/d_1 (мм)	Кількість місцевих опорів n		Темпера-тура води вихідна t_{in} (°С)	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 стосується нестаціонарного теплообміну і полягає в розрахунку нагріву в методичній печі сталевої заготовки під прокатку.

1.2.1 Загальні положення і формулювання завдання

Завдання пояснюється 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.

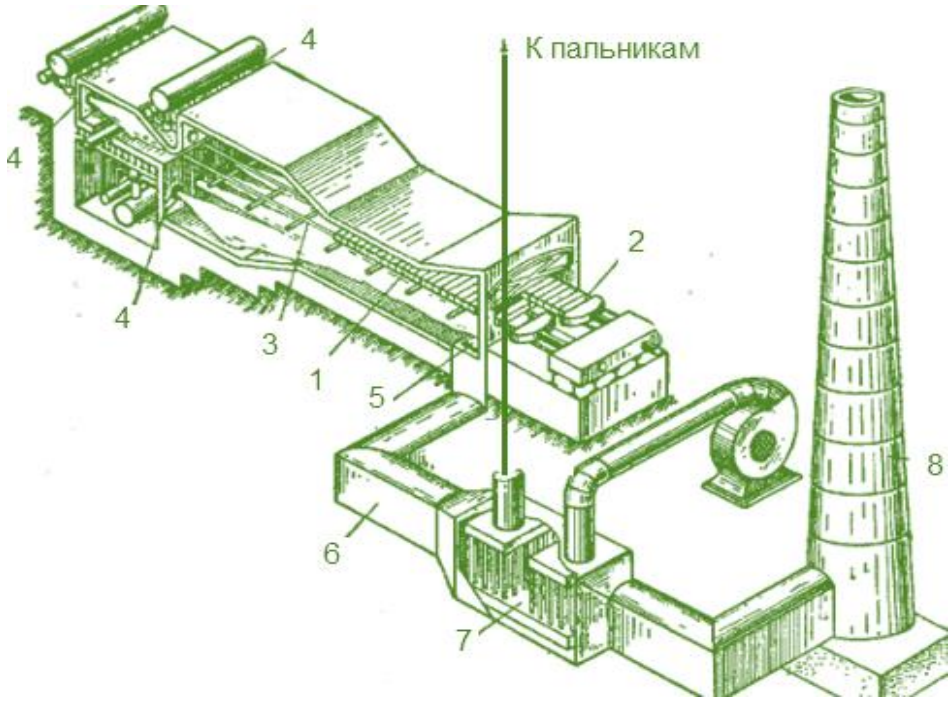

Рис. 1.4. Методична піч для нагріву сталевих заготовок. Позначення в тексті.

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 газо-повітряних 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 основі параметри процесу:

- температура в робочому просторі печі $T_{піч}$ (°С),

- температура поверхні сталевої заготовки перед прокаткою $T_{пов2}$,
- форма заготовки (плита/циліндр діаметром/товщиною s (мм)),
- вихідні температури поверхні $T_{пов1}$ (°С) та осі $T_{ц1}$ (°С) заготовки,
- теплофізичні характеристики сталі (щільність ρ (кг/м^3), коефіцієнт теплопровідності λ (Вт/(м·К)), теплоємність C (Дж/(кг·К)),
- приведений ступінь чорноти печі $\varepsilon_{пр}$.

Необхідно визначити:

- час нагріву τ (с) заготовки до регламентованої перед прокаткою температури поверхні $T_{пов2}$ (°С),
- температуру на осі заготовки по завершенню нагріву $T_{ц2}$ (°С).

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 послідуючого. В учбовому завданні представимо процес одним етапом. Загальна тенденція зміни температури поверхні і центру сталевої заготовки (Т) у часі (τ) в контексті завдання показана на рис. 1.5.

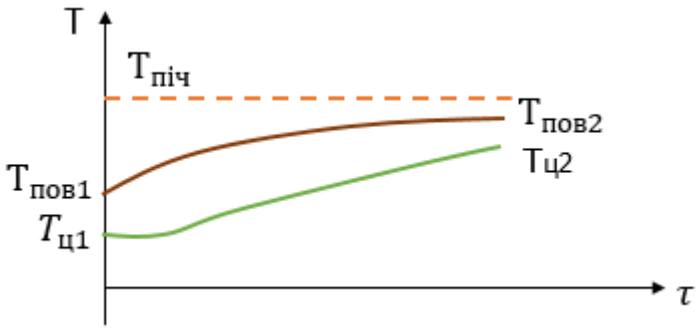

Рис. 1.5. Процес нагріву сталевої заготовки в методичній печі.

Розрахунку нагріву тіла передує визначення променевого теплового потоку q (Вт/м^2) і коефіцієнту тепловіддачі випромінюванням α (Вт/м$^{2\cdot}$К) на початку (індекс 1) та в кінці (індекс 2) інтервалу нагріву:

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

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

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

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

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/м$^{2\cdot}$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 нестаціонарної 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.

К

р

и

т

е

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

$$=$$

$$\alpha$$

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

$$($$

Критерій Фур'єs (Fo) пов'язує час (τ) нагріву тіла з його коефіцієнтом температуропровідності ($\mathrm{a} = \frac{\lambda}{\rho C}$) 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).

$$2$$

$$)$$

$$/$$

$$\lambda$$

При двосторонньому нагріві тіла (рис. 1.4) характерним розміром у виразі числа Фур'є, як і числа Біо, є половина товщини (або діаметру)

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

$$\theta$$

д $$п$$

е $$о$$

$$в$$

$Tср1=Tц1+\gamma|Tпов1-Tц1|/k_т$; $k_т$ – коефіцієнт усереднення температури

по перерізу тіла на початку нагріву. Величина $k_т$ = 3 для плити, $k_т$ = 2 для циліндра.

