

**А.Ф.Будник, В.Б.Юскаєв**

**ЕНЕРГЕТИКА ОБЛАДНАННЯ  
ТЕРМІЧНИХ ЦЕХІВ І ДІЛЬНИЦЬ**

Навчальний посібник

Рекомендовано Міністерством освіти і науки України

Суми  
«Видавництво СумДУ»  
2010

УДК 658.26:621.78(075.8)

ББК 34.61я7

Б-90

Рецензенти:

*В.Б.Тарельник* – доктор технічних наук, професор Сумського національного аграрного університету;

*О.Д.Погребняк* – доктор фізико-математичних наук, професор Сумського інституту модифікації поверхні;

*О.Р.Якуба* – доктор технічних наук, професор Сумського національного аграрного університету

*Рекомендовано Міністерством освіти і науки України  
як навчальний посібник для студентів вищих навчальних закладів  
(лист № 1.4/18-Г-2933 від 30.12.2008 р.)*

**Будник А.Ф.**

Б-90 Енергетика обладнання термічних цехів і дільниць:  
навч. посіб. /А.Ф.Будник, В.Б.Юскаєв. – Суми: Вид-во  
СумДУ, 2010. –246 с.  
ISBN 978-966-657-277-9

У посібнику розглянуто основні види палива та енергії для використання в термічних печах і установках. Наведено основні пристрої для спалювання палива. Розглянуто основи механіки пічних газів та рух газів у печах і установках. Викладено основи теплопередачі та характеристики процесів теплопередачі відповідно до роботи термічного обладнання цехів та дільниць і їх інтенсифікації.

Розглянуто питання нагрівання металу у печах, питання захисту металу під час нагрівання та раціональної технології його нагрівання.

Особливу увагу приділено питанням вибору вогнетривких і теплоізоляційних матеріалів для забезпечення економічних показників технології нагрівання та екологічної безпеки. Розглянуто питання утилізації теплоти продуктів згоряння.

Наведені класифікація і загальна характеристика теплової роботи печей. Для студентів-матеріалознавців III-IV рівнів акредитації під час вивчення дисципліни «Обладнання термічних цехів та дільниць» і виконання курсових, комплексних проєктів, випускних кваліфікаційних та самостійних робіт студентами з дисциплін навчального плану спеціальності напряму 0901.

**УДК 658.26:621.78(075.8)**

**ББК 34.61я7**

ISBN 978-966-657-277-9 © А.Ф. Будник, В.Б.Юскаєв,2010

## ЗМІСТ

	С
Вступ.....	6
Розділ 1. Види палива та енергії, їх використання у термічних печах і установках. Характеристика палива.....	8
1.1. Визначення і класифікація палива.....	8
1.2. Хімічний склад палива.....	9
1.3. Теплота згоряння палива.....	13
1.4. Тверде, рідке й газоподібне паливо.....	17
Розділ 2. Основи теорії горіння і розрахунки горіння палива.....	22
2.1. Характеристика процесів горіння.....	22
2.2. Розрахунок горіння палив.....	28
Розділ 3. Пристрої для спалювання палив.....	34
3.1. Спалювання твердого палива.....	34
3.2. Форсунки для спалювання рідкого палива.....	35
3.3. Пальники для спалювання газу.....	37
Розділ 4. Використання електричної енергії в печах і установках.....	47
4.1. Типи електропечей.....	47
4.2. Нагрівальні елементи опору.....	48
4.3. Електрична дуга.....	52
4.4. Електронно-променеє нагрівання.....	56
Розділ 5. Основи механіки пічних газів. Статика і динаміка газів.....	63
5.1. Поняття про механіку газів.....	63
5.2. Визначення тиску.....	65
5.3. Рівняння Бернуллі.....	67
5.4. Визначення втрат тиску.....	68
5.5. Витікання газів через отвори.....	68
Розділ 6. Рух газів у печах і установках.....	73
6.1. Струмінний рух газів.....	73
6.2. Рух газів у робочому просторі печей і установок.....	78
6.3. Пристрої для створення тяги в печах.....	81

6.4. Поняття теорії подібності під час проектування печей і установок.....	83
Розділ 7. Основи теплопередачі. Характеристика процесів теплопередачі.....	86
7.1. Температурне поле.....	86
7.2. Види теплопередачі.....	89
Розділ 8. Теплопровідність.....	91
8.1. Основний закон теплопровідності.....	91
8.2. Теплопровідність плоскої стінки.....	92
8.3. Теплопровідність циліндрової стінки.....	96
8.4. Нестационарна теплопровідність.....	97
Розділ 9. Конвекція.....	101
9.1. Поняття конвекції.....	101
9.2. Конвекція при вільному русі.....	102
9.3. Конвекція при вимушеному русі.....	103
Розділ 10. Теплове випромінювання.....	109
10.1. Поняття випромінювання.....	109
10.2. Основні закони теплового випромінювання.....	111
10.3. Теплопередача випромінювання між твердими тілами.....	114
10.4. Випромінювання газів.....	119
10.5. Випромінювання в індукційних печах.....	124
Розділ 11. Процеси теплопередачі в печах.....	125
11.1. Теплопередача від одного газу до іншого через стінку.....	125
11.2. Інтенсифікація теплопередачі.....	127
Розділ 12. Нагрівання металу. Взаємодія металу з атмосферою печі.....	129
12.1. Окиснення і знеуглецювання металу.....	129
12.2. Захисні атмосфери.....	132
12.3. Установки для приготування захисних атмосфер.....	135
Розділ 13. Розрахунок нагрівання металу.....	139
13.1. Тонкі й масивні тіла.....	139
13.2. Нагрівання тонких тіл.....	140
13.3. Нагрівання масивних тіл.....	143
13.4. Основи раціональної технології нагрівання металу.....	149

Розділ 14. Матеріали і будівельні елементи печей.	
Вогнетривкі і теплоізоляційні матеріали.....	151
14.1. Класифікація вогнетривких матеріалів і їх властивості..	151
14.2. Кремнеземні вогнетривкі матеріали.....	158
14.3. Алюміносилікатні вогнетривкі матеріали.....	161
14.4. Магnezійні вогнетривкі матеріали.....	166
14.5. Магnezійно-вапняні вогнетривкі матеріали.....	167
14.6. Магnezіально-шпінелідні вогнетривкі матеріали.....	168
14.7. Вуглецеві вогнетривкі матеріали.....	169
14.8. Карбідокремнієві вогнетривкі матеріали.....	170
14.9. Цирконисті вогнетривкі матеріали.....	172
14.10. Легковагові вогнетривкі матеріали.....	172
14.11. Вогнетривкі бетони і розчини.....	173
14.12. Теплоізоляційні матеріали.....	176
Розділ 15. Будівельні елементи печей.....	177
15.1. Будівельні матеріали, метали і жаростійкі сплави.....	177
15.2. Конструкційні елементи і футерування печей.....	181
Розділ 16. Утилізація теплоти продуктів згоряння.....	190
16.1. Попереднє підігрівання металу.....	190
16.2. Рекуператори.....	194
Розділ 17. Класифікація і загальна характеристика теплової роботи печей.....	203
17.1. Класифікація печей.....	203
17.2. Теплова робота печей.....	205
Тестовий контроль засвоєння лекційного матеріалу.....	209
Лабораторний практикум з предмета та методичні вказівки і приклади виконання самостійних робіт з курсу.....	212
Список використаної літератури.....	244

## ВСТУП

Розділ «Енергетика обладнання термічних цехів та дільниць» входить до курсу «Обладнання термічних цехів і дільниць».

Курс «Обладнання термічних цехів і дільниць» викладається після засвоєння студентами фундаментальних дисциплін (математики, фізики, загальної та фізичної хімії тощо) та ряду спеціальних дисциплін (матеріалознавства, технології виробництва і обробки матеріалів, теорії тепломасопереносення в матеріалах, термічної обробки матеріалів та ін.).

При цьому одночасно з вивченням фізично-хімічних закономірностей теплотехнічних процесів у нагрівальних печах і установках у курсі «Обладнання термічних цехів і дільниць» студенти вивчатимуть методи визначення оптимальних параметрів технологічних режимів роботи термічного обладнання та його види і специфіку.

Отже, під час вивчення курсу студент уперше ознайомлюється з енергетикою та апаратурним оформленням технологічного процесу термічної обробки в цілому. Це служить підґрунтям для вивчення і засвоєння низки таких дисциплін, які передбачаються загальним навчальним планом і охоплюють певні характерні питання термічного виробництва (автоматизації, економіки виробництва, охорони праці, проектування термічних цехів та дільниць тощо).

На основі викладеного можна стверджувати, що курс «Обладнання термічних цехів та дільниць» відіграє важливу роль у матеріалознавчій освіті.

Поряд із лекційним курсом навчальною програмою передбачено виконання лабораторних робіт, які можуть бути оформлені для захисту відповідно до вимог цього навчального посібника.

Навчальний план підготовки фахівця з вищою освітою за напрямом 0901 з дисципліни “Обладнання термічних цехів та дільниць” передбачає значний обсяг навчального часу для самостійної роботи студентів. Він використовується для підготовки та засвоєння лекційного матеріалу, підготовки до захисту лабораторних робіт і виконання індивідуальних завдань.

Опанування студентами зазначеними розрахунками допоможе їм під час виконання курсового та дипломного проектування.

## РОЗДІЛ 1

# ВИДИ ПАЛИВА ТА ЕНЕРГІЇ, ЇХ ВИКОРИСТАННЯ У ТЕРМІЧНИХ ПЕЧАХ І УСТАНОВКАХ. ХАРАКТЕРИСТИКА ПАЛИВА

### 1.1 Визначення і класифікація палива

*Паливо* – це горючі речовини, під час горіння яких виділяється теплота, що використовується для промислових або побутових потреб.

При використанні горючих речовин як промислового палива мають бути забезпечені такі вимоги: достатньо великі їх природні запаси; легкість горіння і регулювання горіння; низька вартість видобування цих речовин; невисокий вміст у них шкідливих домішок.

Різні види палива класифікують за кількома найважливішими ознаками, а саме: за агрегатним станом, походженням і відношенням до нагрівання.

*За агрегатним станом* види палива поділяють на тверде, рідке і газоподібне.

*За походженням* – на природні й штучні. Паливо, що використовується у тому вигляді, в якому воно знаходиться в природі, називається *природним*. Природне паливо широко застосовують як сировину для хімічної промисловості. Безпосереднє горіння природного палива з цілого ряду причин не завжди зручне, тому в техніці широко застосовують методи переробки природного палива. Продукт переробки природного палива має назву *штучного* палива.

*За відношенням* до нагрівання всі види палива розподіляють на теплостійкі та нетеплостійкі. *Теплостійкими* називають види палива, хімічний склад яких не змінюється при нагріванні (кокс, газ  $CO$ ,  $H_2$  і т. д.). *Нетеплостійкими*



називають види палива, що розкладаються при нагріванні (дерево, торф, кам'яне вугілля і т. д.).

Паливо характеризується хімічним складом, теплотою згоряння, температурою горіння і поведінкою при нагріванні.

## 1.2 Хімічний склад палива

Незалежно від агрегатного стану палива їх основними горючими складовими є вуглець і водень, що знаходяться в чистому вигляді або у вигляді різних сполук. Окрім них, до складу палива, як правило, входять сірка, кисень та азот. У більшості палива містяться вода і зола, яка є мінеральною сполукою. Які хімічні сполуки і в яких кількостях утворює це паливо, дає його повний хімічний аналіз. Проте через складну будову деяких сполук, що входять до складу палива, їх повний хімічний аналіз утруднений.

За ступенем наближення хімічних аналізів палива до їх повного хімічного складу всі існуючі види палива розподіляють на дві групи.

До першої групи входять види палива, що складаються зі сполук з індивідуальними хімічними властивостями, вміст яких порівняно легко визначити ( $CO$ ,  $H_2$ ,  $CH_4$ ,  $CO_2$ ,  $H_2O$  та ін.).

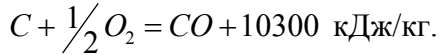
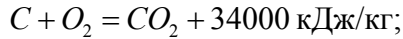
До другої групи входять види палива, що складаються із суміші різних вуглеводів складної будови, вміст яких у суміші важко або неможливо визначити (рідке паливо і шахтне вугілля).

Перш ніж перейти до вивчення складу палива, розглянемо їх горючі і негорючі складові.

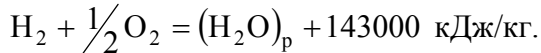
**Горючі та негорючі (баласт) складові палива.** Вуглець є однією з найважливіших складових палива. Залежно від кількості повітря, що подається для горіння вуглецю, може

бути утворено двоокис вуглецю  $CO_2$  або окисел вуглецю  $CO$ .

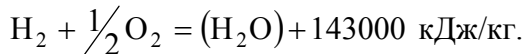
Вуглець окислюється до  $CO_2$  або  $CO$  за такими реакціями:



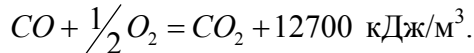
**Водень** – другий дуже важливий елемент, що входить до складу палива, окислюється за реакцією



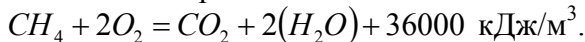
Індекс  $p$  вказує, що вода, яка утворюється при горінні водню, конденсується, виділяючи теплоту. Оскільки з печей продукти горіння видаляються, як правило, з температурою вище  $100^\circ C$  і вода знаходиться в пароподібному стані, то теплоти виділяється менше і водень окислюється за реакцією



Окисел вуглецю  $CO$  міститься в багатьох промислових газах, з киснем взаємодіє за такою реакцією:



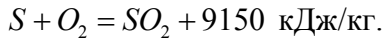
Метан  $CH_4$  – один з основних складових природних газів – окислюється за реакцією



Сірка в паливі знаходиться в різних сполуках. Так, у твердому паливі розрізняють органічну сірку, пов'язану з елементами палива у вигляді органічних сполук, піритову або колчеданну, що міститься в паливі у вигляді піриту або колчедану  $FeS_2$ , і сульфатну – у вигляді солей сірчаної кислоти.

Органічна і колчеданна сірка беруть участь у горінні, сульфатна – в горінні не бере участі, оскільки зв'язана в паливі з киснем. Сумарний вміст органічної, колчеданної і сульфатної сірки називається *загальною сіркою*  $S_{заг}$ .

Сірка окислюється за реакцією



Незважаючи на те, що під час горіння сірки виділяється теплота, її наявність у паливі украй небажана через шкідливу дію  $SO_2$  на метал, що нагрівається, і пічну арматуру. Сірководень  $H_2S$  – також небажана домішка в газі, оскільки під час його горіння утворюється сірчистий газ  $SO_2$ .

Кисень у твердому і рідкому паливі знаходиться в зв'язаному стані і в горінні не бере участі. Він є небажаною домішкою, оскільки знижує теплоту згоряння палива.

Азот, що міститься в паливі, в горінні не бере участі і є баластом палива.

Волога  $W$  так само, як і азот, – баласт палива і в горінні не бере участі. Волога, як правило, є у всіх видах палива. При тривалому сушінні твердого палива на повітрі з нього видаляється частка загальної вологи. При цьому паливо характеризується повітряно-сухим станом. Волога, яка механічно утримується паливом і втрачається під час сушіння (без підігрівання) до повітряно-сухого стану, називається **зовнішньою**.

Волога, що знаходиться усередині твердого палива (у порах), видаляється при додатковому його підігріванні і називається **внутрішньою**, або гігроскопічною.

Вуглекислий газ  $CO_2$  не горить і є баластом палива. У твердому і рідкому паливі є різні мінеральні речовини, які після їх згоряння утворюють твердий залишок – золу  $A$ . Мінеральні речовини складаються в основному з солей калію, натрію, кальцію, магнію, а також різних оксидів, сульфідів і сульфатів. При будь-якому складі зола є баластом палива, що знижує теплоту його згоряння, і є небажаною складовою, оскільки у міру горіння палива накопичується негорючий залишок, який необхідно видаляти.

**Елементарний і технічний аналіз палива.** Елементарний аналіз твердого і рідкого палива дозволяє встановити вміст

у ньому (у % за масою) вуглецю  $C$ , водню  $H$ , кисню  $O$ , азоту  $N$ , сірки  $S_{\text{заг}}$ , золи  $A$  і вологи  $W$ :

$$C + H + O + N + S_{\text{заг}} + A + W = 100\%.$$

Елементарний аналіз твердого і рідкого палива може бути проведений з урахуванням різних мас: органічної, горючої, сухої і робочої. Горючою масою називають суху беззолну частку палива. При цьому сіра  $S^F$  входить до горючої маси у вигляді горючих сполук. Сірка, що входить до складу негорючих сполук, так звана *негорюча сірка*, належить до золи  $A$ . Органічною масою називають беззолну, безвологу і безсіркову частки палива. При елементарному аналізі газоподібного палива визначають його окремі складові в об'ємних відсотках.

При технічному аналізі твердого палива, наприклад, коксу, визначають теплоту його згоряння, вологість, зольність, вміст сірки, вихід летких речовин і дають характеристику зовнішнього вигляду коксу. Вологість палива визначають зважуванням навішення палива до і після сушіння при температурі  $101^\circ\text{C}$ , вихід летких речовин за різницею мас навішення сухого палива до і після сухої перегонки. Суха перегонка є розкладанням нетеплостійких складових палива при його нагріванні без доступу повітря. При цьому паливо розкладається на гази і пари (леткі речовини) і на твердий залишок (кокс).

**Елементарний аналіз палива** – трудомістка операція. Технічний аналіз менш складний, його виконують під час приймання і здавання кожної партії палива.

За необхідності склад палива з робочої маси на суху перераховують за формулами:

$$C^c = C^p \frac{100}{(100 - W^p)}, \%;$$

$$H^c = H^p \frac{100}{(100 - W^p)}, \%;$$

$$O^c = O^p \frac{100}{(100 - W^p)}, \%;$$

$$N^c = N^p \frac{100}{(100 - W^p)}, \%;$$

$$S^c = S^P 100 / (100 - W^P), \%;$$

$$A^c = A^P 100 / (100 - W^P), \%.$$

Склад палива з робочої маси на горючу перераховують за формулами

$$C^r = C^P 100 / [100 - (A^P + W^P)], \%;$$

$$H^r = H^P 100 / [100 - (A^P + W^P)], \%.$$

Склад горючої маси за складом сухої маси

$$C^r = C^P 100 / (100 - A^c), \%; \quad H^r = H^c 100 / (100 - A^c), \%.$$

Склад органічної маси за складом горючої маси

$$C^o = C^r 100 / (100 - S^r), \%; \quad H^o = H^r 100 / (100 - S^r), \%.$$

Склад органічної маси за складом сухої маси

$$C^o = C^c 100 / [100 - (S^c + A^c)], \%;$$

$$H^o = H^c 100 / [100 - (S^c + A^c)], \%.$$

Склад органічної маси за складом робочого палива:

$$C^o = C^P 100 / [100 - (S^P + A^P + W^P)], \%;$$

$$H^o = H^P 100 / [100 - (S^P + A^P + W^P)], \%.$$

При аналізі газоподібного палива вміст вологи виражають у  $\text{кг}/\text{м}^3$ . Склад вологого газу за складом сухого газу

$$\text{CO}_2^{\text{вол}} = \text{CO}_2^c 100 / (100 + 0,124W), \%,$$

де  $W$  - вміст вологи на  $1 \text{ м}^3$  сухого газу,  $\text{кг}$ .

### 1.3 Теплота згоряння палива

Теплотою згоряння палива називається кількість теплоти, яка виділяється при повному згорянні одиниці маси або об'єму палива. Кажучи про теплоту згоряння, необхідно розрізнити вищу  $Q_v$  і нижчу  $Q_n$  теплоту згоряння. Продукти горіння палива містять пари води, які або конденсуються, або залишаються в пароподібному стані. *Вища теплота* згоряння палива відповідає умові охолодження продуктів горіння до  $0^\circ\text{C}$  і конденсації водяної пари, яка

супроводжується виділенням прихованої теплоти пароутворення. *Нижча теплота* згоряння палива відповідає умові, при якій продукти горіння мають високу температуру, а вода залишається в пароподібному стані. Теплоту випару 1 кг води в теплотехнічних розрахунках беруть 2500 кДж. Різниця між  $Q_v$  і  $Q_n$  становить 2500 кДж/кг води. У техніці в більшості випадків використовують нижчу теплоту згоряння. Це пояснюється тим, що температура продуктів горіння палива, що йдуть з різних нагрівальних пристроїв, вища за температуру конденсації водяної пари. Формула перерахунку  $Q_v$  на  $Q_n$  може бути використана для будь-якого виду палива:

$$Q_v - Q_n = 25W^P + 233H^P \text{ кДж/кг,}$$

де  $W^P$  і  $H^P$  – в %.

**Зв'язок теплоти згоряння палив з їх елементарним складом і розрахунок теплоти згоряння палив за їх складом.** Теплота згоряння будь-якого палива є сумою теплоти згоряння елементів і сполук, що складають це паливо. Тому для розрахунку теплоти згоряння необхідно знати хімічний склад палива і теплоту згоряння елементів і сполук, що його складають (таблиця.1).

Для всіх видів твердого і рідкого палива можна використовувати формулу Д. І. Менделєєва

$$Q_n^P = 339C^P + 1030H^P - 109(O^P - S^P) - 25W^P \text{ кДж/кг} \quad (1)$$

Індекс «р» указує на те, що до формули потрібно підставляти вміст  $H$ ,  $O$ ,  $S$  і  $W$ , перерахований на робочу масу. Емпіричні коефіцієнти враховують енергію зв'язку між елементами.

Теплоту згоряння газоподібних палив розраховують підсумовуванням теплових ефектів реакцій горіння:

$$Q_n = 126CO + 108H_2 + 358CH_4 + 590C_2H_4 + 234H_2S \text{ кДж/м}^3, \quad (2)$$

де  $O$ ,  $H_2$ ,  $CH_4$ ,  $C_2H_4$ ,  $H_2S$  – вміст їх у сухому газоподібному паливі, об. %.