1.2.3 Графічний розв'язок задачі

За формулами (1.14 – 1.18) для вихідних даних, наведених в табл. нагріву $\bar{\alpha}$ (Вт/м^2·К).

За формулою (1.19), з урахуванням вихідних даних, визначити

За формулою (1.21), з урахуванням вихідних даних, визначити

т

е В

м

п

е

р

а

т

у

р

н

и

й

п

р

о

ф

і

л

ь

Із виразу для Fo визначити час нагріву τ (с) заготовки до вказаної в

τ

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.

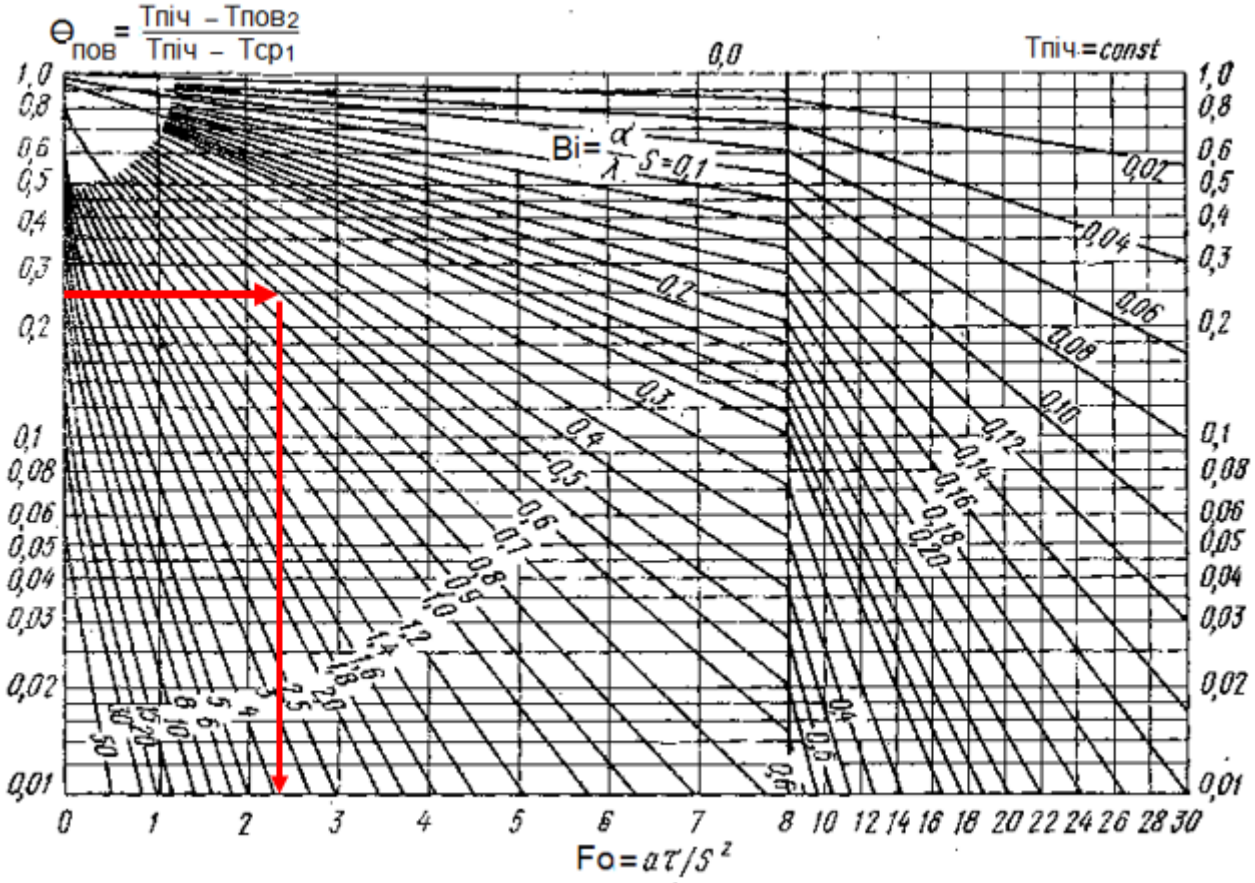

Рис. 1.6. Графік для нагріву (охолодження) поверхні пластини (плити)

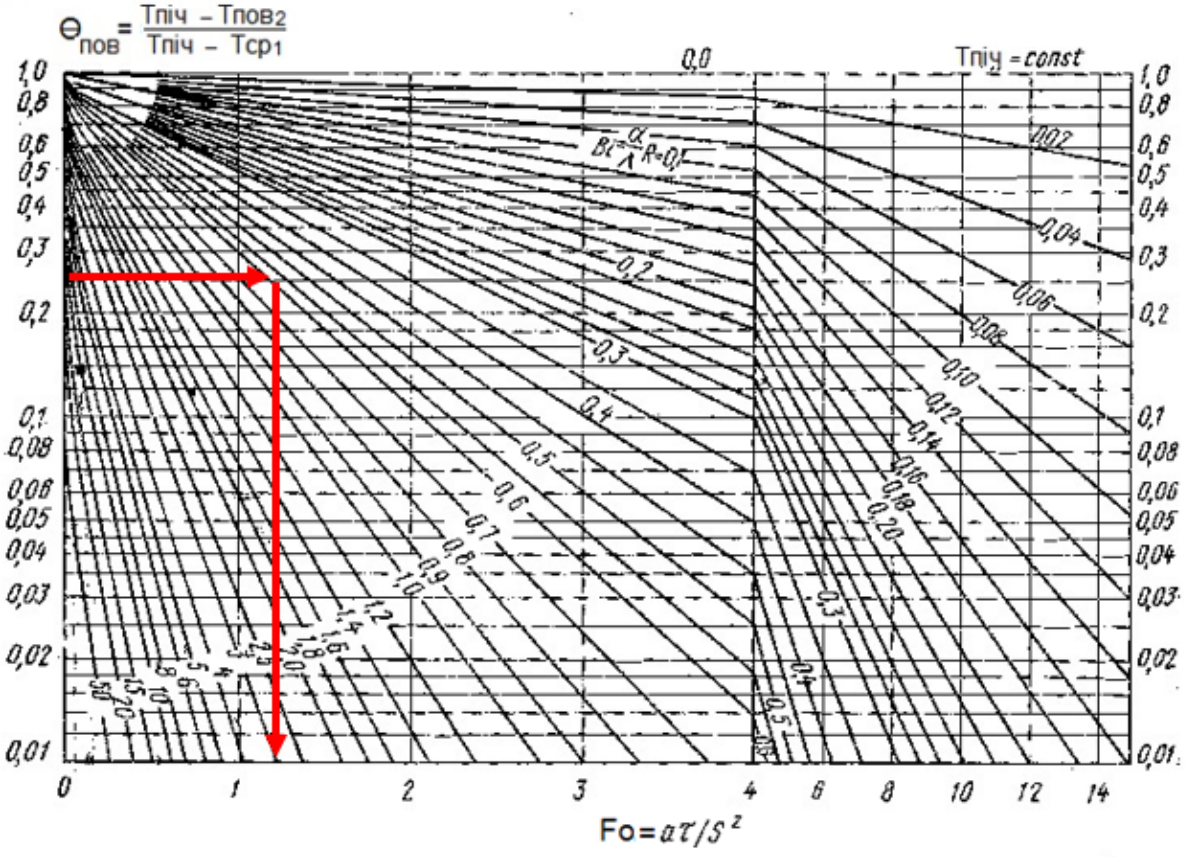

Рис. 1.7. Графік для нагріву (охолодження) поверхні циліндру

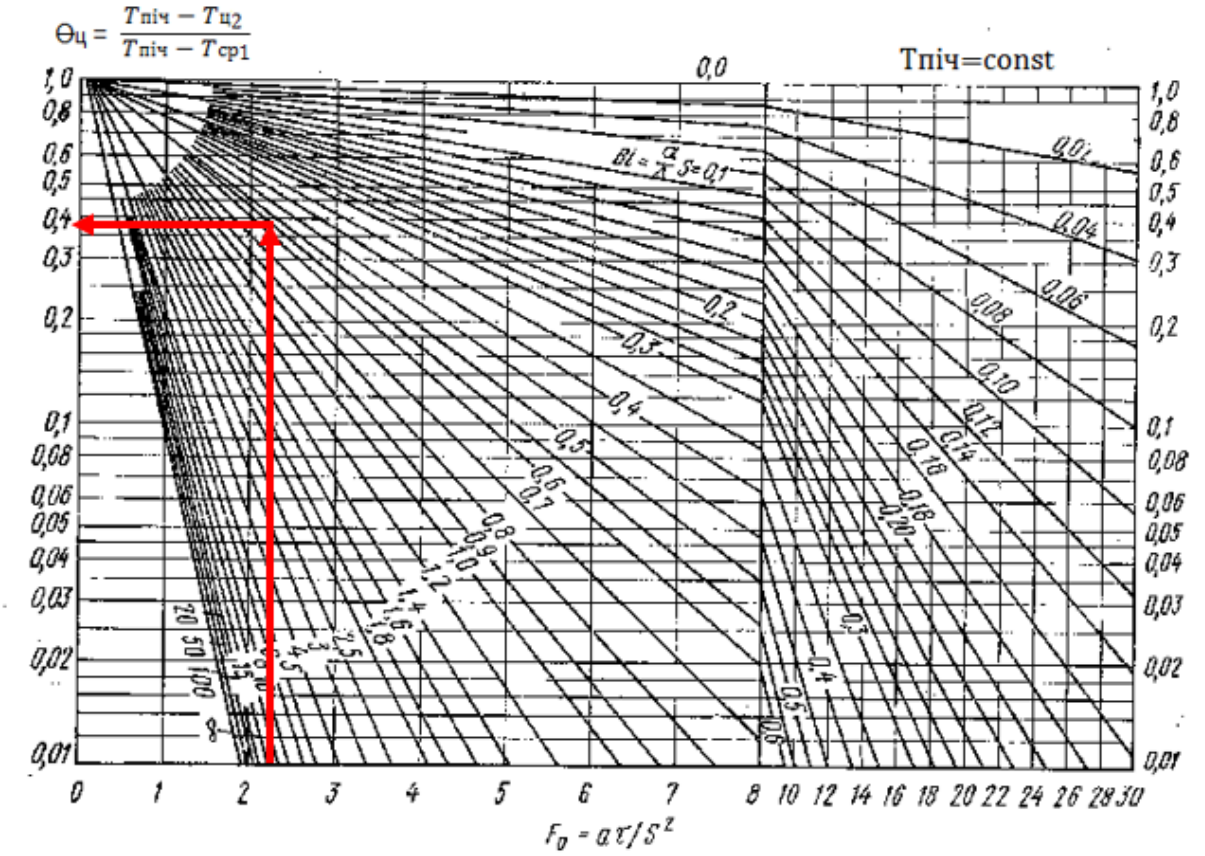

Рис. 1.8. Графік для нагріву (охолодження) центру пластини (плити)