Таблиця 1 – Приблизний склад сухих природних газів різних родовищ, %

Родовище	CH <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	Важкі вуглеводні	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> S	N <sub>2</sub>	Відносна маса стосовно до повітря	Нижча теплота згоряння, кДж/м <sup>3</sup>
Єлшанське	93,2	0,7	0,6	0,6	0,5	–	сліди	4,4	0,60	35200
Курдюмівське	99,2	0,8	–	1,0	–	–	–	6,0	0,59	34300
Бугурусланське	77,8	4,4	1,7	0,8	0,6	0,2	1,0	13,5	0,69	34000
Ставропіль Кавказький:										
Північне поле	97,7	–	–	–	–	0,7	–	1,6	0,57	35200
Південне поле	60,0	–	–	–	–	–	–	40,0	0,70	21800
Калушське	95,7	–	–	–	–	0,1	–	4,2	0,58	34300
Дашавське	97,8	0,5	0,2	0,1	0,05	0,05	–	1,3	0,57	36000
Шебелинське	93,5	4,0	1,0	0,5	0,5	0,1	–	0,4	0,61	38100

Теплоту згоряння палива експериментальним шляхом визначають у калориметрах. При цьому теплота, що виділяється під час горіння палива, поглинається середовищем, властивості якого добре вивчені. Таким середовищем найчастіше служить вода.

У техніці кількість палива прийнято вимірювати кількістю **умовного палива**. За умовне вважають паливо, теплота згоряння якого 29300 кДж/кг. Приблизно таку теплоту згоряння має донецьке коксове вугілля. Реальне паливо переводять в умовне за допомогою теплового еквівалента.

Тепловий еквівалент є результатом ділення теплоти згоряння реального палива на теплоту згоряння умовного палива. Наприклад, якщо теплота згоряння даного палива становить 27400 кДж/кг, то це відповідає  $27400 : 29300 = 0,94$  кг умовного палива, тобто в цьому прикладі тепловий еквівалент дорівнює 0,94.

**Поведінка палива під час нагрівання без доступу повітря.** Процес горіння палива завжди пов'язаний з нагріванням. Умови спалювання палива вибирають залежно від поведінки палив при нагріванні. Під час нагрівання деяких видів палива зміна їх агрегатного стану (плавлення, випаровування) не супроводжується зміною структури молекул палива; для інших палив нагрівання супроводжується зміною структури молекул; відбувається руйнування нестійких молекул з утворенням нових, стійких при даній температурі. Прийнято розділяти паливо за відношенням до нагрівання без доступу повітря на теплостійке і нетеплостійке.

До теплостійких палив відносять чистий вуглець (температура плавлення вище 3000°C), водень і окисел вуглецю. Вуглеводневі палива мають обмежену теплостійкість. До них належать, зокрема, природний газ, нафта і продукти її переробки.

Практичний інтерес представляє поведінка кам'яного вугілля під час нагрівання без доступу повітря, як це має



місце при коксуванні кам'яного вугілля. У міру підвищення вмісту вуглецю в кам'яному вугіллі температура його термічного розкладання підвищується. Під час нагрівання вугілля зазнає не лише хімічних, але і фізичних змін. Це виражається в тому, що, наприклад, бітуми, які входять до складу деяких сортів вугілля, під час нагрівання до температури 400-700°C плавляться і переходять у пластичний стан. При подальшому підвищенні температури бітуми знову переходять у твердий стан. Вугілля, що містить плавкі бітуми, називають спікливим. Вугілля, яке не містить бітумів, плавких під час нагрівання, називають таким, що не спікається. На здатності вугілля спікатися базується одержання металургійного коксу.

#### **1.4 Тверде, рідке і газоподібне паливо**

**Тверде паливо** може бути природним і штучним. До природних видів твердого палива відносять торф, горючі сланці, буре вугілля, кам'яне вугілля й антрацити.

Буре вугілля займає за походженням проміжне положення між торфом і кам'яним вугіллем. Буре вугілля відрізняється від кам'яного меншим вмістом вуглецю і великим вмістом кисню, має високу зольність. Воно широко використовується і як місцеве паливо, і як сировина для хімічної промисловості.

Кам'яне вугілля та антрацити характеризуються високим вмістом вуглецю. За складом, виходом і характером коксу воно дуже різноманітне. Вугілля підрозділяють на класи залежно від їх віку. Так, вугілля Донецького басейну підрозділяють на довгополуменеє, газове, паровично-масне, коксівне, паровично-спікливе і пісне (таблиця 2).

Таблиця 2 – Склад, %, і теплота згоряння деяких видів твердого і рідкого палива

Найменування палива	Теплота згоряння, кДж/кг	C <sup>P</sup>	H <sup>P</sup>	O <sup>P</sup> +N <sup>P</sup>	S <sup>P</sup>	A <sup>P</sup>	W <sup>P</sup>	Вихід легких речовин з робочої маси палива, %
Буре вугілля	11500-14700	37-42	2,2-5,4	9-15	12-14,3	13-31	10-35	24-44
Кам'яне вугілля: довгополуменеве	22000	55-60	3,4-4,1	10-14	3,5	13	12	30-37
Газове	26000	63-67	4,0-4,6	8-11	3	13	8	28-35
паровично-масне	25700-27600	66-71	4,0-4,4	4,4-8,6	2,3-3,8	14,5-19	3	21-28
коксівне	24500-27300	67-71	3,5-4,3	4,3-5,1	2,4-2,8	16,5-26	3	14-28
паровично-спікливе	27600-29700	73-74	3,75	3,75	1,9-2,6	12-16	3	10-15
пісне	28500-29700	76-79	3,4-3,8	2,5-4,7	1,9	11,5	3	8,5-14
Антрацити	27200-29300	86	1,8	1,8	1,5-2	3,5-10	2,0-4,7	2-4
Кам'яновугільний кокс	25100	80-85	0,4	1,5	0,5-2	8-12	2-5	1,5
Мазут	35600-39800	80-87	11-13	0-0,5	0,4	0	0-10	–

Пісне вугілля займає проміжне положення між кам'яним вугіллям і антрацитами. Починаючи з довгополуменевого, у вугіллі спостерігається підвищення вмісту вуглецю і пониження вмісту кисню і водню, а також поступове зменшення виходу летких речовин. Починаючи з довгополуменевого, міцність і щільність коксу поступово підвищуються. Максимальні міцність і щільність має кокс, отриманий з коксового і паровично-спікливого вугілля. З пісного вугілля отримують порошкоподібний або слабоспікливий кокс. Теплозгоряння кам'яного вугілля в перерахунку на робочу масу підвищується (починаючи з довгополуменевого) від 22000 до 29700 кДж/кг. Антрацити порівняно з кам'яним вугіллям містять найбільшу кількість вуглецю, за віком вони найбільш старі. Антрацити відрізняються від кам'яного вугілля більшою щільністю, малою гігроскопічністю і високою стійкістю до окислення. При сухій перегонці вони виділяють дуже невелику кількість летких речовин із залишком у вигляді коксу, що не спікається. Кам'яне вугілля і антрацити застосовують для опалювання котелень і як сировину для виробництва генераторного газу. Суміші коксівного і некоксівного вугілля використовують для отримання коксу.

До штучного твердого палива відносять кокс – продукт сухої перегонки при температурі 900-1000°C кам'яного коксівного вугілля в коксових печах.

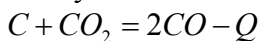
Кокс має високу механічну міцність і здатність протистояти стиранню в доменних печах і вагранках.

Кокс отримують у кусках, поверхня яких світло- або темно-сірого кольору.

Розрізняють кокс металургійний (доменний) з пористістю 45-50% і ливарний (для плавки у вагранках) з пористістю 40%. Ливарний кокс повинен містити не більше 4% W<sup>p</sup>, 10—14% A і 1,7% S<sup>r</sup>.

Одна з основних вимог до коксу – висока механічна міцність; її визначають у барабані діаметром 2 м і завдовжки 0,7 м при частоті обертання 10 об/хв. Бічна поверхня барабана утворена металевими прутами, розташованими із зазорами на відстані 25 мм один від одного. У барабан завантажують 410 кг випробовуваного коксу. Через 15 хв після початку обертання барабана частина коксу висипається з нього. Чим вища механічна міцність коксу, тим більший отримуваний залишок, який називають барабанною пробою. Барабанна проба коксу середньої якості – 310-320 кг.

Однією з основних характеристик коксу є залежна від пористості реакційна здатність, за якою можна робити висновки про здатність коксу відновлювати двоокис вуглецю:



*Металургійний кокс* – не лише паливо, але і відновник, тому він повинен мати значну реакційну здатність. Ливарний кокс служить в основному тільки джерелом теплоти (плавка у вагранці), отже, його реакційна здатність має бути нижчою за реакційну здатність металургійного коксу.

При коксуванні отримують такі побічні продукти: коксовий газ, кам'яновугільну смолу, аміак та інші речовини, що використовуються в різних галузях народного господарства.

**Рідке паливо** має ряд переваг у порівнянні з твердим паливом: високу температуру згоряння, зручність використання і транспортування по трубопроводах. Природний вид рідкого палива – нафта – є сумішшю різних вуглеводнів з незначними включеннями кисневих, азотних і сірчистих сполук. Видобування нафти супроводжується виходом великої кількості супутніх газів, що містять в основному метан.

Нафту безпосередньо не використовують як паливо внаслідок цінності продуктів її переробки і низької температури спалаху. Для опалювання печей і котелень застосовують мазут (залишок переробки нафти).

Продукти переробки нафти – бензин (авіаційний та автомобільний), лігроїн, гас – є легкими фракціями, вихід яких становить 25–30% початкової нафти. Залишок, що складається з важких фракцій, є мазутом. Його теплота згоряння  $Q_n=35600-39800$  кДж/кг. Середній склад малосірчистого мазуту наведений у таблиці 2. У високосірчистому мазуті міститься до 4% S. Для опалювання печей і пристроїв застосовують малосірчистий мазут.

Окрім вмісту сірки, якість мазуту визначається в'язкістю, температурою спалаху і температурою застигання. Температура спалаху мазуту – це температура, при якій пари мазуту в суміші з повітрям, стикаючись із полум'ям, дають спалах. Температура спалаху стандартного мазуту –  $100-125^{\circ}\text{C}$ . Температура застигання, тобто температура, при якій мазут втрачає рухливість, –  $10-25^{\circ}\text{C}$ . Ця характеристика має велике значення, оскільки застиглий мазут неможливо транспортувати по трубопроводах. Для надання мазуту необхідної рідкотекучості проводять парове обігрівання мазутопроводів.

**Газоподібне** паливо за походженням розподіляють на природне і штучне. До природного відносять природний і нафтопромислові гази. Найбільше значення для нашої промисловості має природний газ.

Газоподібне паливо має ряд переваг перед іншими видами палива. Це особливо стосується до природного газу. Собівартість природного газу нижча за собівартість коксу і мазуту. Крім того, газоподібне паливо повніше згорає при мінімальному надлишку повітря, завдяки чому досягається вищий ККД печі. При використанні газоподібного палива спрощується обслуговування печі, пристроїв для спалювання, полегшується автоматизація її теплового режиму, поліпшуються умови праці, знижуються витрати з експлуатації печей і так далі.

До недоліків слід віднести токсичність деяких видів газоподібного палива і вибухонебезпечність в суміші з повітрям.

Природний газ видобувають у багатьох районах. Основна його складова – метан. Теплота згоряння природного газу  $Q_H = 35\ 200\text{--}38\ 200\ \text{кДж/м}^3$ .

До штучного газоподібного палива відносять коксівний, доменний, генераторний газ. Коксівний газ отримують як побічний продукт під час коксування вугілля. Коксівний газ широко застосовують у металургії. Доменний, або колошниковий, газ – це побічний продукт доменного виробництва (при виробництві 1 кг чавуну утворюється 3 м<sup>3</sup> доменного газу). Доменний газ у суміші з коксівним використовують для опалювання печей металургійних заводів.

## РОЗДІЛ 2

### ОСНОВИ ТЕОРІЇ ГОРІННЯ І РОЗРАХУНКИ ГОРІННЯ ПАЛИВА

#### 2.1. Характеристика процесів горіння

**Горінням** називають процеси взаємодії палива з окислювачем, що супроводжуються виділенням теплоти, а інколи і світлового випромінювання. У більшості випадків окислювачем є кисень повітря.

Процеси горіння складаються з двох основних стадій: змішування палива з повітрям (окислювачем); горіння палива.

У процесі горіння утворюється полум'я, в якому проходять реакції горіння складових палива і виділяється теплота. У пічній теплотехніці застосовують факельний метод горіння. *Факел* – це окремий випадок полум'я, коли паливо і повітря надходять у топковий простір або до робочого простору печі у вигляді поступових струменів, що перемі-

шуються. Під час горіння газоподібного палива можлива подача в топковий і робочий простір печі готової газоповітряної суміші. Факельний метод є основним методом горіння палива в полумєневих печах ливарних цехів.

При факельному методі горіння аеродинамічну основу процесів складають струменеві течії. Характер руху струменів може бути ламінарним і турбулентним; у процесах змішування велика роль належить молекулярній і турбулентній дифузії. На практиці при створенні пальників і форсунок використовують різні конструктивні прийоми: направляють струмені під кутом один до одного, створюють закручування струменів і т. д., щоб отримати факел потрібних довжини і форми.

Процеси горіння розподіляють на гомогенне і гетерогенне. При **гомогенному горінні** тепло- і масообмін проходять між тілами, що знаходяться в однаковому агрегатному стані. Гомогенне горіння відбувається в об'ємі і характерне для газового палива. При **гетерогенному горінні** тепло- і масообмін відбуваються між тілами, що знаходяться в різних агрегатних станах. Таке горіння характерне для рідкого і твердого палива.

Гомогенне горіння може відбуватися в кінетичній і дифузійній областях. При **кінетичному горінні** повне перемішування палива з повітрям здійснюється заздалегідь і в зону горіння потрапляє заздалегідь підготовлена паливно-повітряна суміш. При цьому швидкість реакції окислення палива визначає швидкість горіння. При **дифузійному горінні** процеси перемішування і горіння не розділені і проходять практично одночасно. У цьому разі визначальну роль відіграє швидкість процесу перемішування палива з повітрям, оскільки час перемішування значно більше часу, необхідного для перебігу хімічних реакцій окислення. Таким чином, повний час перебігу процесу гомогенного горіння складається з часу сумішоутворення і часу власне го-

ріння. При кінетичному горінні повний час перебігу процесу горіння практично дорівнює часу власне горіння. При дифузійному горінні повний час перебігу процесу горіння практично дорівнює часу перемішування.

При гетерогенному горінні твердого палива також розрізняють кінетичну і дифузійну області. **Кінетична область** спостерігається, коли швидкість дифузії в порах твердого палива, тобто швидкість перемішування, значно більша за швидкість реакцій власне горіння. **Дифузійна область** виникає, коли швидкість дифузії значно менша від швидкості реакції горіння. Полум'я виникає тільки після досягнення необхідного контакту між молекулами палива та окислювача. Реакція окислення палива проходить з виділенням теплоти. Спочатку реакція окислення йде повільно з виділенням малої кількості теплоти, яка сприяє підвищенню температури і прискоренню реакції, що, у свою чергу, призводить до енергійнішого виділення теплоти і також прискорює реакцію окислення. Таким чином, відбувається наростання швидкості реакції до моменту займання, після чого реакція набуває лавинного характеру.

У реакціях окислення первинним фактором є хімічна реакція, а вторинним – виділення теплоти. Обидва ці чинники тісно пов'язані між собою і впливають один на одного. Згідно з роботами академіка М.М.Семенова більшість реакцій окиснення має ланцюговий характер.

У практиці застосовують штучне підпалювання палива, що приводить до різкого прискорення досягнення моменту займання. Виділення теплоти при горінні супроводжується її втратами у навколишнє середовище. Співвідношення між кількостями теплоти, що виділяється і втрачається в навколишнє середовище, має велике значення для розвитку процесу займання палива. У міру окислення палива температура зростає. Займання палива настає тоді, коли кількість теплоти, що виділяється при окисненні палива, дорі-



внює кількості тепловтрат у зовнішнє середовище або більше за них. Відповідну цьому моменту температуру називають **температурою займання палива**. Після займання починається бурхливий процес вигорання суміші палива і кисню. Таким чином, температура займання визначається не лише властивостями суміші, але і характером теплообміну з навколишнім середовищем.

Окрім температури, великий вплив на процес займання палива має концентрація горючих складових у суміші. Існують такі мінімальна і максимальна концентрації горючих складових, нижче і вище за які займання статися не може. Такі граничні концентрації називають концентраційними межами займання.

Негорючі складові газоподібного палива впливають на межі його займання; підвищують нижню і знижують верхню межі займання.

**Горіння твердого палива.** Процеси горіння твердого палива відносять до гетерогенних процесів, їх розподіляють на такі стадії: підігрівання і підсушування; теплове розкладання з виділенням летких речовин і утворенням коксового залишку; горіння летких речовин; горіння коксового залишку.

Леткі речовини виділяються при нагріванні палива і складаються з суміші  $H_2$ ,  $CO$ ,  $CO_2$ ,  $CH_4$  і так далі. Леткі речовини відіграють важливу роль під час горіння твердого палива. Вони виділяються з палива при порівняно невисоких температурах, перемішуються з повітрям і займаються першими. Горінням летких речовин починається процес горіння твердого палива. Теплота, що виділяється під час горіння летких речовин, сприяє підвищенню температури і подальшому розвитку процесу горіння. Горіння вуглецю починається вже після завершення виходу летких речовин, оскільки до цього кисень витрачається на горіння летких речовин і не надходять до поверхні твердих часток. Тому

горіння самого вуглецю триває довше, і саме воно визначає час перебігу всього процесу горіння.

Під час горіння твердого палива важливу роль відіграють процеси дифузії. Початку горіння вуглецю передують дифузія кисню в кристалічну решітку палива, що готує його до процесу горіння. Таким чином, швидкість горіння твердого палива залежить від швидкості хімічних реакцій окиснення і швидкості дифузії кисню.

Якщо сумарна швидкість реакції горіння визначається швидкістю дифузії кисню, то утворюється дифузійна область горіння, якщо швидкістю хімічних реакцій горіння, то виникає кінетична область горіння твердого палива.

**Горіння рідкого палива.** Рідке паливо спалюють у розпорошеному стані. Складові частини процесу спалювання рідкого палива: розпилювання, перемішування з повітрям, підігрівання і випарювання, займання, горіння краплі рідкого палива. Усі ці процеси в сукупності складають процес спалювання рідкого палива. Розпилювання палива, як правило, здійснюють розпилювачем (повітря, пара), причому тиск рухомого розпилювача повинен перевищувати дію поверхневого натягу рідкого палива. Займання відбувається таким чином. Розпорошене паливо, опинившись у зоні високої температури, починає випаровуватися. Біля поверхні краплі утворюється пароповітряна суміш, яка спалахує першою. Випарювання йде тим інтенсивніше, чим менші розміри краплі палива, тобто чим більше воно розпорошене.

**Горіння газоподібного палива.** Після займання полум'я поширюється завдяки постійній передачі теплоти від згорілих порцій палива до нових порцій, що надходять на горіння. Передача теплоти відбувається за рахунок теплопровідності й дифузії і значно залежить від характеру полум'я. У разі, якщо полум'я поширюється в нерухомій газокисневій суміші або суміші, що рухається ламінарно, то теплота поширюється за рахунок теплопровідності. Такий

процес називають нормальним горінням. У разі турбулентного руху газокисневої суміші велику роль у поширенні полум'я відіграє турбулентна дифузія.

За певних умов поширення полум'я відбувається з дуже великою швидкістю і має характер вибухової хвилі. Таке поширення полум'я називають детонаційним або просто детонацією.

**Нормальне горіння.** Після займання горючої суміші утворюється фронт горіння. Фронт горіння переміщається у напрямі незгорілих порцій суміші. Позаду фронту горіння знаходяться продукти горіння, попереду – горюча суміш, що не запалала.

Завдяки різниці температур між продуктами горіння і горючою сумішшю відбувається передача теплоти теплопровідністю, яка, випереджаючи фронт горіння, забезпечує підігрівання суміші до температури займання. Під час горіння газів фронт полум'я є дуже тонким шаром, і його можна розглядати як поверхню.

Фронт полум'я переміщається з певною швидкістю. При нормальному горінні швидкість переміщення полум'я визначається виключно процесом теплопровідності і тому не залежить від того, рухається горюча суміш або знаходиться у спокої. Таку швидкість переміщення полум'я, віднесену до холодного газу, називають нормальною швидкістю горіння. Вона залежить від складу горючої суміші, попередньої температури підігрівання суміші й тиску.

Для всіх горючих газів існує оптимальне співвідношення газу і повітря, при якому швидкість нормального горіння досягає максимального значення. При цьому максимум швидкості нормального горіння не відповідає стехіометричному співвідношенню, а завжди зміщений у бік надлишкового вмісту газу в горючій суміші.

Підвищення температури попереднього підігрівання горючої суміші або її окремих компонентів призводить до значного збільшення швидкості горіння.

**Горіння однорідної суміші в турбулентному потоці.** Цей вид горіння поширеніший у практиці, ніж горіння в спокійному (ламінарно-рухомому) середовищі. Процес горіння в турбулентному потоці розглядають як ускладнений вид ламинарного (нормального) горіння. При цьому фронт горіння сильно розвинений і викривлений у результаті турбулентності потоку. Швидкість турбулентного горіння залежить від турбулентності потоку. Чим вища турбулентність потоку, тим вища швидкість його горіння. Показником турбулентності потоку є критерій Рейнольдса  $Re$ .

**Дифузійне горіння.** Дифузійний метод спалювання газоподібного палива дістав великого поширення. При цьому виді горіння змішування і горіння відбуваються в одному об'ємі. Первинну роль при дифузійному горінні відіграє процес змішування газу і повітря. Дифузійне горіння може проходити в ламинарному, турбулентному і перехідному режимах. Ламінарний режим переходить у турбулентний при критичних значеннях критерію Рейнольдса. Так, для водню  $Re = 1800-2200$ , для природного газу  $Re = 3200-4000$ .