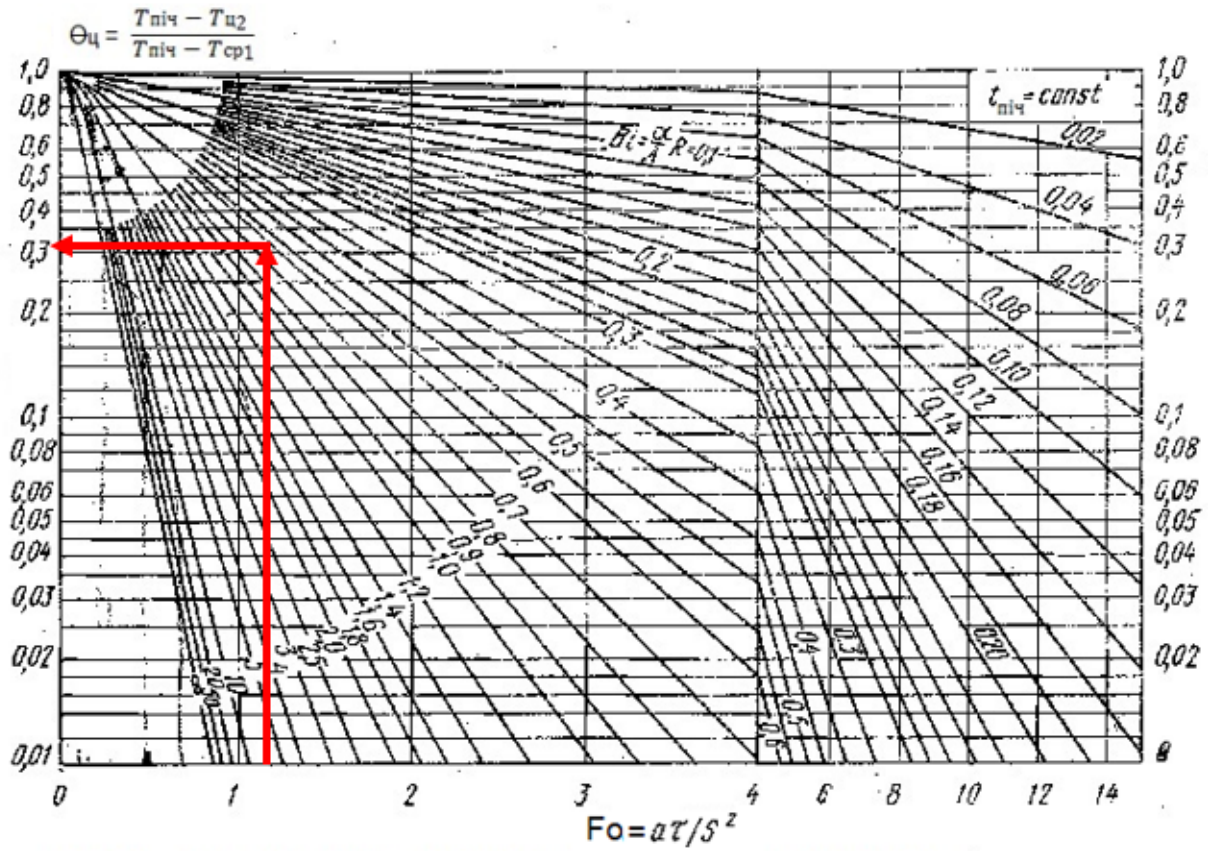

Рис. 1.9. Графік для нагріву (охолодження) центру циліндру

На основі отриманої безрозмірної температури центру заготовки ($\theta_ц$) визначити цю температуру таким чином:

$$T$$

$$ц$$

1.2.4 Довідкові дані і варіанти завдання

$$i$$

Варіанти завдань наведено в табл. 1.2. Щільність сталі прийняти ρ = 7780 кг/м^3. Слідкуйте за розмірністю величин в розрахункових формулах і в завданні.

$$\theta$$

Таблиця 1.2

$$ц$$

$$T$$

Варіанти індивідуального завдання 1.2

№ вар	$T_{пов2}$ (°С)	s (мм)	Форма заготовки	λ (Вт/(м·К))	$T_{піч}$ (°С)	*С* (Дж/(кг·)	$T_{пов1,}$ (°С)	$T_{ц1,}$ (°С)	$ε_{пр}$
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 стосується інтенсифікації процесів тепло- і масообміну в сталеплавильній ванні пристрою ківш-піч (ПКП). Характеристикою інтенсивності таких процесів є потужність перемішування і тривалість усереднення температури і хімічного складу сталі в об’ємі ковшу.

В сучасному сталеплавильному виробництві застосовують пневматичне і електромагнітне перемішування. Найбільш поширеним є пневматичне.

2.1.1 Загальні положення і формулювання завдання

ПКП є універсальним агрегатом позапічної обробки сталі в сталерозливному ківші, відмінна риса якого полягає у використанні електродугового нагріву (як правило, трифазний струм промислової частоти) рідкої ванни у процесі доведення напівпродукту до заданої марки сталі. Прототипи ПКП було створено компаніями ASEA (Швеція, 1964) та «Daido Steel» (Японія, 1971), що отримав назву LF – Ladle Furnace (ковш-піч). Світовою практикою, як інтегрованих металургійних комбінатів, так і малих металургійних заводів (ММЗ) переконливо доведено високу ефективність застосування ПКП у широкому діапазоні місткості сталерозливних ковшів від 6 до 350 т.

В ПКП, за умов відновлювального шлакового режиму, проводять доведення напівпродукту до заданої марки сталі. Процес передбачає десульфурацію, розкислення, легування, модифікування, усереднення хімічного складу й температури сталі. Реалізація електродугового нагріву металу для компенсації втрат теплоти в процесах доведення дає можливість застосування ПКП у якості буферу між плавильним

агрегатом, засобами вакуумної обробки (при наявності) та машини безперервного лиття заготовок (МБЛЗ). Технологічна схема й конструкційне рішення типового ПКП представлено на рис. 2.1.

Головними робочими характеристиками ПКП вважаються швидкість підйому температури (нагріву) сталевої ванни та питома потужність перемішування металу в ковші. Зазначені параметри взаємопов'язані і визначаються як потужністю трансформатору, так і режимом примусового перемішування ванни. Швидкість нагріву сталі в умовах технологічного регламенту застосування ПКП становить зазвичай 3-6 °С за хвилину. Стосовно потужності перемішування (Вт/т) певного регламенту немає, але похідна параметру – тривалість процесу доведення сталі до заданої марки (десульфурація, розкислення, легування, усереднення температури і хімічного складу тощо) у ПКП має забезпечити задану продуктивність сталеплавильного цеху (відділення).

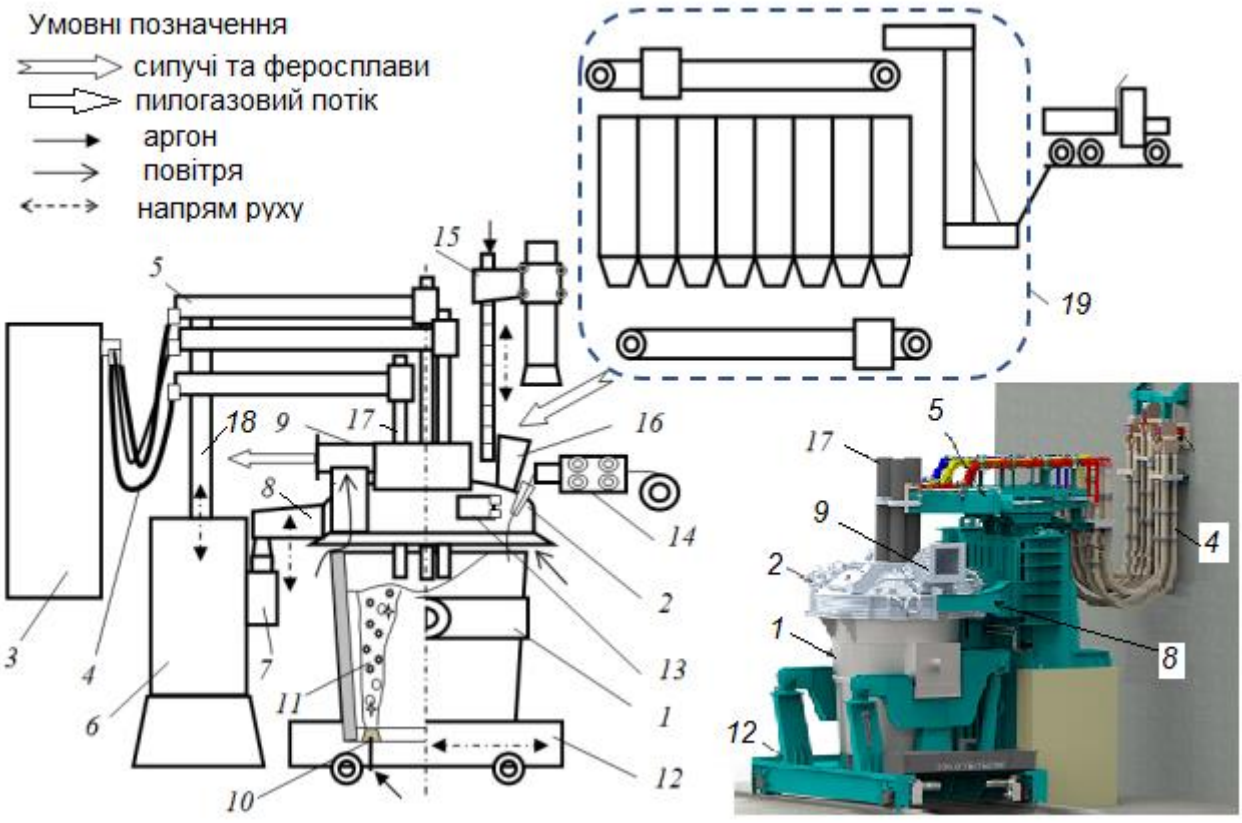

Рис. 2.1. Технологічна схема та загальний вид пристрою ківш-піч

1 – ківш; 2 – кришка водоохолоджувача; 3 – трансформатор; 4 – коротка мережа; 5 – рукав електродотримача; 6 – механізм переміщення електродотримачів; 7 – механізм підйому кришки ковша, 8 – консоль, що тримає кришку; 9 – аспіраційний газохід; 10 – пориста пробка; 11 – газометалева область; 12 – сталевоз; 13 – робоче вікно; 14 – трайб-апарат; 15 – фурма аварійного перемішування сталі; 16 – вирва для присадки домішок в сталь; 17 –електрод; 18 – стійка електродотримача; 19 – система завантаження сипучих та феросплавів

Формулювання завдання. Технологічний регламент позапічної обробки сталі в ПКП потребує забезпечити певну тривалість усереднення металу за температурою та хімічним складом шляхом пневматичного перемішування ванни інертним газом. На основі вихідних даних: регламентований час усереднення τ (хвилин); глибина ванни H (м); маса металу у ковші M (т); температура металу T (^{0}C), наведених в табл. 2.1, визначити необхідну витрату аргону Q (м^3/с за нормальних умов) через пористу донну пробку ковшу.