У більшості випадків дифузійне горіння має турбулентний характер.

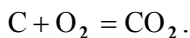
## 2.2 Розрахунки горіння палива

При розрахунку горіння палива визначають кількість повітря, необхідну для горіння одиниці даного палива, кількість і склад продуктів горіння, температуру горіння.

Кількість повітря, необхідного для горіння палива, кількість і склад продуктів горіння визначають на підставі даних про склад палива і реакцій горіння елементів і речовин зазначеного палива, що становлять. Для простоти розрахунків можна прийняти, що повітря складається з 21 об.%  $O_2$  і 79 об.%  $N_2$  ( $79 : 21 = 3,762$ ), або 23,2 мас. %  $O_2$  і 76,8 мас. %  $N_2$ .

На прикладі реакції горіння чистого вуглецю визначимо кількість повітря, необхідного для горіння, і кількість продуктів горіння, що виходять.

Допустимо, що горить 1 кг чистого вуглецю



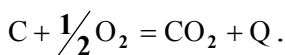
На 1 кг вуглецю припадає  $32 : 12 = 2,67$  кг кисню ( $12$  – маса 1 кмоля  $O_2$ ,  $0,32$  – маса 1 кмоля  $O_2$ ). З цією кількістю кисню до реакції горіння увійде  $2,67 \cdot 76,8 / 23,2 = 8,79$  кг  $N_2$ . Маса повітря, витраченого на горіння, становить  $2,67 + 8,79 = 11,46$  кг. При спалюванні 1 кг вуглецю утворюється  $44 / 12 = 3,67$  кг  $CO_2$ . Кількість повітря в об'ємних одиницях отримують діленням маси повітря на його щільність ( $1,293$  кг/м<sup>3</sup>).

Правильність наведеного розрахунку горіння можна перевірити за матеріальним балансом горіння. Матеріальним балансом горіння є окремий випадок закону збереження маси речовини, згідно з якою маса речовин, що вступає в реакцію горіння, має дорівнювати масі речовин, отриманих у результаті горіння.

Надійшло	Отримано
1 кг C	3,67 кг $CO_2$
+ 2,67 кг $O_2$	+ 8,79 кг $N_2$
+ 8,79 кг $N_2$	Разом 12,46 кг
Разом 12,46 кг	

Отже, надходження дорівнює витраті, тобто розраховано правильно.

Розрахуємо кількість повітря і продуктів горіння при горінні газоподібних горючих речовин. Розглянемо реакцію горіння  $CO$ :



Для горіння  $1 \text{ м}^3 \text{ С}$  необхідно  $0,5 \text{ м}^3 \text{ O}_2$ , внаслідок чого виходить  $1 \text{ м}^3 \text{ CO}_2$ . З урахуванням азоту повітря, що переходить у продукти горіння, для горіння  $1 \text{ м}^3 \text{ С}$  потрібно повітря  $0,5 + 0,5 \cdot 3,76 = 2,38 \text{ м}^3$ ; кількість продуктів горіння становить  $1 + 0,5 \cdot 3,76 = 2,88 \text{ м}^3$ .

Теоретичною витратою повітря називають мінімальну кількість повітря, отриману за розрахунком, яке необхідне для повного горіння одиниці маси або об'єму зазначеного палива. Теоретичну витрату повітря позначають  $L_0 \text{ м}^3/\text{кг}$  або  $\text{м}^3/\text{м}^3$ . Практично для повного горіння палива потрібна кількість повітря, що перевищує теоретичну. Практичну витрату повітря для горіння одиниці палива позначають  $L_n$ .

**Коефіцієнтом витрати повітря** називають відношення

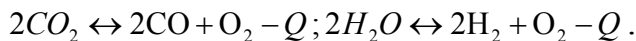
$$N = L_n / L_0 .$$

Коефіцієнт витрати повітря при горінні того або іншого виду палива залежить від умов горіння, які, у свою чергу, залежать від виду палива, типу спалюючого пристрою, конструкції топки, призначення печі і т.д. Різні види палива мають такі  $n$ : газоподібне 1,05-1,1; мазут 1,1-1,25; пилоподібне 1,2-1,25; кам'яне вугілля 1,2-1,7.

**Температура горіння палива** – важливий показник при розрахунку горіння палива. Розрізняють температури калориметричну, теоретичну і практичну.

**Калориметричною температурою**  $t_k$  горіння називають температуру, яку мали б продукти горіння за відсутності втрат теплоти в навколишній простір і на дисоціацію. У цьому випадку мають на увазі, що вся теплота, що виділяється під час горіння, йде тільки на нагрівання продуктів горіння. Калориметрична температура є розрахунковою величиною.

**Теоретичною**  $t_t$  називають температуру, яку мали б продукти горіння з урахуванням втрат теплоти на дисоціацію молекул  $\text{CO}_2$  і  $\text{H}_2\text{O}$ , що відбувається при високих температурах:



Ця температура також є розрахунковою величиною. Оскільки дисоціація спостерігається при досить високих температурах, то часто цими втратами в практичних розрахунках нехтують.

**Практичною температурою горіння**  $t_{\text{пр}}$  називають дійсну температуру в топці або печі з урахуванням втрат на дисоціацію і теплопередачу в навколишній простір; вона є усередненою величиною. Цю температуру визначають як частку від теоретичної температури, а в практиці розрахунку печей при незначних втратах теплоти на дисоціацію – як частку від калориметричної температури:

$$t_{\text{пр}} = \eta t_{\text{к}}$$

де  $\eta$  - дослідний пірометричний коефіцієнт, залежний від конструкції печі або топки ( $\eta = 0,62-0,82$ ); для деяких печей має такі значення: тунельний для відпалу закритої конструкції 0,75–0,82; прохідний 0,72–0,76; садочний (камерний) 0,62–0,7.

Як наголошувалося, калориметричну температуру горіння визначають з припущення, що вся теплота згорання в кДж/кг або кДж/м<sup>3</sup> витрачається на нагрівання продуктів горіння. Тому

$$Q_{\text{н}} = t_{\text{к}}(v_1 c_1 + v_2 c_2 + \dots),$$

де  $v_1, v_2$  і т.д. — складові продуктів горіння одиниці палива в одиницях маси або об'ємних одиницях (CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O і т.д);  $c_1, c_2$  і т. д. – питомі теплоємності продуктів горіння при  $t_{\text{к}}$ , кДж/(кг·К) або кДж/(м<sup>3</sup>·К) (див. додаток 1);

$$t_{\text{к}} = Q_{\text{н}} / (v_1 c_1 + v_2 c_2 + \dots).$$

У той самий час сума

$$v_1 c_1 + v_2 c_2 + v_3 c_3 + \dots$$

є складовою об'єму  $V_{\text{п}}$  продуктів горіння одиниці палива на питому теплоємність продуктів горіння  $c_{\text{п.г}}$ ; тоді

$$t_{\text{к}} = Q_{\text{н}} / V_{\text{п}} c_{\text{п.г}}.$$

Якщо паливо і повітря, що подаються на горіння, заздалегідь підігріваються, то теплота, що передається продуктам горіння, збільшується, а отже, зростає їх температура. У цьому випадку

$$t_k = Q_n + Q_{т.ф.} + Q_{в.ф.} / V_n c_{п.г.},$$

де  $Q_{т.ф.}$ ,  $Q_{в.ф.}$  – фізична теплота, що вноситься підігрітим паливом і повітрям, з розрахунку на одиницю палива:

$$Q_{т.ф.} = c_T t_T; \quad Q_{в.ф.} = c_B t_B,$$

де  $c_T$  і  $c_B$  – питомі теплоємності палива і повітря при температурі підігрівання;  $t_T$ ,  $t_B$  – температури підігрівання палива і повітря, °С.

Визначити  $c_{п.г.}$  складно, оскільки питомі теплоємності окремих продуктів горіння залежать від температури останніх, яку необхідно обчислити.

Питому теплоємність продуктів горіння, що складаються з окремих компонентів, визначають як суму питомих теплоємностей окремих компонентів, помножених на частку цих компонентів у газоподібному паливі. Так, середня питома теплоємність [кДж/(м<sup>3</sup>·К)] продуктів горіння, що складаються з CO<sub>2</sub>, C, H<sub>2</sub>, N<sub>2</sub> (об. %) при температурі  $t$  (°С):

$$c_{п.г.} = 0,01(c_{CO_2}^t \cdot CO_2 + c_{CO}^t + c_{H_2}^t \cdot H_2 + \dots + c_{N_2}^t \cdot N_2),$$

де  $CO_{CO_2}^t + CO_{CO}^t$  і т.д. – середні питомі теплоємності окремих складових при температурі 0 –  $t$ °С.

Для полегшення розрахунку  $t_k$  використовуємо наближений метод, суть якого полягає в тому, що для продуктів горіння конкретного складу кожному значенню питомої кількості теплоти 1 м<sup>3</sup> продуктів горіння відповідає конкретна температура. Нижче наведена послідовність обчислення.

1. Визначають склад продуктів горіння палива,  $Q_n$  та об'єм продуктів горіння одиниці палива  $V_n$  при заданому коефіцієнті витрати повітря  $n$ .

2. Визначають дійсну питому кількість теплоти 1 м<sup>3</sup>



продуктів горіння (кДж/м<sup>3</sup>)

$$i_{п.г.} = Q_H^p / V_n .$$

3. За значенням отриманої питомої кількості теплоти продуктів горіння  $i_{п.г.}$  приблизно визначають відповідну йому температуру продуктів горіння  $t_1$ .

4. За температурою  $t_k$  розраховують питому кількість теплоти 1 м<sup>3</sup> продуктів горіння даного складу (кДж/м<sup>3</sup>)

$$i_{п.г1} = 0,01(C_{CO_2}^t CO_2 + C_{CO}^t + \dots)t_1 .$$

Обчислена таким чином питома кількість теплоти, як правило, відрізняється від дійсної. Після цього, задаючись іншою температурою  $t_2$ , за тією самою формулою обчислюють відповідну їй питому кількість теплоти  $i_{п.г2}$ . Температуру  $t_2$  слід вибирати, виходячи з того, щоб вона відрізнялася від температури  $t_1$  на 100°C і щоб дійсна питома кількість теплоти, визначена за формулою

$$i_{п.г} = Q_H^p / V_n ,$$

знаходилася між значеннями  $i_{п.г1}$  та  $i_{п.г2}$ .

5. За значеннями температур  $t_1$  і  $t_2$  і питомими кількостями теплоти  $i_{п.г1}$  та  $i_{п.г2}$ , що відповідають цим температурам, знаходять  $t_k$  шляхом інтерполяції: різниці температур ( $t_2 - t_1$ ) відповідатиме різниця питомих кількостей теплоти ( $i_{п.г2} - i_{п.г1}$ ); різниці температур ( $t_2 - t_k$ ) відповідатиме різниця питомих кількостей теплоти ( $i_{п.г2} - i_{п.г}$ ). Складемо пропорцію

$$(t_2 - t_1) : (i_{п.г2} - i_{п.г1}) ;$$

$$(t_2 - t_k) : (i_{п.г2} - i_{п.г}) .$$

Звідки

$$t_2 - t_k = (i_{п.г2} - i_{п.г})(t_2 - t_1) / (i_{п.г2} - i_{п.г1}) ;$$

$$t_2 - t_1 = 100^\circ\text{C} ;$$

$$t_k - t_2 = (i_{п.г2} - i_{п.г})100 / (i_{п.г2} - i_{п.г1}) .$$

Розрахунок горіння твердого і рідкого палива наведений у [1, с. 23-26].

## РОЗДІЛ 3

### ПРИСТРОЇ ДЛЯ СПАЛЮВАННЯ ПАЛИВА

Для спалювання твердого палива використовують топ-ки, рідкого палива – форсунки, газоподібного палива – пальники.

#### 3.1. Спалювання твердого палива

Тверде кускове паливо для опалювання промислових печей застосовують рідко. Проте воно зберігає своє значення як резервне паливо. Пилоподібне паливо широко застосовують на великих котельних установках.

Кускове паливо спалюють на колосниках, застосовуючи для цього прості і напівгазові топки. У простій топці висота шару вугілля не перевищує трьох-чотирьох діаметрів шматків. Усе повітря, необхідне для горіння, подають під колосникові ґрати при коефіцієнті витрати  $\sim 1,4$ . Горіння закінчується в межах топки.

Розрахунок простої топки знаходять за рівнянням

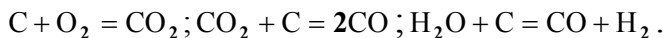
$$f_k = B/h_k,$$

де  $f_k$  – площа колосникових ґрат,  $m^2$ ;  $B$  – витрата палива,  $kg/год$ ;  $h_k$  – кількість палива, що спалюється на  $1 m^2$  ґраток протягом 1 год,  $kg/(m^2 \cdot год)$ .

Як правило,  $h_k$  для простих топок становить 200–300  $kg/(m^2 \cdot год)$ . Теплотехнічним недоліком простих топок при застосуванні їх для промислових печей є те, що топки знаходяться поза робочим простором печі. Тому в робочому просторі відсутній факел, здатний інтенсивно віддавати теплоту матеріалу, що нагрівається.

Цей недолік частково усувають, застосовуючи напівгазові топки. У підлозі газових топок висота шару вугілля

становить більше чотирьох діаметрів шматка. У топці (за товщиною палива) йдуть такі реакції:



Продукти неповного горіння, що утворилися, так званий напівгаз, містять горючі компоненти (C і H<sub>2</sub>). Їх використовують для подальшого допалювання в робочому просторі печей. У напівгазових топках 60% усього повітря надходить під колосникові ґрати. Вторинне повітря подають у робочий простір печі, де відбувається допалювання напівгазу. При розрахунку напівгазових топок величину  $h_k$  беруть до 150 кг/(м<sup>2</sup>·год).

### 3.2. Форсунки для спалювання рідкого палива

Для забезпечення горіння рідкого палива необхідне перемішування пари палива з киснем повітря. Потрібне те, що добре розпиляє рідке паливо. Те, що розпиляє, здійснюється форсунками, які за способом розпилення діляться на механічні, високого тиску і низького тиску (повітря). На ливарних печах і сушарках застосовують повітряні форсунки низького тиску. Вони працюють при тиску повітря 5-6 кПа і тиску мазуту 10-20 кПа. Струмінь мазуту подають по центру повітряного потоку. Механічна дія повітряного потоку, що рухається з великою швидкістю, руйнує і розпиляє струмінь мазуту.

Після виходу з форсунки краплі мазуту, оточені повітрям, потрапляють у порожнину розжареного пальникового тунелю (див. рис. 1). Краплі починають нагріватися за рахунок випромінювання полум'я і тунелю, а також за рахунок конвекції від нагрітого повітря і рециркуляції продуктів горіння в тунелі.

При тонкому розпиленні і доброму перемішуванні крапель мазуту з повітрям довжина факела виходить невеликою. При поганому розпиленні й перемішуванні з повіт-

рям виділяється вуглець сажі, який не встигає згоріти, утворює кіптяву, і довжина факела збільшується. Факел, що утворюється при горінні, повинен відповідати конструкції печі й технології нагрівання. Довжина факела повинна забезпечувати повне й економічне згорання мазуту в наявному об'ємі топки або печі та необхідні умови теплопередачі до виробів, що нагріваються.

У форсунках високого тиску розпилення мазуту здійснюється парою під тиском 300-1200 кПа або компресорним повітрям під тиском 300-700 кПа. У форсунках з розпиленням компресорним повітрям кількість компресорного повітря становить ~10 % кількості, необхідної для горіння. Решту повітря подають вентилятором. У парових форсунках все повітря, необхідне для горіння, подають вентилятором.

Форсунка низького тиску (рис. 1) працює таким чином. Рідке паливо (мазут) подають за напрямом стрілки В у центральну трубку. Повітря, необхідне для горіння, надходить у форсунку по двох трубах (по стрілках А і Б). Первинне повітря, що подається за напрямом стрілки А, призначене для розпилення палива, і його витрата при зміні витрати палива не змінюється. Цим досягається задовільне розпилення палива при різній продуктивності форсунки. Повітря, що надходить за напрямом стрілки Б, призначене для отримання і регулювання необхідної довжини факела. Форсунка також може бути використана і для спалювання газоподібного палива. У цьому випадку за напрямом стрілки А у форсунку подається газ, а за напрямом стрілки Б – повітря. Мазут у центральну трубку за напрямом стрілки В не подається. Такими форсунками обладнують печі, де потрібно мати резервне паливо.

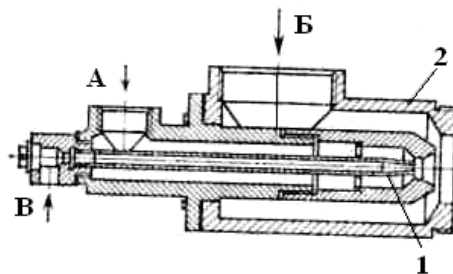


Рисунок 1 – Форсунка низького тиску: 1 – мазутне сопло; 2 – корпус

Розрахунок форсунок зводиться до визначення розмірів отворів для повітря і мазуту. Діаметр мазутопроводу визначають, виходячи із швидкості протікання мазуту 0,1–0,8 м/с. Мінімальний діаметр труби звичайної 12,5 мм.

Діаметр отвору для мазуту, мм

$$d = \sqrt{B/1,25\mu\sqrt{p\rho}} ,$$

де  $B$  – витрата мазуту, кг/год;  $P$  – коефіцієнт витрати, що дорівнює 0,2–0,3;  $p$  – надлишковий тиск мазуту, МПа;  $\rho$  – щільність мазуту, кг/м<sup>3</sup>.

Якщо діаметр отвору для мазуту за розрахунком виходить менше 2,5 мм, то необхідно, враховуючи умови засмічення, розрахункове значення збільшити до 2,5 мм. Необхідну площу для проходу повітря визначають, виходячи із швидкості повітря 70–100 м/с.

### 3.3. Пальники для спалювання газу

Пальники, що застосовуються у печач, можна підрозділити на пальники **зовнішнього і внутрішнього змішування**. У пальниках зовнішнього змішування газ із повітрям перемішується поза пальником – у пальниковому тунелі і в робочому просторі печі. Для пальників цього типу характерна наявність довгого факела.

Пальники зовнішнього змішування мають широку межу регулювання тиску газу і повітря (10-10000 Па). Навіть при дуже малих швидкостях витікання газу і повітря з пальника немає небезпеки перекидання (проскакування) полум'я всередину пальника, оскільки в пальнику відсутня приготвлена газоповітряна суміш, здатна запалитися. Пальники зовнішнього змішування при невеликих розмірах мають велику теплову потужність, і їх часто застосовують на печах, що мають обмежену поверхню для розміщення пальників. Пальники зовнішнього змішування вимагають підведення як горючого газу, так і повітря, тому система трубопроводів на печі ускладнюється.

На рис. 2 показаний пальник зовнішнього змішування, змонтований на стінці печі. До каркаса 5 печей прикручена пальникова плита 4. У стінці 8 печей, складеною з вогнетривкого матеріалу, впритул до пальникової плити встановлена пальникова цегла 7 з тунелем. Пальник кріпиться болтами 3 до пальникової плити. Носик 6 пальників входить в поглиблення, наявне в пальниковій цеглі. Горючий газ подається по трубі, розташованій по осі пальника. На кінці труби встановлено змінне газове сопло 2, діаметр отвору в якому визначається залежно від продуктивності пальника.

Для забезпечення спалювання газоподібного і рідкого палива велике значення мають пальникові тунелі. Розміри тунелю повинні забезпечувати стійке горіння палива і повне його спалювання в об'ємі тунелю. Стійке горіння забезпечують великим діаметром тунелю в порівнянні з діаметром носика пальника. Циркуляційна зона 3 (поток) розжарених газів, що утворюється, на початку тунелю (рис. 3) служить запальником для витікаючих з пальника свіжих порцій газоповітряної суміші. Діаметр тунелю  $D$  має бути в 2,4–3 рази більше діаметру носика 1 пальника ( $d_{н.г}$ ). Газоповітряна суміш, що витікає з пальника після зіткнення з внутрішньою поверхнею тунелю (точка А) проходить по

тунелю, стикаючись із поверхнею. Цим досягається ізоляція циркуляційної зони від пічного простору і тим самим стабільна робота пальника. Для повного спалювання палива в тунелі довжина  $L$  має бути в 2,4–2,7 раза більша за діаметр  $D$ .

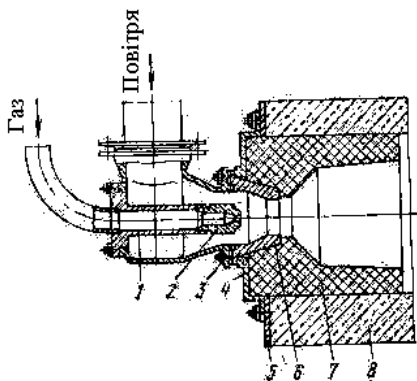


Рисунок 2 – Пальник зовнішнього змішування

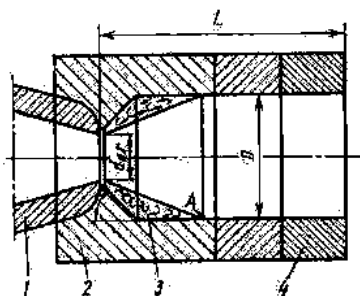


Рисунок 3 – Пальниковий тунель

Необхідну довжину тунелю забезпечують установленням додаткової пальникової цегли 4 до основної цегли 2.

У пальниках внутрішнього змішування газ з повітрям перемішується у самому пальнику. З пальника у пальниковий тунель надходить добре перемішана газоповітряна суміш, що готується у змішувачах, з яких найбільше застосування знайшли інжекційні змішувачі.

Пальники з такими змішувачами називають інжекційними. На рис. 4 показані прямі однопровідні інжекційні пальники, що забезпечують повне спалювання газового палива при коефіцієнті витрати повітря  $\rho = 1,03\text{--}1,05$ .