2.1.2 Особливості пневматичного перемішування рідкої сталі

Процес пневматичного перемішування розплаву забезпечується продувкою сталеплавильної ванни аргоном з витратою Q_0 (м^3/с) через пористу пробку в подині печі (рис. 2.2). У процесі масового спливання бульбашок (барботаж) в рідкому розплаві утворюється двофазна область з відносним вмістом газу φ і кутом розкриття γ.

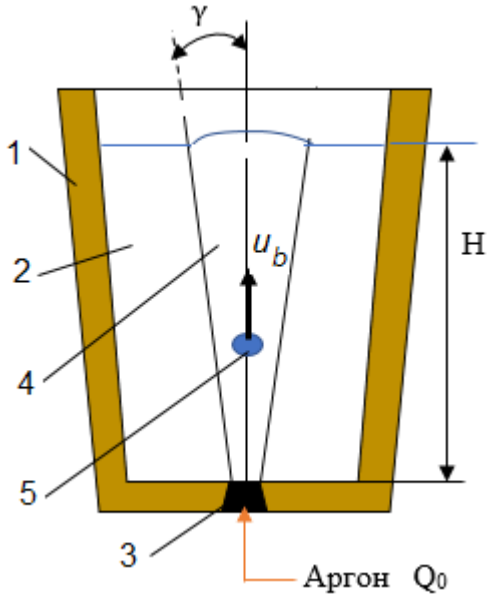

Рис. 2.2. Схема пневматичного перемішування сталі в ковші
1 – ківш,
2 – сталева ванна, 3 – пориста пробка,
4 – двофазна область, 5 – газова бульбашка

Емпіричні залежності щодо середнього еквівалентного діаметру газової бульбашки d_b (м), швидкості спливання бульбашок в рідкій сталі u_b (м/с), згідно з сучасними дослідженнями, мають вигляд:

$$d_b = 0,35\left[\alpha Q_0^2 / g\right]^{0,2}, \tag{2.1}$$

$$u_b = 1,02\sqrt{g\left(d_b / 2\right)}, \tag{2.2}$$

де α – коефіцієнт приведення витрати аргону до робочих умов сталеплавильної ванни глибиною H (м) за тиском й температурою, g –прискорення сили тяжіння (м/с^2).

Робота пневматичного перемішування рідкої сталі L_{ps} (Дж) забезпечується силами тертя при спливанні газових бульбашок в рідкій сталі і дорівнює роботі ізотермічного розширення газового об'єму від V_1 до V_2 (м^3) при вихідному тиску P (Па):

$$L_{ps} = \int_{V_1}^{V_2} PdV = (PV = \frac{\rho_g VRT_m}{\mu}) = \frac{\rho_g VRT_m}{\mu}\int_{V_1}^{V_2}\frac{dV}{V}, \tag{2.3}$$

де ρ_g щільність інертного газу (кг/м^3); R – універсальна газова стала (Дж/кмоль·K); T_m – температура сталі в ковші (K); μ – молекулярна маса інертного газу (кг/кмоль).

Потужність пневматичного перемішування N_{ps} (Вт/т) визначається як робота ізотермічного розширення об'єму інертного газу, що вдувають в ванну в одиницю часу Q_0 (м^3/с при н.у.).

$$N_{ps} = \rho_g Q_0 R T_m ln(1 + H/1{,}48)/(M \cdot \mu), \quad (2.4)$$

де 1,48 – гідростатична висота стовпа рідкої сталі (м); M – маса сталі (т).

Тривалість усереднення τ (с) за умов сталерозливного ковшу можна визначити, зокрема, за відомою емпіричною залежністю K. Nakanishi від потужності пневматичного перемішування N_{ps} (Вт/т):

$$\tau = 800 \cdot N_{ps}^{-0,4}. \quad (2.5)$$

Із рівнянь (2.4), (2.5) нескладно отримати розрахункову формулу для знаходження витрати інертного газу Q_0, що має забезпечити заданий технологічним регламентом час усереднення у завданні.

Приклад розрахунку потужності перемішування за рівнянням (2.4) та часу усереднення сталі за рівнянням (2.5) при варіюванні витрати інертного газу Q_0 і глибини сталевої ванни H за умов T_m = 1870 К показано на рис. 2.3.