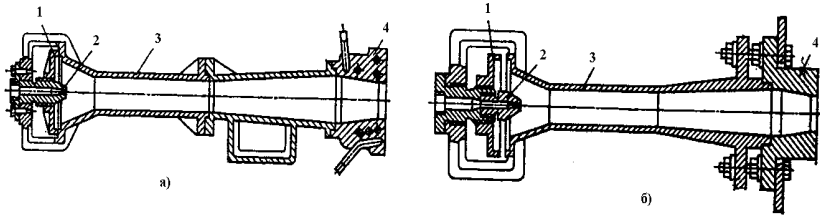


Рисунок 4 – Однопровідні інжекційні пальники

Принцип роботи пальника полягає в такому. Горючий газ під тиском витікає з газового сопла 2 у циліндрову частину змішувача 3. Через кільцеву щілину між газовим соплом і змішувачем унаслідок розрідження, створюваного струменем горючого газу, в змішувач підсмоктується атмосферне повітря. При проходженні по циліндровій частині змішувача 3 горючий газ і повітря перемішуються, тобто відбувається приготування газоповітряної суміші, яка надходить у носик 4 і через отвір витікає в пальниковий тунель, в якому згорає.

Продуктивність пальника регулюють краном, встановленим на газопроводі. При зміні витрати газу змінюється кількість підсмоктувального повітря. Розміри пальника вибрані таким чином, що при зміні витрати газу коефіцієнт витрати повітря автоматично підтримується сталим.

Повітряну шайбу 1 використовують тільки при запалюванні та гасінні пальника. Пальник запалюють при закритій, тобто притиснутій впритул до змішувача 3 повітряній шайбі 1 і закритій щілині для підсмоктування повітря (рис. 4 а); під час роботи пальника повітряна шайба 1 віддалена від змішувача 3, і щілина для підсмоктування повітря відкрита (рис.4 б). Носик пальника для кращого охолодження роблять масивним. При перегріві носика унаслідок випромінювання пічного простору спостерігаються проникнення (проскакування) полум'я всередину пальника.



На пальниках великої продуктивності носик зазвичай охолоджують водою (рис. 4 а).

Інжекційні однопрвідні пальники працюють при тиску природного газу перед пальником 80–600 кПа. При меншому або більшому тиску порушується автоматична підтримка сталого коефіцієнта витрати повітря.

Задаючись продуктивністю пальника ( $\text{м}^3/\text{год}$ ) і тиском газу (кПа), за рис. 5 можна вибрати діаметр газового сопла. Співвідношення газ – повітря в суміші визначають співвідношенням площ отворів газового сопла і носика

$$d_{\text{н.г.}}^2 / d_{\text{с}}^2 = (1 - u)(1 + \rho_2 u / \rho_1)(1 + \rho_2 \xi / \rho_1),$$

де  $d_{\text{н.г.}}$  – діаметр носика пальника;  $d_{\text{с}}$  – діаметр газового сопла;  $u$  – об'ємний коефіцієнт ежекції – відношення об'єму ежектованого середовища, до об'єму ежектувального середовища;  $\rho_2 / \rho_1$  – відношення щільності повітря до щільності газу;  $\xi$  – коефіцієнт опору пальникової системи: для прямих пальників  $\xi = 0,3-0,4$ , для куткових  $\xi = 0,9$ .

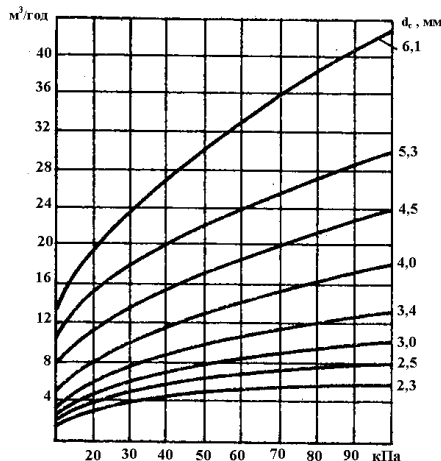


Рисунок 5 – Залежність діаметра газового сопла від продуктивності пальника і тиску газу

Інжекційний двопровідний пальник (рис. 6 а) застосовують у тих випадках, коли тиск газу недостатній для установлення інжекційних однопровідних пальників.

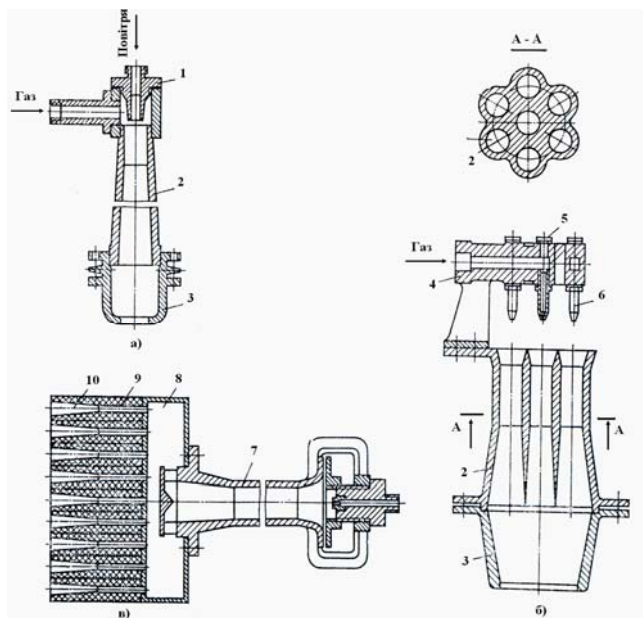


Рисунок 6 – Інжекційні пальники: а – двопровідний; б – багато-сопловий; в – панельний; 1 – повітряне сопло; 2, 7 – змішувач; 3 – носик пальника; 4 – підведення газу; 5 – пробка для чищення; 6 – газове сопло; 8 – камера; 9 – трубка; 10 – тунель

У двопровідних інжекційних пальниках повітря підсмоктує газ. Тиск газу, близький до атмосферного, підтримують спеціальним регулювальником тиску. Повітря через сопло витікає у змішувач, куди підсмоктується і газ.

Кількість повітря, потрібна для спалювання природного газу, приблизно в 10 разів більше кількості газу, тому навіть невеликого тиску повітря вистачає для того, щоб підсмоктати необхідну кількість природного газу. Продуктив-

ність пальника регулюють витратою повітря. Інжекційний багатосопловий пальник (рис. 6 б) є інжекційним однопроточним пальником, що має сім змішувачів і сім газових сопел. Природний газ надходить із семи сопел у сім змішувачів, а готова газоповітряна суміш потім з'єднується в загальному носію і через отвір витікає в пальниковий тунель.

Інжекційний панельний пальник (рис. 6 в) призначений для рівномірного нагрівання пічного простору. Газоповітряна суміш із змішувача надходить у загальну розподільну камеру, що має велику кількість невеликих отворів, рівномірно розташованих на стінці, оберненій у робочий простір печі. В отвори вставлені трубки, по яких газоповітряна суміш надходить у тунелі. Число тунелів відповідає числу отворів. У кожному тунелі спалюється невелика кількість палива. Панельні пальники забезпечують високу рівномірність нагрівання і застосовуються в тих випадках, коли недопустимий прямий, що нагрівається факелом.

Для нагрівання металу в середовищі захисного газу застосовують електричні й полуменеві печі. У полуменевих печах не допускається потрапляння у робочий простір печі продуктів горіння палива, інакше атмосфера печі буде порушена. Газоподібне або рідке паливо спалюють у **радіаційних трубах**. Передача теплоти від труби в пічний простір відбувається за рахунок радіації, тобто випромінювання, тому труби називають радіаційними. Радіаційні труби виготовляють із жаростійкої сталі, що містить до 35% Ni і 25% Cr. Радіаційні труби, виготовлені із сталі такого складу, можуть тривалий час працювати при температурі поверхні труби – 1000°C. Температура в печі при цьому створюється до 950°C. Труби розташовують у печі на стінах, склепінні і поді. Випромінювальна поверхня труби – 0,5-1 м<sup>2</sup>.

Радіаційна труба складається з пальника, випромінювальної труби, пристрою для видалення з труби продуктів

горіння і пристрою для підігрівання повітря, що йде на горіння, за рахунок теплоти продуктів горіння.

Конструкція пальників для радіаційних труб має принципові відмінності від звичайних пальників для спалювання газоподібного палива. Конструкція випромінювальної труби залежить від конструкції печі, форми робочого простору, розташування печі в цеху і так далі

Для установа прямої радіаційної труби в печі мають бути два отвори (рис. 7 а). При вертикальному розташуванні труби один отвір – у поді, а другий – у склепінні печі. Пальник зазвичай встановлюють знизу, і продукти горіння проходять через трубу під дією тяги, що створюється самою трубою. При горизонтальному розташуванні труби отвори роблять у стінках печі. З одного кінця труби встановлюють пальник, а з іншого – пристрій для відсмоктування з труби продуктів горіння. Термін служби прямої радіаційної труби при температурі в печі  $925\pm C$  становить від одного до трьох років.

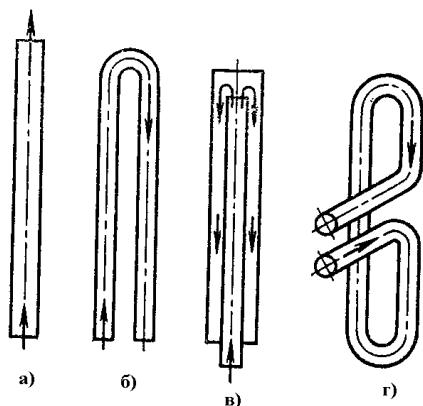


Рисунок 7 – Типи радіаційних труб

Для установа петлеподібної труби (рис. 7, б) в печі достатньо одного отвору. Трубу розміщують переважно горизонтально, причому так, щоб обидві прямі ділянки були

обернені на деталі, що нагріваються. Герметичність у місці приєднання труби до печі досягають фланцевим з'єднанням з прокладкою з азбесту. На протилежній стіні печі встановлюють кронштейн, що підтримує трубу, або роблять нішу, в яку вставляють трубу. Це перешкоджає прогину труби. При довжині труби більше 1200 мм передбачають додаткові підвіски, що підтримують трубу і перешкоджають її прогину.

Паливо в петлеподібній трубі слід спалювати так, щоб не перегрівати окремі частини труби вище за допустиму температуру. Щоб не спалити трубу в місці установки пальника, паливо спалюють не відразу, а поступово. У пальник подають газоповітряну суміш, у якій міститься лише 25% усього повітря, необхідного для горіння. Решта повітря надходить у трубу, окрім пальника, і допалює паливо. Пальник потрібно встановлювати у трубі з таким розрахунком, щоб факел не знаходився в тій частині труби, яка проходить через кладку печі, оскільки це може призвести до перегрівання труби.

Для охолодження ділянки труби, по якій виходять продукти горіння, застосовують рекуператори – пристрої для підігрівання повітря, що йде на горіння палива за рахунок теплоти газів, що відходять. Рекуператор – це теплообмінний апарат, у якому теплота від гарячих продуктів горіння через стінку передається холоднішому повітрю. Розміри рекуператора залежать від температури підігрівання повітря. Зазвичай рекуператор розміщують у вихідній частині труби, що проходить через стіну печі. Рекуператор забезпечує підігрівання повітря до температури 300–400°C і відповідне охолодження продуктів горіння. Схеми тупикової і О-подібної труби показані на рис. 7 в і г.

Радіаційна труба з пальником і рекуператором показана на рис. 8. Природний газ подається по трубці 3 і через сопло 4 витікає у випромінювальну трубу 6. Повітря, необхідне для горіння, подається у випромінювальну трубу.

Горіння природного газу починається відразу ж після витікання з сопла. Оскільки газ із повітрям заздалегідь не перемішані, то, незважаючи на наявність завихрювачів 5 повітря, процес горіння газу розтягується по випромінювальній трубі. Продукти горіння, надходячи в рекуператор, охолоджуються і виходять із рекуператора з температурою  $\sim 650^{\circ}\text{C}$ . Рекуператор складається з трьох гладких труб: внутрішньої 13, в якій проходять продукти горіння, зовнішньої 11 і середньої 12. Повітря надходить у рекуператор через патрубок 10, проходить по кільцевому простору між зовнішньою 11 і середньою 12 трубами в напрямі, протилежному руху продуктів горіння, потім робить поворот на  $180^{\circ}$  і в кільцевому просторі між середньою 12 і внутрішньою 13 трубами рухається до патрубка 1, по якому переходить у ту частину випромінювальної труби, де спалюється паливо. Розпал здійснюють через отвір 2. Кріплення радіаційної труби до фланця 7 печей здійснюється за допомогою фланця 9 і прокладки 8.

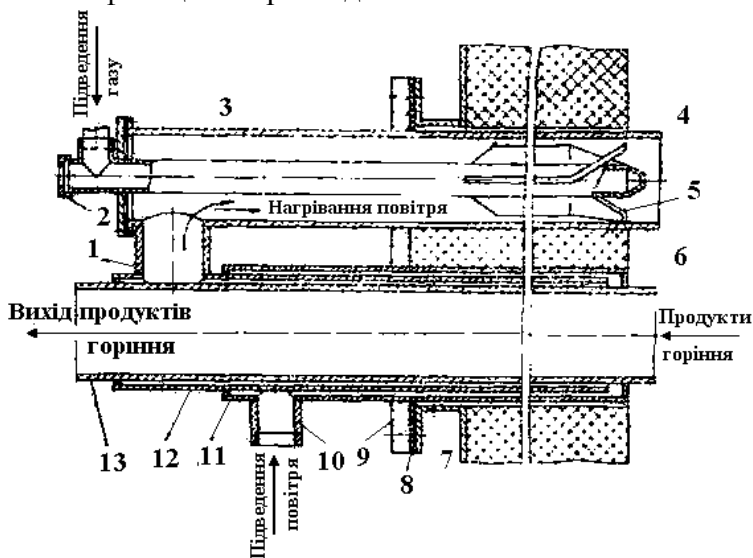


Рисунок 8 – Радіаційна труба з пальником і рекуператором

## РОЗДІЛ 4 ВИКОРИСТАННЯ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ В ПЕЧАХ І СУШАРКАХ

### 4.1. Типи електропечей

У ливарному виробництві застосовують велику кількість різноманітних електропечей: для плавки і витримки металу, термообробки і сушіння. Електропечі зручно класифікувати за способом перетворення електричної енергії в теплову і способу підведення теплоти до тіла, що нагрівається. У електропечах нагрівання здійснюється за методом опору, електричною дугою, індукційним методом та електронним променем.

Вітчизняна промисловість випускає велику кількість різноманітних електропечей. Позначення електропечей, що випускаються вітчизняною промисловістю, ґрунтується на методі нагрівання з урахуванням ознак технологічного характеру. Так, для плавильних печей позначення складаються з трьох основних літер, декількох цифр і допоміжних букв.

Перша літера позначає спосіб нагрівання: Д – дуговий; І – індукційний; О – опором; Е – електронний. Друга літера визначає метал, для плавки якого призначена піч: С – сталь; Ч – чавун; А – алюміній; М – мідь і її сплави і так далі. Третя літера визначає основну конструктивну ознаку печі: для дугових відкритих печей П – поворотне склепіння; для індукційних відкритих печей Т – тигель; для печей опору К – камерна і так далі. Цифра після буквеного позначення для плавильних електропечей позначає місткість у тоннах.

Приклади позначень: ІАТ-6 – індукційна піч тигля для плавлення алюмінію місткістю 6 т; ІСТ-0,4 – індукційна сталеплавильна піч тигля місткістю 0,4 т; ДСП-12 – дугова сталеплавильна піч з поворотним склепінням місткістю 12 т.

## 4.2. Нагрівальні елементи опору

Нагрівальні елементи опору (нагрівачі) можуть бути металевими і керамічними. Металеві нагрівальні елементи опору застосовують в основному в термічних печах; вони є провідниками, виконаними із спеціального сплаву, що має великий електричний опір і високий термін служби при температурах, відповідних термічній обробці. Якщо на кінцях провідника створити різницю потенціалів, по провідникові проходитиме електричний струм, сила якого залежатиме як від напруги на кінцях провідника, так і від електричного опору самого провідника, тобто

$$I = V/R,$$

де  $I$  – струм у провіднику, А;  $V$  – напруга на кінцях провідника, В;  $R$  – електричний опір провідника, Ом.

При проходженні по провіднику електричного струму відбувається перетворення електричної енергії в теплову. Кількість електричної енергії, перетвореної в теплову за 1 с, можна виразити формулою  $P = VI$ , де  $P$  – кількість енергії за 1 с, або потужність, Вт.

Регулюючи напругу та опір провідника, можна досягти виділення необхідної кількості теплової енергії. Напругу регулюють трансформатором. На термічних печах напруга може змінюватися від 5 до 380 В. З цією метою використовують пічні трансформатори, розраховані на передачу великої кількості електричної енергії. Опір провідника (нагрівача) змінюють, збільшуючи або зменшуючи його довжину і поперечний переріз.

Електричний опір провідника може бути вирахований за формулою

$$R = \rho l/S,$$

де  $\rho$  – питомий електроопір матеріалу провідника, Ом·м;  $l$  – довжина провідника, м;  $S$  – площа поперечного перерізу провідника, м<sup>2</sup>.



Довговічність нагрівача залежить від температури, до якої він нагрівається. Чим кращі умови відведення теплоти від нагрівача, тим нижча його температура за інших рівних умов. У термічних печах температура нагрівача не повинна перевищувати температуру робочого простору печі більш ніж на 50-100<sup>0</sup>С. У цьому разі забезпечується рівномірне нагрівання деталей. Якщо температура нагрівача буде набагато вища за температуру нагрівання деталей, то виникне місцевий перегрів деталей, що призведе до браку продукції. Довговічність нагрівача залежить також від поверхневої щільності теплового потоку, вимірюваної у Вт/м<sup>2</sup>. Допустима поверхнева щільність теплового потоку для різної температури пічного простору різна.

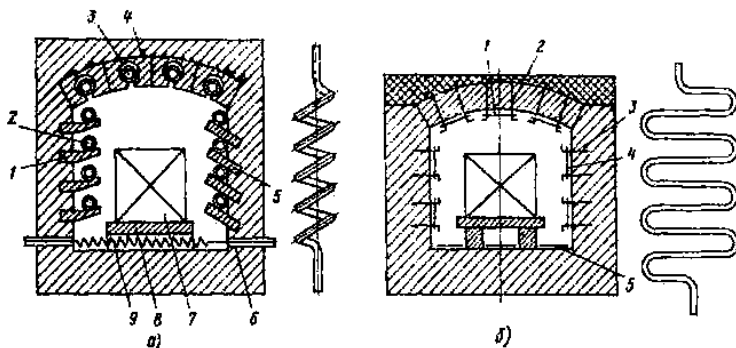


Рисунок 9 – Нагрівальні елементи

Для забезпечення швидкого розігрівання печі витрата електричної енергії береться в 1,5 раза більше, ніж потрібна при нормальній роботі печі.

Залежно від температури в робочому просторі печі застосовують відповідні матеріали нагрівачів: до 110<sup>0</sup>С – переважно нагрівачі з хромонікелевих сплавів, для вищих температур (до 130<sup>0</sup>С) – керамічні нагрівачі.

Більшість термічних печей мають нагрівачі з ніхрому — сплаву нікелю і хрому, що виготовляються з дроту або стрічки. Нагрівач з дроту може бути виготовлений у вигляді спіралі або зигзагу.

На рис. 9 а показаний нагрівач (справа) у вигляді спіралі і подані приклади його розташування в печі. Термін служби нагрівача залежить від розміщення його в печі. Доцільно нагрівачі 2 розміщувати на бічних стінах на полицях 1 або 5. Розкритий нагрівач віддає теплоту в робочий простір печі випромінюванням. Нагрівач 3 склепіння поміщений у спеціальну фасонну цеглу 4, що має канал з прорізом. Умови відведення теплоти від нагрівача в цьому випадку гірші. Нагрівач склепіння з усіх боків оточений вогнетривким матеріалом, і лише вузький проріз сполучає канал з робочим простором печі. У таких умовах термін служби нагрівача склепіння може бути збільшений лише при зменшенні поверхневої щільності теплового потоку на 25-35%. Подовий нагрівач 9 також працює у важких умовах. Від робочого простору його екранує подова плита 8. Подовий нагрівач має бути захищений від потрапляння на нього окалини та інших предметів. До нагрівачів, що знаходяться в печі, електрична енергія подається спеціальним провідником-виводом 6, виготовленим із жароміцної сталі. Вони мають поперечний переріз набагато більший за переріз провідника-нагрівача, щоб уникнути нагрівання їх струмом, що проходить у ланцюгу. Виріб 7 розташовують на поді печі.

На рис. 9 б показаний нагрівач (справа) з дроту у вигляді зигзагу і подані приклади його розташування в печі. На стінах зигзагоподібні нагрівачі 4 підвішують на гачках 3, виготовлених з ніхрому. Нагрівачі 1 на склепінні також підвішують на гачках 2, протилежні кінці яких загинають, що перешкоджає їх випаданню. Нагрівачі 5 розташовують на поді печі.

Площа розкриття у зигзагоподібних нагрівачів більша, вони добре віддають теплоту в пічний простір, що збільшує термін їх служби. Термін служби нагрівача залежить також від діаметра дроту, з якого зроблені спіраль або зигзаг.

Нагрівачі з ніхромової стрічки виготовляють зазвичай у вигляді зигзагу. Схема розміщення нагрівачів у печі така сама, як і зигзагоподібних дротяних нагрівачів.

Литі нагрівачі виготовляють спеціальним методом литва в оболонкові форми. Такі нагрівачі застосовують у печах тоді, коли важко підібрати нагрівачі з прокату через неприпустимо високу поверхневу щільність теплового потоку і, отже, вищу температуру нагрівача. Литі нагрівачі успішно застосовують при температурі пічного простору 950-1150°C. Нагрівачі в місці вигину мають прилипки, за допомогою яких їх кріплять у печах на спеціальних петлях і гачках.

Для обігрівання сушарок незначне поширення дістали трубчасті нагрівачі. Трубчастий електронагрівач (ТЕН) складається з трубки із жароміцної або звичайної вуглецевої сталі, усередині якої поміщена спіраль, навита з ніхромового дроту. Спіраль розміщена по осі трубки, а простір між спіраллю і стінкою трубки заповнений порошком з окислу магнію, що має гарні електроізоляційні властивості і високу теплопровідність. Довжина трубки може бути до 1 м. По кінцях трубки встановлюють ізолятори з розміщеними в них виводами, до яких приєднана спіраль. Трубки в зборі можна легко згинати і надавати їм будь-якої форми. Ці нагрівачі застосовують при робочій температурі до 600°C для нагрівання повітря, води, масла і так далі.

В основу розрахунку електричних нагрівачів покладені умови теплопередачі їх з навколишнім простором. Термін служби нагрівача залежить від температури. Для кожної марки сталі або сплаву, з якого зроблений нагрівач, існує

оптимальна температура. Перегрітий нагрівач призводить до його перепалу.

Температура нагрівача залежить від поверхневої щільності теплового потоку від нагрівача до навколишнього середовища. Чим нижча температура в робочому просторі печі, тим більшою може бути поверхнева щільність теплового потоку від нагрівача. Для нагрівачів з ніхрому рекомендується поверхнева щільність теплового потоку 1,5-104 Вт/м<sup>2</sup> при температурі печі 900 ±С; 1-104 – при 1000°С; 0,7-104 – при 1100°С.

Розміри нагрівача визначають, встановивши тепловим розрахунком печі його необхідну потужність і задавшись допустимою поверхневою щільністю теплового потоку від нагрівача.

Розміри нагрівачів з круглого прокату

$$d = \sqrt[3]{4\rho P^2 10^4 / \pi^2 V^2 q} ; l = 10^2 \sqrt[3]{PV^2 / 4\pi\rho q^2} ,$$

де d – діаметр дроту, м; ρ – питомий електричний опір нагрівача, 10<sup>-6</sup> Ом·м; P – потужність, кВт; V – напруга на нагрівачі, В; l – довжина нагрівача, м; q – поверхнева щільність теплового потоку, Вт/м<sup>2</sup>.

Для стрічкових нагрівачів при відношенні сторін стрічки b/a = τ

$$a = 10^3 \sqrt{\rho P^2 / 2m(m+1)V^2 q} ; l = 10^2 \sqrt[3]{PV^2 m / 4(m+1)\rho q^2}$$

На умови теплопередачі нагрівача впливають склад атмосфери печі і взаємне розміщення нагрівачів.

### 4.3. Електрична дуга

У дугових електричних печах перетворення електричної енергії на теплоту відбувається в електричному розряді, що проходить у газовому середовищі або вакуумі. У такому розряді в невеликих об'ємах скупчуються дуже великі потужності і виходять дуже високі температури. При цьому

в камері печі виникають значні температурні перепади, у зв'язку з чим неможливо досягти рівномірного нагрівання матеріалу і виробів.

Дугові печі успішно застосовують для плавки металів, оскільки висока концентрація енергії забезпечує швидке розплавлення металу.

Потужність одиначної дуги сучасної промислової дугової печі ємністю до 200 т становить до 35 Мвт, а струм, що проходить у ній, досягає 100 кА.

Дуговий розряд змінного струму, що відбувається в сталеплавильній печі, здійснюється в атмосфері газу, що знаходиться в зоні дії дуги, пари матеріалу електродів і розплавленого металу. У період розплавлення шихти дуга горить в атмосфері повітря; у окислювальний і відновний періоди в атмосфері значно збільшується вміст CO.

Перенесення струму в дузі в основному здійснюється рухомими електронами. При проходженні електронів газ, що знаходиться в дуговому проміжку, іонізується. Дуговий електричний розряд підтримується за рахунок емісії електронів з катода, яка різко зростає при підвищенні температури. Електрони, що викидаються катодом, прискорюються під впливом прикладеної до дугового проміжку напруги, спрямовуються до анода, який віддає свою кінетичну енергію, викликаючи його нагрівання і руйнування.

Таким чином, між графітованими електродами і металом створюється стовп дуги, що складається з суміші нейтральних газових частинок електронів, іонів та атомів пари електрода і металу.

Промислові дугові печі працюють на змінному струмі, тому протягом кожного періоду в результаті зміни напрямку струму поверхня торця електрода і поверхня металу поперемінно стають то катодом, то анодом.

Дуговий розряд характерний високим ступенем іонізації, високою густиною струму порядку сотень і навіть ти-

сяч ампер на квадратний сантиметр, яскравим світловим випромінюванням і високою температурою газу. У дузі, що стабільно горить, підтримується теплова рівновага, при якій кількість дугової теплоти, що виділяється, дорівнює кількості теплоти, що віддається в навколишнє середовище. Особливість горіння електричних дуг у сталеплавильних печах – безперервність зміни їх форми, розмірів і кольору. У дузі виділяють стовп дуги, що становить іонізовану область, по якій проходить струм, і полум'я дуги, що складається з газів, що світяться, і не проводять струм. Випромінювання полум'я дуги є однією з основних причин зносу футерування.

Дуга горить не по всьому торцю електрода, а в його частині, у визначеному місці – електродній плямі. Є також пляма на ванні металу, на якому горить дуга. Площа плями на ванні в 1,5-2 рази більша, ніж у електродної плями. Розміри плям на електроді і на ванні тим більші, чим більша потужність печі.

Стовп дуги є рухоим, а тому легко деформується магнітними полями провідник струму. Власне магнітне поле, що створюється навколо стовпа дуги, діє на стовп стискаючи його. Тиск, що виникає при цьому, в газовому середовищі стовпа поширюється на всі боки й у тому числі на метал. Таким чином, спостерігається дія дуги на розплавлений метал.

У трифазних сталеплавильних печах, де електроди розміщені по вершинах рівностороннього трикутника, відбувається видування електричних дуг у бік футерування. Вісь стовпа дуги може нахилитися стосовно горизонту на 30-40. Це пояснюється в основному взаємодією струму в стовпі дуги і перпендикулярного до нього струму в рідкій ванні. Видування дуги з-під електродів додатково впливає на рідкий метал.

У результаті в рідкій ванні виникає циркуляція металу. Ця циркуляція прискорює передачу теплоти від дуги до металу, сприяє перемішуванню металу і вирівнюванню в ньому температури за об'ємом ванни.

Дія дуги на металеву ванну посилюється із зростанням сили струму. Із збільшенням місткості і потужності дугових печей дія дуги на метал зростає. Однією з особливостей сильноточної потужної дуги в печах підвищеної потужності є утворення в металі під дугою меніска. Тиск, що виникає в стовпі дуги, відкидає шлак і метал у сторони і значною мірою визначає глибину меніска. При цьому дуга горить у меніску. Випромінювання дуги в цьому випадку на стіни і склепіння екранується металом і шлаком, а передача теплоти від дуги безпосередньо до металу збільшується.

Під час роботи дугових сталеплавильних печей у початковий період плавлення скрапу електроди опущені в колодязі в скрапі і під ними є невелике озеро рідкого металу. У цей момент важливо уникнути перегрівання поду печі під електродами і значну частину теплоти дуги направити в горизонтальному напрямі на скрап. Цю умову здійснюють при використанні дуги великої довжини.

У міру проплавлення скрапу зростає ступінь перегрівання бічних стінок печі, і горизонтальну складову теплового потоку від дуги зменшують. Для цього укорочують довжину дуги і занурюють її в розплав. Теплову дію дуги направляють вниз на ванну.

Електрична дуга є інтенсивним високотемпературним джерелом випромінювання. Інтенсивність випромінювання дуги досягає 8-9 МВт/м<sup>2</sup>. Для дугових сталеплавильних печей місткістю 0,5-40 т температура дуги знаходиться в межах 4900-5800°C.

Об'єм, займаний дугою, дуже малий порівняно з об'ємом робочого простору печі. Тому стосовно до об'єму печі дугу практично розглядають як точкове джерело випромінювання. Для практичних розрахунків інтенсивність опро-

мінення  $q$  (кВт/м<sup>2</sup>) поверхонь стін, склепіння і рідкої ванни визначають за формулою

$$q = kP_d \cos \varphi / 4\pi r^2,$$

де  $P_d$  – потужність дуги, кВт;  $\varphi$  – кут між напрямом радіуса  $r$  і нормаллю до опромінюваного майданчика;  $r$  – відстань від центра дуги до центра майданчика, м;  $k$  – коефіцієнт, що враховує екранування дуги.

У дугових печах використовують графітовані електроди. Електроди повинні мати високу електропровідність, підвищену температуру початку окислення на повітрі, високу механічну міцність і гарну оброблюваність. Графітовані електроди характеризуються такими властивостями:

Температура початку окислення на повітрі, °С.....	600
Вміст золи, %.....	0,2-1,3
Щільність, г/см <sup>3</sup> .....	2,1-2,2
Пористість, %.....	27-32
Міцність на стискування, МПа.....	15-35

Електроди виготовляють діаметром 100-710 мм і завдовжки 1000-1800 мм. Окремі секції електродів нарощують для отримання необхідної довжини. Нарощування проводять за допомогою спеціальних графітованих ніпелів з конічним або циліндровим різьбленням. Витрата електродів у середньому становить 5-8 кг/т. Вертикальне положення електродів у печі сприяє частковому екрануванню футерування стін і склепіння від теплового випромінювання дуги і створює спрямованість теплового потоку.

#### 4.4. Електронно-променеве нагрівання

Електронно-променеві печі працюють за принципом перетворення в теплоту енергії пучка електронів при взаємодії його з поверхнею тіла, що нагрівається. Електрони, емітовані катодом, розганяються електричним полем до великих швидкостей і прямують на тіло, що нагрівається.



Створення і прискорення пучків електронів ефективно тільки в умовах високого вакууму. Розрідження у відповідальних вузлах плавильної печі досягає  $133 \cdot 10^{-6}$  Па.

Електронно-плавильні установки (ЕПУ) застосовують для отримання злитків особливо чистих металів і переплавки відходів цих металів. На рис. 10 зображена схема ЕПУ.

Над камерою 8 печі розташована аксіальна електронна гармата 1, катод якої і розганяльні електроди 2 розміщені на значній віддалі від металу, що розплавляється, 7 і злитка 11, що утворюється в кристалізаторі 9. У корпусі гармати є патрубки 3 і 5, до яких приєднані високовакуумні насоси. Насос, приєднаний до патрубка 5, перехоплює потік газу, що проникає з плавильної камери в камери гармати. Для збільшення опору потоку газу в променевовідній гарматі встановлені діафрагми 12. Залишкові гази, що проникають у верхню частину гармати, відкачуються насосом, приєднаним до патрубка 3. Камеру 8 печей відкачують через патрубок 10 високовакуумними насосами великої продуктивності. Таким чином, удається значно підвищити вакуум в електронній гарматі і, отже, стійкість роботи печі. Крім того, вакуумний затвор 13 дозволяє герметично відокремити гармату від плавильної камери, що підвищує маневреність печі, оскільки гармата завжди готова до роботи. Поле електромагнітних котушок 4 і 6 стискає електронний пучок і перешкоджає силам його просторового заряду розширити пучок. Потрапляння електронного пучка на елементи конструкції печі викликає їх проплавлення. За допомогою котушки 6 або спеціальної електромагнітної системи (системи, що відхиляє, або розгортки) здійснюють рух пучка по колу або спіралі для усереднювання температури поверхні ванни рідкого металу.

В електронно-променевої печі електрони, емітовані термоемісійним катодом, проходять прискорювальну різницю потенціалу  $V$  між катодом та анодом і набувають кінетичної енергії, Дж:

$$K = m_e v^2 / 2 = qV,$$

де  $m_e$  – маса електрона, що дорівнює  $9,1 \cdot 10^{-31}$  кг;  $v$  – швидкість електрона, м/с;  $q$  – заряд електрона, дорівнює  $1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл;  $V$  – різниця потенціалів, Ст.

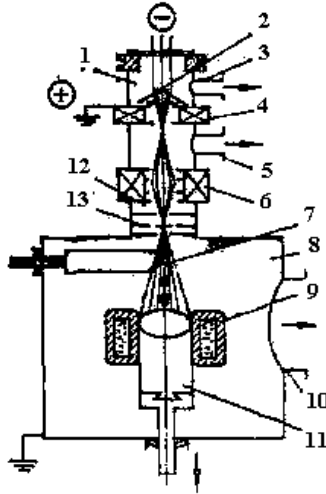


Рисунок 10 – Електронна плавильна установка з аксіальною гарматою

Досягаючи поверхні металу, електрони упродовжують-ся в його кристалічну ґратку або рідку структуру розплаву. Проходячи через метал, електрони взаємодіють як з кристалічною ґраткою, так і з окремими атомами, молекулами і електронами. У результаті частка енергії електронного пучка переходить у теплову енергію, за рахунок якої температура металу підвищується. Таким чином, метал в області падіння електронного пучка розігрівається. Потім теплота поширюється в металі шляхом теплопровідності.

Позначимо частину потужності електронного пучка, що перейшла в теплоту,  $P_T$ . Інша частина електронів пучка випробовує пружні зіткнення з атомами металу і йде на заземлені стінки камери. Ще частина електронів випробо-

вує непружні зіткнення з атомами металу. В обох випадках електрони віддають атомам металу частину своєї енергії, і відбиті електрони також йдуть і відносять із собою значну частину енергії. Позначимо  $P_{\text{відб}}$  потужність, відповідну цій частині. Потрапляючи на стінки камери, ці електрони можуть частково відбитися від них і повернутися на поверхню металу. Проте енергія, яка повертається металу таким шляхом, дуже мала і практично не враховується. З поверхні металу йдуть також вибиті з нього електронами пучка (первинні електрони) вторинні електрони, енергія яких невелика. Позначимо потужність, що втрачається, шляхом вторинної емісії,  $P_{\text{вт}}$ . Метал, нагрітий до високих температур, сам починає випускати електрони за рахунок термодісії. Проте потужність, що втрачається при цьому,  $P_{\text{т}}$ , також невелика.

При взаємодії зі швидкими первинними електронами зв'язані електрони металу переходять на вищі рівні. Через деякий час, повертаючись на первинні рівні, ці електрони випускають кванти електромагнітного випромінювання, частота якого знаходиться в області рентгенівського спектра. Крім того, при гальмуванні у твердому тілі первинні електрони самі порушують гальмівне рентгенівське випромінювання. Той самий ефект спостерігається при взаємодії з вільними електронами в металі. На створення рентгенівського випромінювання витрачається невелика частина енергії  $P_{\text{р.випром}}$ . Таким чином, баланс потужності  $P_{\text{випром}}$  електронного пучка виглядає таким чином:

$$P_{\text{випром}} = P_{\text{т}} + P_{\text{відб}} + P_{\text{вт}} + P_{\text{р.випром}}$$

Величина  $P_{\text{т.е}}$  входить в  $P_{\text{т}}$ , оскільки теплова емісія йде за рахунок енергії, засвоєної металом. Звідси електричний ККД

$$\eta_{\text{ел}} = P_{\text{т}} / P_{\text{випром}}$$

Усі ці процеси можуть успішно проходити тільки в умовах високого вакууму, коли електрони на своєму шляху

від катода до тіла, що нагрівається, практично не прівударяються з атомами газу.

Сприйнята тілом енергія  $P_T$ , що нагрівається, витрачається на підвищення тепловмісту тіла, що нагрівається, і ендотермічні процеси. Ця частина потужності є корисною  $P_{т.кор}$ ; втрати випромінюванням з поверхні тіла, що нагрівається,  $P_{випром}$ ; втрати на випаровування металу  $P_{випаров}$ ; втрати теплопровідністю від металу до води, що охолоджує кристалізатор,  $P_{т.п.}$ .

Таким чином, тепловий ККД процесу

$$\eta_T = P_{т.кор} / P_T = P_{т.кор} / (P_{т.кор} + P_{випром} + P_{випаров} + P_{т.п.}).$$

Загальний ККД процесу

$$\eta = \eta_{ел} \cdot \eta_T.$$

**Електронною гарматою** називають пристрій, у якому пучок електронів, емітованих катодом, формуючись електричним і магнітним полями, прискорюється в електричному полі, виводиться через отвори в аноді і прямує на метал, що нагрівається.

В умовах плавильних печей електронні гармати повинні генерувати потужність у сотні й тисячі кіловатів у безперервному режимі і при значних коливаннях вакууму. Тому в електронних гарматах добиваються дуже малого витікання електронів пучка на анод і променевід гармати, оскільки це витікання сильно впливає на тепловий режим установки.

Внаслідок дифузії пари металу, завжди наявної в камері печі, необхідно, щоб катод мав температуру, вищу за температуру конденсації цієї пари. Інакше пари металу осідають на катоді і руйнують його.

Католи гармат виготовляють із чистого металу, частіше за все вольфрам або тантал. Електронний пучок у вільному від зовнішніх полів просторі розширюється під дією свого просторового заряду. Це явище необхідно враховувати при організації руху пучка в променеvodі (каналі, що

відокремлює вузол «анод–катод» гармати від плавильної камери) і в плавильній камері. Щоб уникнути розбіжності пучка під час руху по променеводі його фокусують магнітним полем. Для формування електронного пучка необхідної форми використовують взаємодію електронів з електростатичним полем, що створюється електродами (електростатичні електронні гармати), або взаємодію електронів з магнітним полем за магнетронним принципом (магнетронні гармати). Електростатичні гармати простіші за будовою і застосовуються в більшості установок для електронного нагрівання.

З електростатичних гармат дістала поширення аксіальна електронна гармата (рис. 11). У верхній камері гармати розташований вузол підігрівання робочого катода. Підігрівання здійснюють допоміжним електронним пучком. Система електронного бомбардування робочого катода складається з вольфрамової плоскої спіралі 1, що нагрівається змінним струмом, і струмопідведення. Між цією спіраллю і робочим катодом 2 прикладена прискорювальна напруга 3-5 кВ. Електрони, емітовані спіраллю, прискорюються електричним полем і бомбардують катод, нагріваючи його до робочої температури. Катод 2, що фокусує електрод 3, і анод 4 з отвором формують електронний пучок і підводять його до отвору анода. Форму електродів спеціально підбирають для того, щоб вони забезпечували створення кінцевого електронного пучка, що сходиться. Пучок електронів, що вийшов з отвору в аноді, фокусується першою магнітною лінзою 5. Це дозволяє електронному пучку пройти без втрат камеру вакуумного затвора 6. Наявність у гарматі вакуумного затвора дає можливість відкривати піч, не знижуючи вакууму в камері електронної гармати.

Система діафрагм 7 у променеводі служить динамічним вакуумним ущільненням, що зменшує до мінімуму кількість газів, які проникають у камеру гармати з печі. Камера ва-

куумного затвора може мати свою вакуумну систему, яка забезпечує проміжне відкачування гармати.

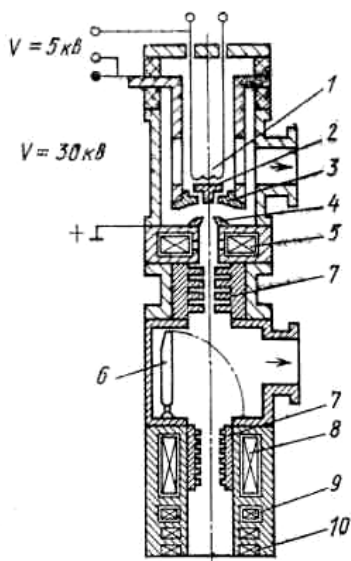


Рисунок 11 - Аксіальна електронна гармата

Для забезпечення проходу електронного пучка через систему діафрагм застосовують магнітне обмеження електронного пучка за допомогою довгої магнітної котушки 8. У нижній частині гармати розміщені друга магнітна лінза 9 і вмикальна система 10. Магнітна лінза і вмикальна система додатково фокусують промінь і дозволяють переміщати його так, що на поверхні металу, що знаходиться на відстані 1,5-2 м від катода, пляма від променя має діаметр 10-15 мм і може переміщатися по поверхні зливка. Розділення вакуумних систем у гарматі й плавильній камері робить роботу гармати стійкою і дозволяє вести плавку металів, що містять відносно велику кількість газів.

## РОЗДІЛ 5 ОСНОВИ МЕХАНІКИ ПІЧНИХ ГАЗІВ. СТАТИКА І ДИНАМІКА ГАЗІВ

### 5.1. Поняття про механіку газів

*Механікою газів* називають науку про закони рівноваги і руху газів.

У полуменевих печах під час горіння палива утворюються продукти горіння, що мають високу температуру. Вони є теплоносіями, що передають теплоту до виробів, які нагріваються, і матеріалів.

Передача теплоти від продуктів горіння до предметів, що нагріваються, в паливних печах залежить від багатьох факторів і зокрема від характеру руху продуктів горіння; тому раціональна організація руху газів – одна з умов успішної роботи печі. Не менше значення має характер руху газів у теплообмінних апаратах. Рух газів у печах, теплообмінниках і так далі підлягає законам газової механіки. Крім того, за законами газової механіки визначають опори, що надаються рухомим газам у печах, каналах, трубопроводах і т. д., залежно від яких вибирають димососи, вентилятори, димарі.

Рух газів у печах вивчають за допомогою законів руху рідини. Відомо, що об'єм рідини на відміну від об'єму газу практично не залежить від тиску і температури. Якщо температура і тиск рухомого газу сталі або змінюються мало, то рух газу підлягає законам руху рідини. Практика роботи печей дає підставу стверджувати, що тиск газів у нагрівальних печах майже не змінюється і може вважатися сталим. Температура газів за об'ємом печі змінюється значно, але поступово. Остання обставина дозволяє на ділянках печі невеликої довжини не враховувати впливу зміни температури на об'єм газів. Отже, з відомим наближенням для

вивчення руху газів у печах можна використовувати закони руху рідини. У механіці рідин широко використовують положення про ідеальну і реальну рідини.