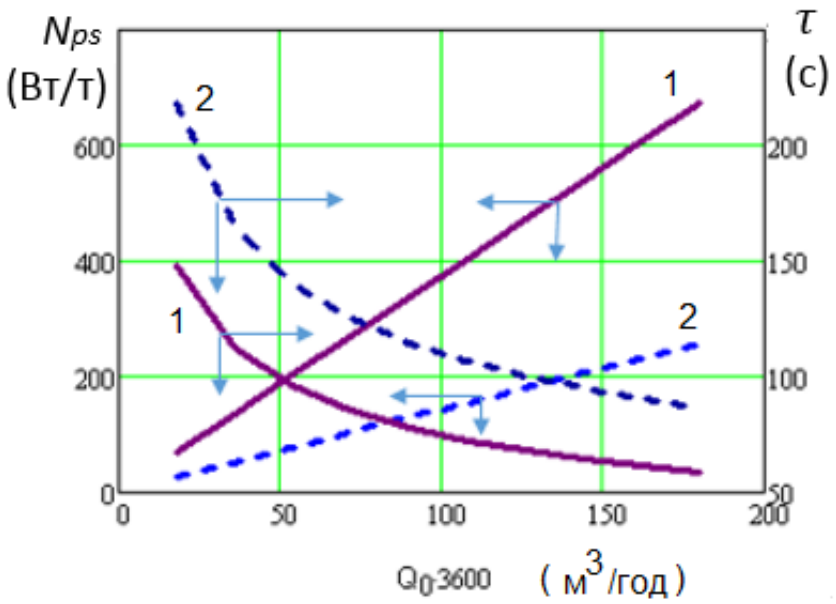

Рис. 2.3. Потужність перемішування N_{ps} та час усереднення τ сталі в ковші в залежності від витрати інертного газу Q_0

Криві з індексом 1 належать до глибини ванни H = 2 м, з індексом 2 – до H = 3 м.

Аналізуючи наведені на рис. 2.3 дані, можна стверджувати що зростання витрати інертного газу і збільшення глибини ванни сприяють зростанню потужності перемішування та зменшенню часу усереднення сталеплавильної ванни за температурою і хімічним складом.

Однак, наведені розрахункові формули придатні для оцінки параметрів перемішування за умов бульбашкового режиму продувки ванни. Перехід к струменевому режиму при підвищених Q_0 (порогова витрата газу залежить від діаметру пористої пробки і глибини ванни) різко знижує ефективність процесів тепломасообміну. Такого режиму на практиці слід уникати.

2.1.3 Довідкові дані і варіанти завдання

Довідкові дані: молекулярна маса газу 40 кг/кмоль, густина газу за нормальних умов 1,78 кг/м^3, універсальна газова стала 8314 Дж/(кмоль·К).

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

Таблиця 2.1

Варіанти індивідуального завдання 2.1

Номер варіанту	τ (хвилин)	M (т)	T (°C)	H (м)
1	5	120	1590	3,2
2	9	300	1585	4,5
3	6	150	1595	3,45
4	7	50	1600	2,6
5	9	160	1580	3,35
6	8	65	1590	2,7
7	10	30	1605	2,0
8	12	75	1600	2,8
9	11	320	1585	4,7
10	5	100	1585	3,1
11	9	110	1595	3,1
12	10	65	1600	2,75
13	7	30	1580	1,95
14	9	75	1580	2,8
15	8	60	1590	2,7
16	6	300	1575	4,4
17	12	180	1600	3,45
18	11	50	1585	2,55
19	5	160	1595	3,3
20	12	120	1580	3,2
21	6	300	1575	4,4
22	7	180	1585	3,4
23	9	25	1610	1,85
24	8	55	1595	2,15
25	10	60	1600	2,2

Завдання 2.2

Завдання стосується механіки рідини й газу і полягає в розрахунку сопла надзвукової фурми для продувки рідкої сталі киснем в конвертері і дуговій печі. Основним елементом такої фурми є сопло Лаваля.

2.2.1 Загальні положення і формулювання завдання

Продувка сталеплавильної ванни киснем широко застосовується в конвертерному і електросталеплавильному виробництві (рис. 2.4) для інтенсифікації процесів тепломасообміну і впровадженню хімічної енергії окислення елементів сталевої ванни в технологічний процес.

Надзвуковий режим продувки вважається необхідною умовою забезпечення глибокого проникнення кисневого струменю в рідку сталь. Струмінь формує кратер в ванні і створює потік вторинних бульбашок CO, що збільшують міжфазну поверхню і сприяють інтенсифікації технологічного процесу.

Рис. 2.4. Надзвукові фурми в робочому просторі дугової печі

Формулювання завдання. Виконати розрахунок сопла Лаваля надзвукової кисневої фурми дугової сталеплавильної печі, що працює за інтенсивною технологією.

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 Лаваля

Особливостями сопла Лаваля (рис. 2.5) є форма каналу, що включає області звуження (конфузор) і розширення (дифузор). Отримання надзвукової швидкості на виході із сопла Лаваля 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 (°С) 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.

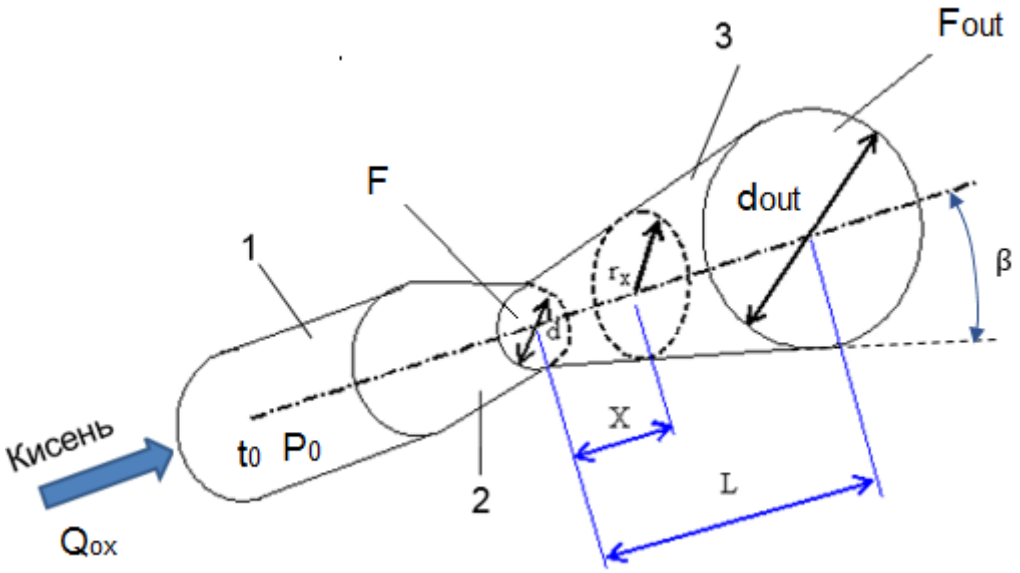

Рис. 2.5. Сопло Лаваля

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)); μ = 0,032 – молекулярна маса кисню (кг/моль); γ = 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 (м^3/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 γ = 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.