Ідеальною називають умовну рідину, що не має внутрішнього тертя. Введення цього поняття значно полегшує математичний опис законів руху рідини. Реальні рідини володіють внутрішнім тертям, що значно ускладнює теоретичне і дослідне вивчення процесів їх руху.

Розрізняють ідеальні і реальні гази. Ідеальними називають умовні гази, що не мають в'язкості. **Реальні** гази володіють в'язкістю.

Залежність об'єму і густини газу від температури описується законом Гей-Люссака: при сталому тиску об'єм газу прямо пропорційний, а щільність обернено пропорційна температурі. Отже,

$$V_t = V_0(1 - \alpha t); \quad \rho_t = \rho_0 / (1 - \alpha t),$$

де  $V_t$  і  $\rho_t$  – відповідно об'єм і густина газу при  $t$  ( $^{\circ}\text{C}$ ) і тиску 101,3 кПа,  $\text{м}^3$  і  $\text{кг}/\text{м}^3$ ,  $V_0$  і  $\rho_0$  – об'єм і густина газу при температурі  $0^{\circ}\text{C}$  і тиску 101,3 кПа;  $\rho$  – температурний коефіцієнт об'ємного розширення, що дорівнює  $1/273 \text{ K}^{-1}$ .

Закон збереження маси для рухомого потоку газу виражається таким чином: кількість і швидкість газу, що проходить через якийсь канал, пов'язані з поперечним перерізом каналу певним співвідношенням.

Швидкість руху газу ( $\text{м}/\text{с}$ )

$$\omega = V/F,$$

де  $V$  – витрата (об'єм) газу, що проходить,  $\text{м}^3/\text{с}$ ;  $F$  – поперечний переріз каналу,  $\text{м}^2$ .

При сталому русі газу по якомусь каналу витрата маси газу, що проходить через будь-який переріз каналу, буде однаковою. Тоді

$$G_1 = G_2 = G_3 = \text{const},$$

тому  $F_1 \omega_1 \rho_1 = F_2 \omega_2 \rho_2 = F_3 \omega_3 \rho_3 = \text{const}$ .

Якщо



$$\text{то } F_1\omega_1 = F_2\omega_2 = F_3\omega_3 = \text{const} .$$

Останній вираз є розв'язанням рівняння суцільності руху газу (рідини).

При проходженні газу через канали, що мають переріз будь-якої найскладнішої форми, діаметр каналу виражають через так званий гідравлічний діаметр.

**Гідравлічним діаметром** називають відношення збільшеної учетверо площі вільного перерізу каналу до його периметра

$$d_{\text{гдр}} = 4F/S,$$

де  $F$  – площа перерізу каналу,  $\text{м}^2$ ;  $S$  – внутрішній периметр каналу,  $\text{м}$ .

Для круглих труб  $d_{\text{гдр}}$  дорівнює їх внутрішньому діаметру.

## 5.2. Визначення тиску

Гази, що знаходяться у спокої, і рухомі, володіють потенційною і кінетичною енергією. Цю енергію виражають у механіці газів тиском. Розрізняють тиск геометричний, статичний, швидкісний, або динамічний. Одиниця виміру тиску Па.

**Геометричний тиск**  $P_{\text{геом}}$  виникає у результаті різниці густини легкого газу і важкого газу, що його оточує. Розберемо такий приклад.

Посудина (рис. 12) заповнена легким газом ( $\rho_p < \rho_v$ ). Висота посудини  $H$ . Знизу посудина відкрита і сполучається з атмосферою. Проводимо дві умовні площини I – I і II – II. Зверху на посудину в площині I – I діє тиск  $P_1$ . У площині II – II зверху вниз діє тиск  $P_1$  плюс тиск стовпа газу в посудині. Від низу до верху на площину II – II діє тиск  $P_2$ , що дорівнює атмосферному  $P_1$  плюс тиск навколишнього стовпа повітря висотою  $H$ . Різниця тиску  $P_2$  і  $P_1$  є геомет-

ричним тиском стовпа легкого газу висотою  $H$  у площині  $\Pi - \Pi$ :

$$P_{\text{геом}} = P_1 + H\rho_{\text{в}}g - P_1 - H\rho_{\text{г}}g = H(\rho_{\text{в}} - \rho_{\text{г}})g.$$

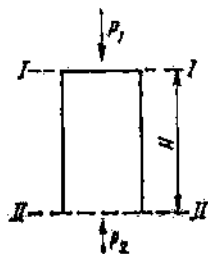


Рисунок 12 – Геометричний тиск

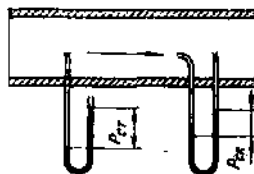


Рисунок. 13 – Статичний і швидкісний тиск

З рівняння видно, що геометричний тиск може бути зі знаком «+» і «-». Якщо густина навколишнього газу і газу в посудині однакова, то геометричний тиск дорівнює нулю. Геометричний тиск можна зміряти і розрахувати.

**Статичним тиском**  $P_{\text{ст}}$  є різниця тиску газу, поміщеного в посудину, і навколишнього повітря. Він вимірюється U-подібним манометром, один кінець якого сполучений з атмосферою, а інший приєднаний до посудини перпендикулярно до потоку газу (рис. 13).

**Швидкісний, або динамічний, тиск** виражає залежність кінетичної енергії газового потоку від швидкості і густини газу:

$$P_{\text{шв}} = w_t^2 \rho_t / 2 = w_0^2 \rho_0 (1 + \alpha t) / 2,$$

де  $w_t$  і  $w_0$  – дійсна і умовна (при  $0^\circ\text{C}$  і  $101,3$  кПа) швидкості газового потоку.

Швидкісний тиск (рис. 13) вимірюють диференціальним манометром, одне коліно якого розташоване назустріч потоку газу (визначається сумарний тиск  $P_{\text{ст}}$  і  $P_{\text{шв}}$ ), а інше – перпендикулярно до нього (визначається тільки  $P_{\text{ст}}$ ). Різницю рівнів рідини становить швидкісний тиск.

**Втрати тиску**  $P_{\text{втр}}$  під час руху газу утворюються внаслідок тертя газового потоку об стінки каналу і в результаті місцевих опорів (повороти, розширення, звуження і т. д.). На подолання опорів витрачається кінетична енергія газу, що виражається його швидкісним тиском. Визначення втрати тиску розглянемо нижче.

### 5.3. Рівняння Бернуллі

Рівняння Бернуллі може бути сформульоване так: для будь-якого перерізу трубопроводу або каналу, по якому проходить газ при сталому русі, сума геометричного, статичного і швидкісного тиску є величиною сталою:

$$P_{\text{геом}} + P_{\text{ст}} + P_{\text{шв}} = \text{const} .$$

Проілюструємо викладене таким прикладом. По трубопроводу, розташованому горизонтально, рухається ідеальний газ (рис. 14). Згідно з рівнянням Бернуллі для ідеального газу

$$P'_{\text{геом}} + P'_{\text{ст}} + P'_{\text{шв}} = P''_{\text{геом}} + P''_{\text{ст}} + P''_{\text{шв}} = \text{const} ,$$

тобто суми геометричного, статичного і швидкісного тиску в перерізах трубопроводу I – I і II – II однакові.



Рисунок 14 – Рівняння Бернуллі

Під час руху реального газу частина його енергії (швидкісний тиск) витрачається на подолання опору руху і переходить у  $P_{\text{втр}}$

$$P'_{\text{геом}} + P'_{\text{ст}} + P'_{\text{шв}} = P''_{\text{геом}} + P''_{\text{ст}} + P''_{\text{шв}} + P_{\text{втр}} = \text{const} .$$

Це рівняння, що виражає закон збереження енергії стосовно руху реального газу, застосовують у багатьох випад-

ках на практиці. Перш ніж перейти до розгляду цих випадків, визначимо  $P_{втр}$ .

#### 5.4. Визначення втрат тиску

Втрати тиску відбуваються в результаті втрат енергії газового потоку на тертя  $P_{тер}$  і місцеві опори  $P_{м.о}$ . Встановлено, що  $P_{тер}$  і  $P_{м.о}$  пропорційні швидкісному тиску.

Втрати тиску на тертя

$$P_{тер} = \lambda(L/d_{гидр})\omega_0^2 \rho_0(1 + \alpha t)/2, \quad (3)$$

де  $\lambda$  – коефіцієнт тертя;  $L$  – довжина труби, м;  $d_{гидр}$  – гідравлічний діаметр каналу, м. Для практичних розрахунків беруть рівним для цегельних каналів 0,05 – 0,06; для металевих труб 0,02 – 0,03.

Втрати тиску на місцеві опори

$$P_{м.о.} = \xi\omega_0^2\rho_0(1 + \alpha t)/2,$$

де  $\xi$  – коефіцієнт місцевого опору, визначуваний дослідним шляхом.

#### 5.5. Витікання газів через отвори

Витікання газів через отвори спостерігається під час вибивання газів через отвори печі, роботи пальників, форсунок і так далі.

Кількість газу, що витікає через отвір, залежить від тиску, під яким відбувається закінчення, площі і форми поперечного перерізу отвору. Для визначення кількості газу використаємо рівняння тиску і запишемо його в розгорненому і перетвореному виглядах:

$$\begin{aligned} H_1(\rho_B - \rho_G)g + \left( P_G' - P_B \right) + \omega_1^2 \rho_G / 2 = \\ = H_2(\rho_B - \rho_G)d + \left( P_G'' - P_B \right) + \omega_2^2 \rho_G / 2 + P_{втр} = \text{const}, \end{aligned}$$

де  $H_1 (\rho_b - \rho_r) g$ ,  $H_2 (\rho_b - \rho_r) g$  – надлишковий геометричний тиск у перерізах I і II;  $(P'_r - P_b)$ ,  $(P''_r - P_b)$  – надлишковий статичний тиск в перерізах I – I і II – II (див. рис. 14).

Розглянемо витікання нестискуваного газу через отвір при сталій температурі.

**Отвір з гострими кромками.** Уявімо собі, що з посудини необмежено великих розмірів (тиск газу в якому  $P_1$ ) газ витікає через отвір перерізом  $F$  в газове середовище з тиском  $P_2$ . Потрібно визначити швидкість витікання. Напишемо рівняння тиску для перерізу I – I і II – II, показаних на рис. 15. Температура газу стала, тому  $P_{\text{геом}} = P_{\text{геом}}$ .

Втратами на тертя в цьому випадку можна нехтувати. При цьому рівняння тиску має вигляд

$$P_1 + \omega_1^2 \rho_{\text{тр}} / 2 = P_2 + \omega_2^2 \rho_{\text{тр}} / 2.$$

Оскільки посудина має необмежено великі розміри, то  $\omega_1 = 0$ . Якщо  $P_2 = P_0$ , то отримаємо

$$P_1 = P_0 + \omega_2^2 \rho_{\text{тр}} / 2.$$

Позначимо  $P_1 - P_2 = P$ , тоді

$$\omega_2 = \sqrt{2P / \rho_{\text{тр}}} \text{ м/с.} \quad (4)$$

Переріз струменя газу  $F_2$  буде менший від перерізу  $F$  завдяки стискуванню струменя. Відношення  $F_2/F$  називається коефіцієнтом звуження струменя і має різні значення залежно від умов витікання. Для тонких стінок посудини  $F_2/F = 0,63$ .

Визначимо витрату газу  $V$  в перерізі II – II:

$$V_2 = \omega_2 F_2,$$

але  $F_2 = F_2 F / F$ , тоді витрата газу,  $\text{м}^3/\text{с}$

$$V = (F_2 F / F) \sqrt{2P / \rho_{\text{тр}}}.$$

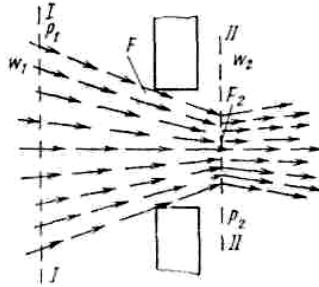


Рисунок 15 – Витікання газу з отвору з гострими кромками

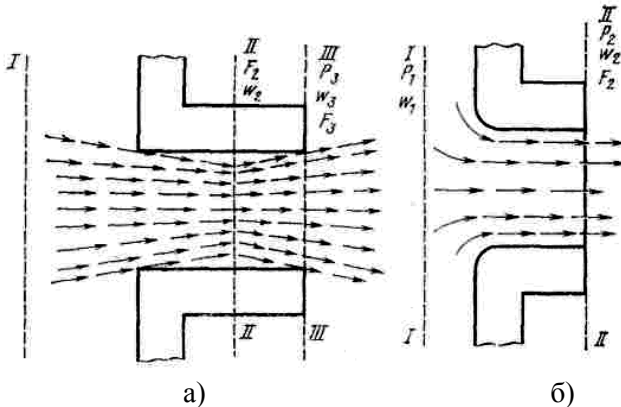


Рисунок 16 – Витікання газу через циліндричний насадок:  
а – з гострими кромками; б – із закругленими кромками

**Приклад 1.** По трубі  $d = 53$  мм проходить повітря, що має температуру  $0^\circ\text{C}$  ( $\rho = 1,29$  кг/м<sup>3</sup>) із швидкістю 2 м/с. Коефіцієнт тертя  $\lambda = 0,04$ . Довжина труби 10 м. Визначимо втрати тиску за формулою (3):

$$P_{\text{тр}} = 0,04 (10/0,053) 2 \cdot 1,29 (1 + (1/273) \cdot 0) / 2 = 19,5 \text{ Па.}$$

**Приклад 2.** Визначити швидкість закінчення газу з отвору з гострими кромками, якщо тиск газу перед отвором  $P_1 = 110$  кПа; тиск середовища, в яке витікає газ,  $P_0 = 105$  кПа; густина газу  $\rho_{\text{г}} = 1,15$  кг/м<sup>3</sup>; температура газу  $0^\circ\text{C}$ .

Перепад тиску

$$P = P_1 - P_2 = 110000 - 105000 = 5000 \text{ Па.}$$

Швидкість закінчення за формулою (4)

$$\omega = \sqrt{2 \cdot 5000 / 1,15} = 93,5 \text{ м/с.}$$

**Отвір із циліндричним насадком.** Форма насадка і входних кромок за інших рівних умов значно впливає на кількість газу, що закінчується. Розглянемо випадок закінчення газу через циліндричний насадок з гострими кромками (рис. 16 а).

Рівняння тиску для перерізів I – I і III – III має вигляд

$$P_1 = P_3 + \omega_3^2 \rho_{\text{тр}} / 2 + (\omega_2 - \omega_3)^2 \rho_{\text{тр}} / 2,$$

де  $\omega_3^2 \rho_{\text{тр}} / 2$  – швидкісний тиск у перерізі III – III;  $(\omega_2 - \omega_3)^2 \rho_{\text{тр}} / 2$ , втрати тиску на стискування струменя. З рівняння суцільності виходить

$$\omega_2 F_2 = \omega_3 F_3.$$

Підставивши останній вираз у рівняння тиску і перетворивши його, отримаємо

$$P_1 - P_3 = \left( \omega_3^2 / 2 \right) \left\{ 1 + \left[ (F_3 / F_2) - 1 \right]^2 \right\} \rho_{\text{тр}}.$$

Беремо  $F_2 / F_3 = 0,63$ , замінюючи  $P_1 - P_3 = P$ , отримуємо витрату газу, м<sup>3</sup>/с:

$$V = 0,85 F_3 \sqrt{2P / \rho_{\text{тр}}}$$

При витіканні газу через циліндричний насадок із закругленими кромками втрат на звуження струменя немає (рис. 16 б).

Рівняння тиску для перерізів I – I і II – II в цьому випадку має вигляд

$$P_1 = P_2 + \omega_2^2 \rho_{\text{тр}} / 2.$$

Замінюючи  $P_1 - P_2 = P$ , отримаємо витрату газу, м<sup>3</sup>/с

$$V = F_2 \sqrt{2P / \rho_{\text{тр}}}.$$

При витіканні газу через дифузор (насадок, що розширюється) із закругленими кромками на вході (рис. 17) рівняння тиску для перерізів I – I і II – II має вигляд

$$P_1 = P_2 + \omega_2^2 \rho_{\text{тр}} / 2.$$

Підставляючи  $P_1 - P_2 = P$ , отримуємо витрату газу, м<sup>3</sup>/с:

$$V = F_2 \sqrt{2P/\rho_{tr}} .$$

З порівняння розглянутих випадків бачимо, що найбільша витрата при одному і тому ж значенні  $P$  спостерігається в разі дифузора із закругленими кромками на вході, оскільки при цьому  $F_2/F = 1$ . Дифузор не повинен розширюватися більш ніж на  $7^\circ$ , оскільки це приблизно відповідає природному розширенню струменя газу. Дифузори широко застосовують у техніці (інжекційні пальники, ежектори для створення штучної тяги і т. д.).

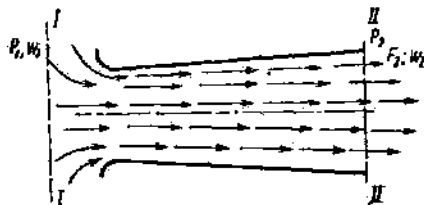


Рисунок 17 – Витікання газу через дифузор із закругленими кромками на вході

**Вибивання газів через відкриті вікна печей.** При нормальному режимі роботи печі на її поді підтримується атмосферний тиск. По висоті печі цей тиск зростає і досягає максимуму під склепінням. Кількість газів ( $m^3/c$ ), що вибиваються через вікно (значних розмірів) печі (рис. 18):

$$V = (2/3) H V \sqrt{2H(\rho_{ов} - \rho_{ог})/\rho_{tr}} ,$$

де  $H$  і  $V$  – висота і ширина вікна,  $m$ .

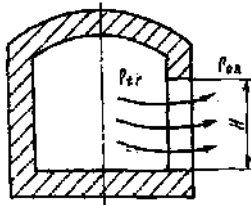


Рисунок 18 – Витікання газу через вікно печі



## РОЗДІЛ 6

### РУХ ГАЗІВ У ПЕЧАХ І СУШАРКАХ

#### 6.1. Струминний рух газів

Рух газів у робочому просторі печей і сушарок, опалюваних газоподібним і рідким паливом, а також повітрям, що нагрівається в електричних калориферах, визначається характером струменів, що виходять з пальників, форсунок або повітророздавальних коробів. Для правильної організації руху газів у печах і сушарках необхідно знати основні властивості струменів.

Струмені можуть бути вільними та обмеженими.

Вільний струмінь. Струмінь називається вільним і затопленим, якщо він не обмежений твердими стінками і витікає в середовище з такою самою щільністю. При закінченні з якого-небудь насадка і проходженні через нерухоме середовище вихрові маси турбулентного струменя, які рухаються в поперечному напрямі до осі струменя, виходять за межі струменя і, стикаючись із нерухомими частинами, підхоплюють їх до загального потоку струменя. Частки нерухомого середовища, потрапляючи в струмінь, збільшують її масу і зменшують її швидкість. При цьому збільшення маси і зменшення швидкості відбуваються так, що добуток рухомої маси на швидкість залишається сталим. Гальмівна дія захоплених часток поступово передається до осі струменя.

Ділянку струменя, на якій осьова швидкість залишається такою, як і початкова швидкість, називають початковою. Її довжина становить 5,6-6 діаметрів насадка. Потім іде основна ділянка, на якій відбувається зменшення швидкості по всьому перерізу струменя, у тому числі й на осі струменя (рис. 19).

Для технічних розрахунків вважають, що твірні межі струменя прямолінійні і струмінь є конусом (при круглomu насадку). Кут розкриття вільного струменя  $\alpha = 18-26$ . Швидкість  $w_m$  в будь-якій точці на осі струменя і витрату газу, віднесена до будь-якого поперечного перерізу струменя, що виходить із циліндричного насадка, можуть бути визначені за формулами:

$$\omega_m/\omega_0=0,96/(0,152/d_0+0,29);$$

$$V/V_0=2,18(0,152l/d_0+0,29),$$

де  $w_0$  і  $w_m$  – швидкість струменя в початковій ділянці і в будь-якій точці на осі струменя, м/с;  $d_0$  – діаметр насадка, м;  $l$  – відстань від вихідного перерізу насадка, м;  $V_0$ ,  $V$  – витрата газу, що закінчується, з насадка і в точці на відстані  $l$  від вихідного перерізу насадка, м<sup>3</sup>/с.



Рисунок 19 – Розподіл швидкостей уздовж осі вільного струменя

Існують аналогічні формули для визначення швидкості та інших параметрів (температури, концентрації) струменів, що виходять з насадок іншої форми. Якщо температура струменя вища за температуру навколишньої атмосфери, то окрім інерційних сил, на струмінь починають діяти сили тяжіння, направлені вгору, і струмені, що скривлю-

ють вісь. Чим більша різниця температур, тим більший ступінь викривлення.

Струмені можуть бути направлені паралельно, назустріч один одному і під кутом. При зустрічі струменів відбувається зміна їх форми, напрямів руху і перемішування. Характер змін при зустрічі струменів залежить від кута зустрічі, співвідношення розмірів і початкових швидкостей. Деформації струменів і їх перемішування тим значніше, чим більший кут зустрічі і більші початкові швидкості струменів.

Якщо осі двох струменів паралельні й знаходяться на близькій відстані одна від одної, то при взаємодії струменів відбувається скорочення поверхні, через яку в струмені надходить навколишнє середовище. У результаті цього кут розкриття струменів зменшується, а дальнобійність їх збільшується.

**Обмежені струмені.** Розглянемо особливості закінчення обмежених струменів, що мають практичне значення.

**Взаємодія струменя з площиною.** Якщо струмінь направлений паралельно твердій площині, розташований на невеликій відстані від осі струменя, то дальнобійність такого струменя збільшується. Це пояснюється тим, що поверхня зіткнення струменя з атмосферою менша і тому менше підсмоктування із навколишнього середовища, що сприяє збереженню енергії струменя. Струмінь «стелиться» по стінці. Ця властивість струменя називається настільністю. Струмінь сплющується, а максимум швидкості струменя у міру віддалення від насадка наближається до площини. Струмінь, що рухається паралельно площині, не чинить на неї тиск. Якщо струмінь направлений під кутом до площини, то із збільшенням кута атаки дальнобійність зменшується, а сплющення збільшується. Струмінь, направлений під кутом, чинить тиск на площину. Із збіль-

шенням кута атаки від  $0$  до  $90^\circ$  тиск струменя на площину збільшується від нуля до максимуму.

Властивість настильності струменя використовується для отримання настильного факела в печах.

**Струмінь, що проходить через відкриту з обох кінців трубу.** До зустрічі зі стінками труби 2 струмінь стикається з атмосферою, що заповнює трубу (рис. 20). Встановлено, що у місцях виходу струменя з насадка 1 утворюється розрідження, під дією якого в трубу надходить повітря з навколишнього середовища. При цьому частка швидкісного тиску струменя перетворюється на статичний тиск, який може бути використаний для подолання опору руху струменя.

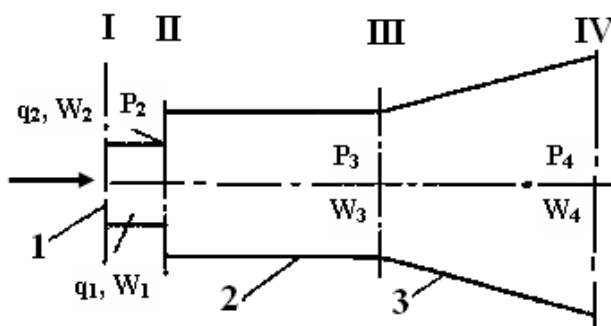


Рисунок 20 – Схема ежектора з дифузorzом

Пристрої, які ґрунтуються на використанні таких властивостей струменя, називають струминними приладами. Їх застосовують як для нагнітання, так і для відсмоктування газів. Прилад, призначений для нагнітання, називають інжектором, а для відсмоктування, – ежектором.

Інжектори застосовують у газових пальниках, у яких газ, що витікає із сопла з великою швидкістю, підсмоктує необхідне для горіння повітря. Такі пальники називаються інжекційними. Струменеві прилади часто мають ділянки, що розширюються (дифузори 3). Дифузorz підвищує ККД

приладу. Кут розкриття дифузора становить 6-7. Розрахункове рівняння ежектора з дифузором (рис. 20) має такий вигляд:

$$G_1\omega_1^2/2+G_2\omega_2^2/2=(G_1+G_2)\omega_4^2/2+(G_1/\rho_1+G_2/\rho_2)(\rho_4-\rho_2)+ \\ +G_1(\omega_1-\omega_3)^2/2+G_2(\omega_1-\omega_3)^2/2+(G_1+G_2)(\omega_3^2+\omega_4^2)(1-\eta)/2,$$

де  $G_1, G_2$  – витрата інжектувального та ежектувального середовищ, кг/с;  $\rho_1, \rho_2, \rho_3, \rho_4$  – швидкості, м/с, відповідно до схеми (рис. 20);  $\rho_1, \rho_2$  – густина відповідно до схеми (рис. 20);  $P_2, P_4$  – статичний тиск, Па, в перерізах II і IV;  $\eta$  – ККД дифузора, дорівнює 0,8-0,85.

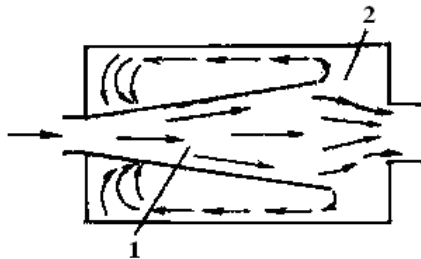


Рисунок 21 – Струмись у камері

Розрахунок ежектора зводиться до визначення  $w_x$  і далі – тиск інжектувального середовища.

**Рух струменя в камері.** Під час руху в камері 2 струмись або стикається зі стінками камери, або не стикається (рис. 21). На початку камери струмись поводитьсь як вільний струмись і залучає до руху газове середовище, що знаходиться в камері. Оскільки стінки камери перешкоджають вільному припливу газу з навколишньої атмосфери, то в районі основи струменя створюється розрідження (як в ежекторі). При виході з камери характер руху наближається до випадку взаємодії струменя з перпендикулярною площиною, з тією різницею, що частина газу виходить з камери. Камеру лишає така кількість газу, яка входить у камеру, тому частина газу, яка захоплюється в районі ос-

нови струменя, міняє напрям руху. Оскільки в районі виходу з камери тиск підвищений, а в районі основи струменя тиск знижений, то у подовжніх стінах камери утворюється потік, що рухається в напрямі, зворотному напрямку основного струменя. Таким чином, рух струменя в обмеженому просторі викликає циркуляцію газів, що заповнюють цей простір. Циркуляція газів тим інтенсивніша, чим більші початкова маса і швидкість струменя.

## **6.2. Рух газів у робочому просторі печей і сушарок**

Рух газів у робочому просторі печей і сушарок поділяють на каналний і струминний.

**Канальним** називають рух, який здійснюється в результаті потенційної енергії потоку. Наприклад, рух газів у димарі за рахунок зменшення геометричного тиску або в горизонтальному каналі за рахунок зменшення статичного тиску.

**Струминним** називають рух, який здійснюється за рахунок динамічної дії струменів.

Рух газів організують, ґрунтуючись на властивостях вільних і обмежених струменів з урахуванням вимог до теплової роботи печей і сушарок. Наприклад, для забезпечення рівномірної температури в печі паливо спалюють, використовуючи велику кількість пальників або форсунок, рівномірно розподілених по печі. Унаслідок енергійного перемішування окремих струменів-факелів відбувається вирівнювання температури в пічному просторі.

Струмені-факели не спрямовують безпосередньо на виробу, що нагріваються, щоб уникнути їх місцевого перегріву. Пальники і форсунок розташовують по можливості далі від робочих вікон та інших отворів, щоб за рахунок розрідження, що створюється в місцях виходу струменів-факелів, у вікна та інші отвори не підсмоктувалося холодне повітря.

Пальники і форсунки не розміщують навпроти робочих вікон печі, оскільки це при невеликій відстані між ними призводить до вибивання нагрітих газів із печі.

Щоб уникнути вибивання нагрітих газів і підсмоктування холодного повітря, тиск на поді печей підтримують близьким до нуля. У нагрівальних і термічних печах вікна для відсмоктування продуктів згоряння палива розташовують на рівні поду печі. Властивість обмежених струменів викликати циркуляцію газів використовують для вирівнювання температури в пічному просторі, а також для зниження температури, що розвивається при горінні палива. Це досягається підсмоктуванням стосовно продуктів горіння, що остигнули (які пройшли біля виробів, що нагрівалися, і частково віддали їм свою теплоту) до продуктів горіння, що знов утворилися. Така багатократна рециркуляція продуктів горіння сприяє швидшому і рівномірному нагріванню виробів у печах і сушарках.

У нагрівальних печах пальники або форсунки розміщують безпосередньо в робочому просторі печі. У печах для термообробки пальника або форсунки розташовують у підподових топках (рис. 22 а), щоб уникнути місцевого перегрівання виробів. У такій печі організована інтенсивна циркуляція газів. Вона забезпечується тим, що продукти горіння виходять з пальника або форсунки з більшою швидкістю, завдяки чому біля кореня факела утворюється розрідження, яке поширюється на канал А. Продукти горіння проходять через топку Б і виходять через канал В у робочу камеру Г; частина з них йде в димовідвідну систему, а частина підсмоктується знову в топку Б через канал А.

У сучасних печах для термообробки застосовують інтенсивнішу рециркуляцію за допомогою вентиляторів, поміщених у робочий простір печей.

Сушарки ливарних цехів в основному опалюються газом. Оскільки температура сушіння порівняно низька, па-

льники безпосередньо в робочому просторі сушарок не встановлюють. Газ спалюють у виносній топці, звідки за допомогою димососа його подають у робочу камеру. Температура газів, що подаються в робочу камеру, знижується до потрібної завдяки системі циркуляції. Гарячі гази поступають в робочу камеру по роздавальних коробах і забираються за допомогою відсмоктувальних коробів. Розташування коробів, розміри і число отворів забезпечують найбільш сприятливі умови сушіння виробів.

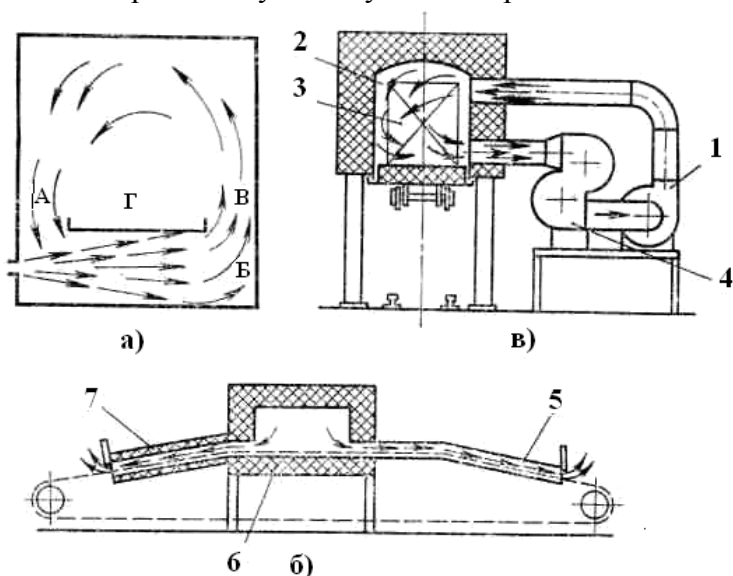


Рисунок 22 – Схема руху газів: а – у термічній печі; б – у конвеєрній печі із захисною атмосферою; в – в елеваторній печі з теплообмінником

В електропечах звичайної конструкції рух газів у процесі передачі теплоти не відіграє вирішальної ролі, як це спостерігається в газових печах. Проте в електропечах з контрольованою атмосферою характер руху атмосфери і герметичність печі мають велике значення. На рис. 22 б показана схема руху газів у конвеєрній печі нормалізації



відливань. Піч 6 сполучена з водоохолоджуванним коридором, що заповнюється так само, як і піч, контрольованою атмосферою. Для зменшення підсмоктувань повітря і скорочення витрати контрольованої атмосфери завантажувальний 7 і розвантажувальний 5 кінці печі опущені.

На рис. 22 в зображена схема руху газів у елеваторній електричній випалювальній печі із захисною атмосферою під час проміжного охолодження термооброблюючих виливків. Рециркуляційний вентилятор 1 *відсмоктує* газу з пічного простору 2, проганяє їх через водоохолоджувальний теплообмінник 4 і направляє на охолоджувані відливання 3.

### 6.3. Пристрої для створення тяги в печах

**Природна тяга** створюється за допомогою димаря, висота і площа поперечного перерізу якої залежать від кількості газів, що викидаються, і втрат тиску при проходженні газів з печі через систему димових каналів, шиберів і так далі.

Висоту димаря  $H$  визначають за формулою

$$1,3 \sum P_{\text{втр}} = H(\rho_{\text{тв}} - \rho_{\text{тг}})g - (\omega_{02}^2 - \omega_{01}^2)\rho_{\text{ог}}(1 + \alpha t_{\text{ср}})/2 - \omega_{02}^2\rho_{\text{ог}}(1 + \alpha t_{2г})/2 - \lambda(H/d_{\text{ср}})\omega_{0\text{ср}}^2\rho_{\text{ог}}(1 + \alpha t_{\text{ср}})/2,$$

де  $P_{\text{втр}}$  – втрати тиску на шляху газу від печі до труби, Па; 1,3 – коефіцієнт збільшення  $P_{\text{втр}}$  у разі форсованої роботи печі;  $\rho_{\text{тв}}$ ,  $\rho_{\text{ог}}$ ,  $\rho_{\text{тг}}$  – щільність повітря і газу при 0 і  $t \pm C$  і 101,3 Па, кг/м<sup>3</sup>;  $g$  – прискорення вільного падіння;  $\omega_{01}$ ,  $\omega_{02}$  – умовні швидкості газу в перерізах I–I і II–II, м/с ( $\omega_{01} = 1,2-2$  і  $\omega_{02} = 2,5-3$  м/с);  $\omega_{0\text{ср}}$  – середня умовна швидкість газу в трубі, м/с;  $t_{\text{тг}}$  грам – середня температура газу по висоті труби, °C;  $t_{2г}$  – температура газу в перерізі II –II, °C;  $d_{\text{ср}}$  – середній діаметр труби, м.

Вираз  $H(\rho_{\text{тв}} - \rho_{\text{тг}})g$  характеризує тягу, що створюється трубою за рахунок геометричного тиску. Решту трьох членів правої частини рівняння характеризують втрати тиску в самій трубі і на виході газу в атмосферу.

Член  $\lambda(H/d_{\text{ср}})\omega_{0\text{ср}}^2\rho_{\text{ор}}(1 + \alpha t_{\text{ср}})/2$  виражає втрату тиску на тертя в трубі; член  $(\omega_{02}^2 - \omega_{01}^2)\rho_{\text{ор}}(1 + \alpha t_{\text{ср}})/2$  – втрату тиску на звуження труби (високі труби будують зазвичай конусними для забезпечення міцності), а член  $\omega_{02}^2\rho_{\text{ор}}(1 + \alpha t_{2\text{г}})/2$  – втрату тиску на вихід газу з труби за рахунок раптового розширення струменя газу. Для використання вказаної формули необхідно знати температуру газів біля гирла труби (перерізи II– II) і їх середню температуру в трубі. Для цього заздалегідь визначають висоту труби за наближеною формулою  $H = (20-25) d_{\text{в}}$ , де  $d_{\text{в}}$  – діаметр гирла.

Використовуючи набуте значення висоти і задавшись падінням температури газів на 1 м висоти (у цегляних труб воно становить 1,5-1,6°C/м, у залізних без футерування 3–4°C/м висоти), визначають  $t_{2\text{г}}$  і  $t_{\text{ср}}$ . Співвідношення між  $d_{\text{в}}$  і  $d_{\text{осн}}$  (перерізи I– I і II – II) беруть  $d_{\text{осн}} = 1,5d_{\text{в}}$ .

**Штучна тяга** може бути створена за допомогою декількох систем, основні з яких – відсмоктування вентилятором і тяга побічної дії. Димососи використовують як відцентрові вентилятори низького тиску. Вентилятори з вуглецевої сталі успішно працюють при 200-250°C, а при 400-600°C застосовують спеціальні вентилятори з водоохолоджуваними підшипниками і валами. Підбирають вентилятори за номограмами або каталогами. При цьому за основний критерій беруть годинну витрату газу і суму втрат тиску (зазвичай із запасом, що дорівнює 25%). Тягу побічної дії створюють за допомогою ежекторів.

#### **6.4. Поняття теорії подібності при проектуванні печей і сушарок**

У промислових печах і сушарках проходить велика кількість теплових і гідродинамічних процесів, вивчення яких безпосередньо на печах і сушарок важко або неможливо. У цих випадках застосовують моделювання. Створюють лабораторні моделі печей і установок, процеси в яких подібні до процесів, що проходять у промислових агрегатах, що діють. Подібність процесів у зразках (промислових агрегатах) і в моделях досягається при дотриманні певних умов на основі теорії подібності.

Термін подібності запозичений з геометрії. Знаючи умови геометричної подібності, можна вирішити ряд практичних завдань. Поняття подібності поширюється на будь-які фізичні явища. Так, теплова подібність – це подібність температур і теплових потоків; гідродинамічна подібність – це подібність сил, що викликають подібні рухи (наприклад, двох подібних потоків газу).

Фізичні явища вважаються подібними, якщо вони одного і того самого роду, якісно однакові й описуються математичними рівняннями однакових форм і змісту. Крім того, має бути дотримана геометрична подібність систем, у яких проходять ці явища. При розгляді подібних явищ можна зіставляти тільки однорідні величини (температуру з температурою, швидкість зі швидкістю і т. д.) в подібних точках простору і в подібні моменти часу.

Коефіцієнт пропорційності називають константою подібності. Для теплової подібності двох потоків газу необхідно, щоб потоки були обмежені стінками геометрично подібній конфігурації і щоб у всьому об'ємі системи були подібні швидкість, в'язкість, температура та інші фізичні величини, які характеризують явище.

Проте при подібності складних фізичних явищ, які характеризуються великим числом величин, константи подібності цих величин не можна вибирати довільно. Окрім постійності стосунків однорідних величин, є ще додаткові умови. Сутність цих умов у тому, що у подібних явищ існує тотожність особливих величин, що називаються критеріями подібності.

Критерій – це безрозмірний комплекс, що складається з величин, що характеризують явище.

*У подібних явищ критерії подібності однакові, і, навпаки, якщо критерії подібності однакові, то явища подібні.* У печах і сушарках гідродинамічні процеси проходять разом із процесами горіння і теплообміну. Точний облік явищ горіння і теплообміну виражається дуже складними математичними рівняннями і робить моделювання практично неможливим. Тому моделюється рух газів, причому процеси горіння і теплообміну, дія сил тяжіння, зміна густини і в'язкості газу, негерметичність печі та інші чинники вважають за другорядні. Газ розглядають як нестискувану рідину зі сталими фізичними властивостями, рухому в закритому руслі.

Рівняння, що описують рух газу за вищезгаданих умов, приводять до безрозмірного вигляду за допомогою критеріїв.

Це критерії Рейнольдса  $Re$  і Ейлера  $Eu$ .

**Критерій Рейнольдса**  $Re = \rho d_{гидр} / \mu$  є відношенням інерційних сил потоку газу (рідини), що виражаються швидкістю  $\rho$ , до сил внутрішнього тертя, вираженим коефіцієнтом кінетичної в'язкості  $\mu$ . Критерій Рейнольдса служить показником характеру руху газу (рідини). Рух газу може бути ламінарним (шаруватим) або турбулентним (вихровим). При ламінарному русі елементарні цівки газу проходять паралельно, при турбулентному вони рухаються у напрямі основного потоку вихороподібно, невпорядковано.

При перехідному режимі рух газів має перехідний характер.

При  $Re = 2300$  рух газу (рідини) ламінарний, при  $Re = 10000$  – турбулентний. При  $Re = 2300-10000$  характер руху газів перехідний. Вказані межі значень  $Re$ , безумовно, справедливі тільки для випадку руху газів (рідини) по гладкому круглому трубопроводу. У практиці ці межі зміщуються й інколи значно. Проте в більшості технічних розрахунків руху газів і рідин використовують вказані значення  $Re$ .

**Критерій Ейлера**  $Eu = \Delta p / \rho \omega^2$  є відношенням зміни потенційної енергії елемента газу в потоці при деякому його переміщенні до подвоєної кінетичної енергії цього елемента. Для дотримання гідродинамічної подібності необхідно три умови: геометрична подібність зразка і моделі; рівність критеріїв Рейнольдса для зразка і моделі; подібність у місцях входу і виходу, тобто необхідно дотримуватися подібності не лише в межах робочого простору, але і в тих ділянках печі й моделі, через які подають і відводять паливо, повітря і моделювальне середовище. Дотримання зазначених умов забезпечує тотожність критеріїв Ейлера для зразка і моделі.

Теорія подібності дозволяє експериментально вивчати явища, що цікавлять нас, на моделі, результати записувати у вигляді математичних рівнянь у критеріальній формі й поширювати отримані залежності на групу подібних явищ. Отримані експериментальні залежності використовують для вирішення завдань, пов'язаних з розрахунками печей. Практично моделювання найчастіше здійснюється на гідравлічних (водяних) моделях.

## РОЗДІЛ 7

### ОСНОВИ ТЕПЛОПЕРЕДАЧІ. ХАРАКТЕРИСТИКА ПРОЦЕСІВ ТЕПЛОПЕРЕДАЧІ

#### 7.1. Температурне поле

**Теплопередача** – вчення про процеси поширення теплоти в системі тіл або усередині окремого тіла. Теплота передається від більш нагрітого тіла до менш нагрітого тіла.

Кількість теплоти вимірюють у джоулях (Дж) або кілоджоулях (кДж) і кіловатах (кВт·год):

$$1\text{Дж} = 0,001\text{кДж} = \frac{0,001}{3600}\text{кВт} \cdot \text{год.}$$

Або

$$1\text{ кВт} \cdot \text{год} = 3,6 \cdot 10^3\text{ кДж} = 3,6 \cdot 10^6\text{ Дж.}$$

Кількість теплоти, передану за одиницю часу, називають **тепловим потоком** ( $Q$ ). Тепловий потік у Дж або кДж за 1 с вимірюється у ватах (Вт) або кВт. Тепловий потік, віднесений до одиниці поверхні (зазвичай  $1\text{ м}^2$ ), називають **поверхневою щільністю теплового потоку** ( $q$ ) і вимірюють у  $\text{Вт}/\text{м}^2$  або  $\text{кВт}/\text{м}^2$ .

Кожна точка простору, де відбувається передача теплоти, характеризується певною температурою. Згідно з ГОСТ 8.417-81 допускається застосовувати, окрім температури Кельвіна (позначення  $T$ ), температуру Цельсія (позначення  $t$ ), визначувану виразом  $t = T - T_0$ , де  $T_0 = 273,15\text{ К}$ . Температура Кельвіна виражається в кельвінах (К), температура Цельсія – в градусах Цельсія ( $^{\circ}\text{C}$ ). За розміром градус Цельсія дорівнює кельвіну.

Інтервал, або різницю температур Кельвіна, виражають у кельвінах. Інтервал, або різницю температур Цельсія, допускається виражати як у кельвінах, так і в градусах Цельсія.

Сукупність значень температури в даний момент часу для всіх точок простору називають **температурним полем**. Температура  $t$  є функцією координат  $x, y$  і  $z$  і часу  $\tau$ :  $t = \varphi(x, y, z; \tau)$ . Якщо температура залежить від часу, то температурне поле називають нестационарним. Якщо температура не змінюється в часі, то поле називають стаціонарним:  $t = \varphi(x, y, z)$ .