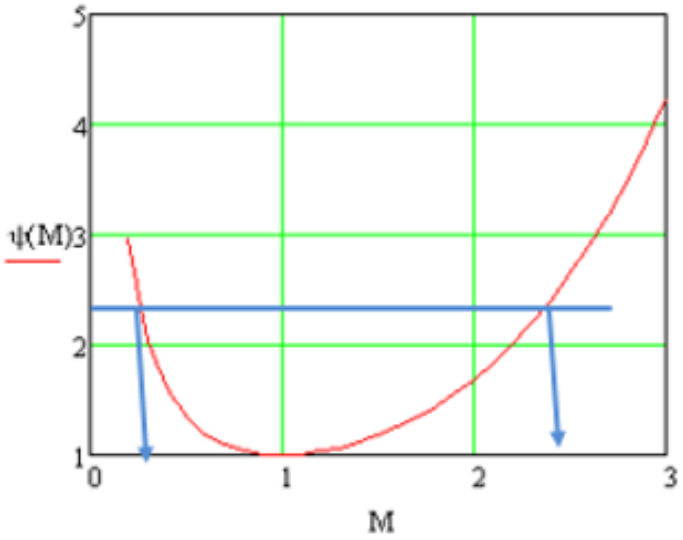

Рис. 2.6. Корені рівняння (2.8)

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:

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

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

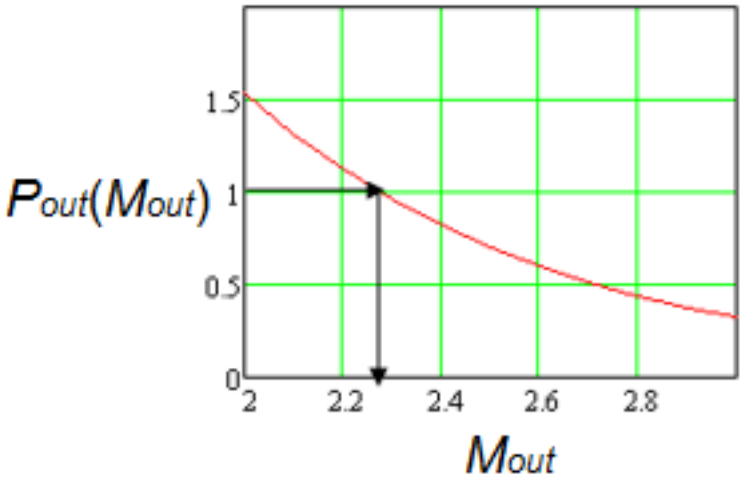

Рис. 2.7 Графічне рішення рівняння (2.9)

Згідно графічному розв'язку, щоб статичний тиск кисню на виході з сопла Лаваля P_{out} дорівнював тиску в робочому просторі печі (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} (мм^2):

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

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

Тоді, діаметр сопла Лаваля 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 Лаваля β = 4-8 градусів (рис. 2.5), можна з геометричних міркувань обчислити довжину дифузора сопла L (мм):

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

Таким чином, всі основні геометричні розміри сопла Лаваля 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: тиск в робочому просторі печі 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.

Таблиця 2.2

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 (°С)
1	3100	16	30
2	2400	10	32
3	1750	12	25
4	2970	16	27
5	2050	10	20
6	1630	12	25
7	1550	16	30
8	3200	10	32
9	3040	12	32
10	1820	16	30
11	1660	10	25
12	1770	12	30
13	1960	16	32
14	1850	10	25
15	3100	12	27
16	2400	16	20
17	1750	10	25
18	2970	12	30
19	2050	16	34
20	1630	10	32
21	1550	12	30
22	3200	16	25
23	3040	10	20
24	1820	12	27
25	1660	10	22

РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. Біляєва В. В., Бразалук Ю. В., Губін О. І. Практикум з теорії горіння. Дніпро : Ліра, 2024. 52 с.
2. Дреус А. Ю., Лисенко К. Є., Сясев В. О. Збірник задач з тепломасообміну : навчальний посібник. Дніпро, 2016. 124 с.
3. Toulouevski Yu., Zinurov I. Innovation in Electric Arc Furnaces. Scientific Basis for Selection. Berlin : Springer-Verlag, 2010. 258 p.
4. 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.
5. Тепломасообмін : навчально-методичні рекомендації до лабораторних робіт / упоряд.: В. В. Біляєва, А. Ю. Усенко, С. М. Форись. Дніпро : УДУНТ, 2024. 64 с.

Навчально-методичне видання

Тімошенко Сергій Миколайович

Біляєва Вікторія Віталіївна

Мірошниченко Сергій Олександрович

МЕТОДИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ
до виконання індивідуальних завдань
з дисципліни «Теплотехніка»

Самостійне електронне мережеве видання

Публікується в авторській редакції