Як бачимо, температура є функцією трьох координат. Таке поле називається тривимірним. Якщо температура – функція двох координат  $t = \varphi(x, y)$ , то температурне поле називається двовимірним, і якщо температура – функція однієї координати, то поле одновимірне  $t = \varphi(x)$ .

Геометричне місце точок, що мають однакову температуру, утворює **ізотермічну поверхню**.

На рис. 23 окремі точки півного простору, що має однакову температуру, сполучені між собою лінією – ізотермою. Розміщення ізотерм на різних ділянках може бути щільним і рідким. Щільне розміщення ізотерм вказує швидке наростання температури, рідке – на повільне.

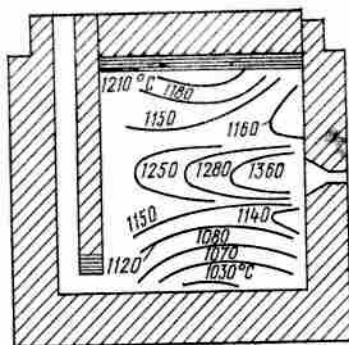


Рисунок 23 – Розподіл температури в печі

З розгляду двох ізотерм із температурою  $t$  і  $t + \Delta t$  можна зробити висновок, що в конкретній точці (наприклад 0)

найбільш різка зміна температури спостерігається у напрямі нормалі до ізотермічних поверхонь (рис. 24).

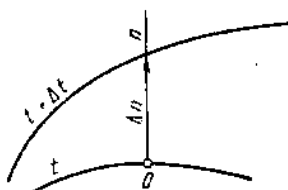


Рисунок 24 – Визначення температурного градієнта

Межа відношення різниці температур  $\Delta t$  до відстані між ізотермами по нормалі  $\Delta n$  в  $^{\circ}\text{C}/\text{м}$  називають **температурним градієнтом**

$$\lim_{\Delta n \rightarrow 0} \Delta t / \Delta n = dt/dn = \text{grad } t.$$

За його позитивний напрям беруть напрям у бік зростання температури. За температурним градієнтом можна робити висновки про те, наскільки швидко змінюється температура на даному відрізку простору.

Теплова енергія поширюється завжди тільки у бік областей з меншою температурою. Напрямок теплового потоку протилежний напрямку температурного градієнта (рис. 25).

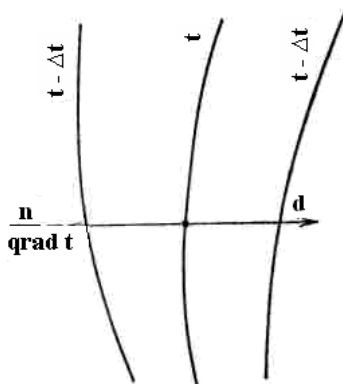


Рисунок 25 – Напрямок векторів теплового потоку і температурного градієнта



## 7.2. Види теплопередачі

Теплопередача здійснюється теплопровідністю, конвекцією і тепловим випромінюванням.

**Теплопровідність** – процес передачі теплоти від одних частинок тіла (твердого, рідкого і газоподібного) до інших без помітного переміщення мікрочасток один щодо одного.

**Конвекція** – процес передачі теплоти від одних частинок тіла (рідкого і газоподібного) до інших при інтенсивному перемішуванні середовища.

**Теплове випромінювання** – процес передачі теплоти у вигляді електромагнітних хвиль.

У печах у процесі передачі теплоти беруть участь усі три види теплопередачі, але залежно від конструкції печі та її температурного режиму той або інший вигляд може бути визначальним. Наприклад, у печах з температурою до 600°C основна кількість теплоти до поверхні тіла, що нагрівається, передається за рахунок конвекції. У печах з температурою 1200°C і вище основна кількість теплоти до поверхні тіла, що нагрівається, передається випромінюванням.

З цієї причини всі низькотемпературні печі обладнані вентиляторами, які забезпечують інтенсивну циркуляцію газів у робочому просторі печі. Для запобігання місцевому перегріву матеріалу, що нагрівається, або деталей джерело теплоти (електронагрівач або газовий пальник) повинне розміщуватися не в робочому просторі печі, а поза ним. У низькотемпературних печах паливо згорає в окремих топках, відокремлених від робочого простору печі стінкою або екраном.

Теплота, що надійшла на поверхню тіла, що нагрівалося, поширюється в його внутрішні частини теплопровідністю. Ця теплота витрачається на зміну тепловмісту тіла (у

нагрівальних печах), плавлення (у плавильних печах) або випар вологи (у сушильних установках).

Продукти горіння палива, що мають найбільш високу температуру, проходячи через пекти, віддають теплоту кладці і виробам, що нагріваються. Передача теплоти від продуктів горіння здійснюється за рахунок конвекції (на рис. 26 – хвиляста лінія) і випромінювання (на рис. 26 – суцільна лінія). Внутрішня поверхня стінки печі має вищу температуру, ніж зовнішня поверхня стінки.

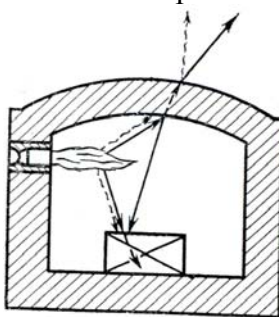


Рисунок 26 – Схема теплопередачі в печі

Передача теплоти через стінку відбувається за рахунок теплопровідності (на рисунку штрихова лінія), в основному при стаціонарному температурному полі в ній.

Зовнішня поверхня стінки печі має вищу температуру, ніж повітря, що оточує її, і простір. Теплота передається повітрю конвекцією, а навколишньому простору – випромінюванням.

Вироби, що, як правило, нагріваються мають температуру нижче за температуру не лише продуктів горіння, але і внутрішніх поверхонь стінок печі, тому вони отримують теплоту від продуктів горіння за рахунок конвекції і випромінювання, а від стінок – за рахунок випромінювання. Поширення теплоти в тілах, що нагріваються, завжди є процесом теплопровідності при нестационарному температурному полі. Знання закономірностей процесів теплопе-

редачі в печі дозволяє правильно вирішувати питання швидкого і рівномірного нагрівання виробів, зменшення теплових втрат через стінки печі і так далі.

Розрізняють теплопередачу просту, або одноступінчасту, коли теплота передається, наприклад, від газу до твердого тіла (газ – тверде тіло), і складну, або багатоступінчасту, коли теплота передається, наприклад, від газу до газу через тверде тіло (газ – тверде тіло – газ). У першому випадку інтенсивність теплопередачі характеризується коефіцієнтом тепловіддачі  $\rho$ , а в другому – коефіцієнтом теплопередачі  $k$ . Коефіцієнт тепловіддачі  $\rho$  має ту саму одиницю виміру, що і коефіцієнт теплопередачі  $k$ , Вт/(м<sup>2</sup>·К).

## РОЗДІЛ 8 ТЕПЛОПРОВІДНІСТЬ

### 8.1 Основний закон теплопровідності

Як наголошувалося, теплопровідність – це процес поширення теплової енергії шляхом безпосереднього зіткнення частинок тіла. Теплопровідністю передається теплота в газах, рідинах і твердих тілах.

Основний закон поширення теплоти шляхом теплопровідності має вигляд

$$q = -\lambda \text{grad} t ,$$

де  $q$  – поверхнева щільність теплового потоку, Вт/м<sup>2</sup>;  $\lambda$  – теплопровідність, Вт/(м·К).

Знак « $\leftarrow$ » у правій частині рівняння свідчить про те, що напрями теплового потоку і температурного градієнта протилежні. Числове значення показує, яка кількість теплоти в Дж проходить через стінку товщиною 1 м, що має поверхню 1 м<sup>2</sup> при різниці температур на внутрішній і зовнішній поверхнях стінки 1°С.

Теплопровідність  $\lambda$  – фізичний параметр речовини – залежить від властивостей тіла: структури, об'ємної маси, тиску і температури. Для газів  $\lambda = 0,005\text{--}0,5$  Вт/(м·К); з підвищенням температури зростає. Для рідин  $\lambda = 0,08\text{--}0,6$  Вт/(м·К); з підвищенням температури зменшується. Для теплоізоляційних і вогнетривких матеріалів  $\lambda = 0,2\text{--}10$  Вт/(м·К); з підвищенням температури  $\lambda$  зростає. Для металів  $\lambda = 2\text{--}360$  Вт/(м·К); з підвищенням температури  $\lambda$  для більшості металів зменшується.

Розглянемо деякі випадки передачі теплоти теплопровідністю для стаціонарного температурного поля.

## 8.2. Теплопровідність плоскої стінки

**Плоска одношарова стінка.** Маємо стінку товщиною  $S$  з матеріалу з теплопровідністю  $\lambda$ . Температура зовнішніх поверхонь стінки  $t_1$  і  $t_2$ . Температура змінюється тільки у напрямі осі  $x$  (рис. 27), тобто температурне поле одновимірне і плоске, ізотермічні поверхні розміщені паралельно осі  $t$ . При стаціонарному температурному полі граничні умови можна записати так: при  $x = 0$   $t = t_1$ ; при  $x = S$   $t = t_2$  і  $t_1 > t_2$ .

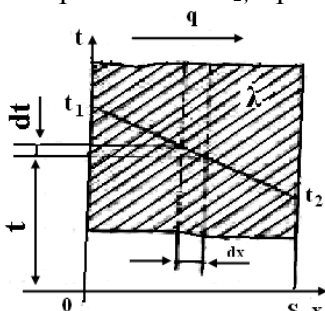


Рисунок 27 – Плоска одношарова стінка

Розглянемо шар стінки між двома ізотермічними поверхнями з температурою  $t$  і  $t + st$ . Для цього шару

$$q = -\lambda \cdot dt/dx \text{ або } dt = -q \cdot dx/\lambda.$$

Після інтеграції цього виразу отримаємо

$$t = -qx/\lambda + C, \quad (5)$$

де  $C$  – константа інтеграції.

Константу  $C$  визначають з граничних умов:  $x = 0$ ,  $t = t_1$ .

Підставляючи ці значення в рівняння (5), отримаємо

$$t_1 = -q \cdot 0/\lambda + C, \quad C = t_1.$$

При підстановці в рівняння (5) граничних умов ( $x = S$ ,  $t = t_2$ ) і константи інтеграції знаходимо

$$t_2 = -qS/\lambda + t_1.$$

Потім визначаємо поверхневу щільність теплового потоку

$$q = -\lambda(t_2 - t_1)/S = \lambda(t_1 - t_2)/S = (t_1 - t_2)/R,$$

де  $R = S/\lambda$  – тепловий опір стінки.

Тепловий потік через стінку з поверхнею  $F$  ( $\text{м}^2$ )

$$Q = qF.$$

Кількість теплоти за час  $\tau$  (с)

$$Q_\tau = Q\tau.$$

**Плоска багатошарова стінка.** Багатошаровою називається стінка, що складається з декількох різнорідних шарів. На печах, як правило, застосовують багатошарові стінки. Наприклад, перший шар (з боку робочого простору печі) складається з шамоту, другий – з діатоміту, третій – з азбестового картону і четвертий шар – сталевий лист каркаса печі.

Розглянемо стінку, що складається з трьох шарів (рис. 28). Теплопровідності матеріалів кожного шару різні й відповідно дорівнюють  $\lambda_1$ ,  $\lambda_2$ ,  $\lambda_3$ ; товщина шарів  $S_1$ ,  $S_2$ ,  $S_3$ .

Температури зовнішніх поверхонь дорівнюють  $t_1$  і  $t_4$ . Шари щільно прилягають один до одного і в місці їх контакту мають однакову температуру. Тепловий потік напра-

влений від поверхні з температурою  $t_1$  до поверхні з температурою  $t_4$ .

Поверхнева щільність теплового потоку ( $\text{Вт}/\text{м}^2$ ) через перший шар

$$q_1 = \lambda_1 (t_1 - t_2) / S_1,$$

через другий шар

$$q_2 = \lambda_2 (t_2 - t_3) / S_2,$$

через третій шар

$$q_3 = \lambda_3 (t_3 - t_4) / S_3.$$

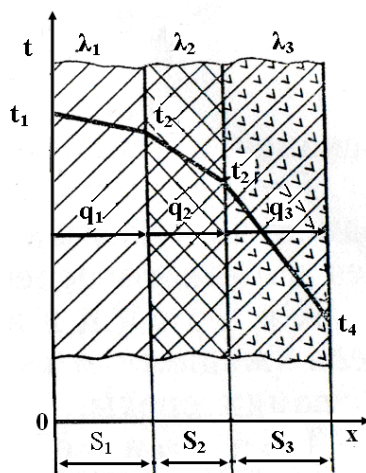


Рисунок 28 – Плоска багатошарова стінка

При стаціонарному температурному полі поверхнева щільність теплового потоку через перший шар дорівнює поверхневій щільності теплового потоку через другий шар і відповідно третій шар, тобто

$$q_1 = q_2 = q_3 = q.$$

Тоді зміна температури в кожному шарі

$$t_1 - t_2 = q S_1 / \lambda_1,$$

$$t_2 - t_3 = q S_2 / \lambda_2,$$

$$t_3 - t_4 = q S_3 / \lambda_3.$$

Складаючи ліві і праві частки цих рівнянь, отримаємо

$$t_1 - t_4 = q \left( \frac{S_1}{\lambda_1} + \frac{S_2}{\lambda_2} + \frac{S_3}{\lambda_3} \right),$$

звідки поверхнева щільність теплового потоку (Вт/м<sup>2</sup>)

$$q = (t_1 - t_4) / \left( \frac{S_1}{\lambda_1} + \frac{S_2}{\lambda_2} + \frac{S_3}{\lambda_3} \right).$$

Температуру між шарами  $t_2$  і  $t_3$  можна визначити за такими рівняннями:

$$t_2 = t_1 - q S_1 / \lambda_1; \quad t_3 = t_2 - q S_2 / \lambda_2.$$

Якщо стінка складається з  $n$  шарів, то

$$q = (t_1 - t_{n+1}) / \left( \frac{S_1}{\lambda_1} + \frac{S_2}{\lambda_2} + \frac{S_3}{\lambda_3} + \dots + \frac{S_n}{\lambda_n} \right).$$

При нестационарному тепловому потоці, тобто коли стінка прогрівається або охолоджується,  $q_1$ ,  $q_2$ ,  $q_3$  не тотожні між собою.

**Приклад 1.** Визначити тепловий потік через плоску одношарову стінку. Матеріал стінки – шамот:  $S = 0,35$  м,  $F = 2$  м<sup>2</sup>,  $t_1 = 1000^\circ\text{C}$ ,  $t_2 = 250^\circ\text{C}$ . Середня температура стінки

$$t_{cp} = (t_1 + t_2) / 2 = (1000 + 250) / 2 = 625^\circ\text{C}.$$

Теплопровідність шамота при  $625^\circ\text{C}$

$$\lambda = 0,84 + 0,0006t = 0,84 + 0,0006 \cdot 625 = 1,22 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К}).$$

Поверхнева щільність теплового потоку

$$q = \lambda (t_1 - t_2) / S = 1,22(1000 - 250) / 0,35 = 2614 \text{ Вт}/\text{м}^2.$$

Тепловий потік

$$Q = qF = 2614 \cdot 2 = 5228 \text{ Вт} \approx 5,2 \text{ кВт}.$$

**Приклад 2.** Визначити кількість і вартість теплоти тришарової стінки електричної печі, що втрачається, за добу, і температуру на межах шарів. Площа поверхні стінки  $15$  м<sup>2</sup>. Температура внутрішньої стінки  $t_1 = 800^\circ\text{C}$ , зов-

нішньої  $t_4 = 50^\circ\text{C}$ . Внутрішній шар із шамоту:  $S_1 = 0,23$  м;  $1 = 1,2$  Вт/(м·К). Середній шар з діатоміту:  $S_2 = 0,115$  м;  $2 = 0,15$  Вт/(м·К). Зовнішній шар з шлаковини:  $S_3 = 0,05$  м;  $3 = 0,07$  Вт/(м·К). Вартість 1 кВт·год електричної енергії 0,85 коп.

Поверхнева щільність теплового потоку (Вт/м<sup>2</sup>)

$$q = (t_1 - t_4) / (S_1/\lambda_1 + S_2/\lambda_2 + S_3/\lambda_3) =$$

$$= (880 - 50) / (0,23/1,2 + 0,115/0,15 + 0,05/0,07) = 448.$$

Тепловий потік

$$Q = qF = 448 \cdot 15 = 6720 \text{ Вт} = 6,72 \text{ кВт}.$$

Кількість теплоти, що втрачається стінкою за добу:

$$Q_\tau = Q\tau = 6,72 \cdot 3600 \cdot 24 = 580608 \text{ кДж}.$$

Кількість теплоти, що втрачається стінкою за добу:

$$Q_\tau = Q\tau = 6,72 \cdot 24 = 161,3 \text{ кВт·год}.$$

Вартість теплоти, стінкою, що втрачається, за добу:

$$Q_\tau \cdot 0,85 = 161,3 \cdot 0,85 = 137 \text{ коп} = 1,37 \text{ грн}.$$

Температура на межі шамотного і діатомітового шарів

$$t_2 = t_1 - qS_1/\lambda_1 = 800 - 448 \cdot 0,23/1,2 = 714 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Температура на межі шарів з діатоміту і шлакової вати

$$t_3 = t_2 - qS_2/\lambda_2 = 714 - 448 \cdot 0,115/0,15 = 371 \text{ }^\circ\text{C}.$$

### 8.3. Теплопровідність циліндричної стінки

Димарі, вагранки, барабанні печі, склепіння печей мають стінку циліндричної форми. При достатній довжині циліндричної одношарової стінки температура в ній змінюється тільки в радіальному напрямі  $x$  (рис. 29). Температурне поле в такій стінці – одновимірне, а ізотермічні поверхні мають циліндричну форму, і їх вісь збігається з віссю стінки. Поширення теплоти теплопровідністю через циліндричну стінку відрізняється від поширення теплоти через плоску стінку, оскільки у циліндричної стінки площа її внутрішньої поверхні менша за площу зовнішньої.



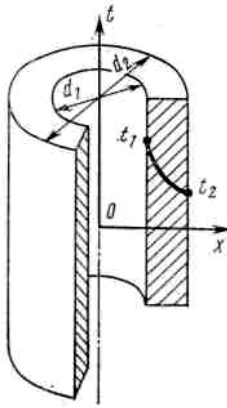


Рисунок 29 – Циліндрична одношарова стінка

Тепловий потік, що проходить через стінку труби (Вт)

$$Q = 2\pi\lambda l(t_1 - t_2)/\ln(d_2/d_1),$$

де  $l$  – довжина труби, м;  $\lambda$  – теплопровідність матеріалу стінки, Вт/(м·К);  $d_1$ ,  $d_2$  – внутрішній і зовнішній діаметри труби, м;  $t_1$ ,  $t_2$  – температура внутрішньої і зовнішньої поверхонь труби, С.

Тепловий потік через багатшарову циліндричну стінку (Вт)

$$Q = 2\pi l(t_1 - t_{n+1}) / \left( \frac{l}{\lambda_1} \ln(d_2/d_1) + \dots + \frac{l}{\lambda_n} \ln(d_{n+1}/d_n) \right).$$

#### 8.4 Нестационарна теплопровідність

При нестационарному температурному полі відбувається зміна температури тіла, тобто тіло нагрівається або охолоджується. Швидкість зміни температури тіла характеризується коефіцієнтом температуропровідності, м<sup>2</sup>/с:

$$a = \lambda / c\rho,$$

де  $C$  – питома теплоємність тіла;  $\rho$  – густина тіла.

Чим вище значення коефіцієнта температуропровідності тіла, тим з більшою швидкістю змінюється його температура.

Зміна температури тіла при нестационарному температурному полі

$$dt/d\tau = a(d^2t/dx^2 + d^2t/dy^2 + d^2t/dz^2).$$

Для однозначного розв'язання рівняння необхідно задати крайові умови, які в даному випадку складаються з тимчасових і граничних умов.

Тимчасові крайові умови для диференціального рівняння теплопровідності зводяться до задання функції  $t = t(x, y, z)$ , температури, що характеризує розподіл, у тілі, що нагрівається, в якийсь певний момент, наприклад, у момент початку нагрівання. Одночасно задаються геометричні розміри тіла і його фізичні властивості.

Граничні краєві умови зводяться до задання дії навколишнього середовища на тіло, що нагрівається: 1) температури поверхні тіла залежно від часу нагрівання; 2) теплового потоку, що проходить через поверхню тіла; 3) температури навколишнього середовища та умов теплопередачі між середовищем і тілом.

Диференціальне рівняння теплопровідності розв'язують за допомогою рядів Фур'є. Обмежимося розглядом кінцевих результатів розв'язання рівняння для плити і циліндра, коли задані температура навколишнього середовища та умови теплопередачі середовища з тілом.

Розв'язання диференціального рівняння теплопровідності для поверхні і центра тіла встановлює функціональну залежність таких критеріїв: температурного критерію поверхні тіла  $T_{пов}$ , температурного критерію центра тіла  $TЦ$ , критерію Біо  $Bi$ , критерію Фур'є  $Fo$ .

У свою чергу,

$$\theta_{пов} = (t_{пич} - t_{пов}^k) / (t_{пич} - t_{пов}^н); \quad \theta_{ц} = (t_{пич} - t_{ц}^k) / (t_{пич} - t_{ц}^н);$$

$$Bi = \alpha S / \lambda; F_0 = \alpha \tau / S^2,$$

де  $t_{пч}$  – температура печі °С;  $t_{нов}^к$  – температура поверхні тіла в кінці нагрівання °С;  $t_{нов}^н$  – температура поверхні тіла на початку нагрівання °С;  $t_{ц}^к$  – температура центра тіла в кінці нагрівання °С;  $t_{ц}^н$  – температура центра тіла на початку нагрівання,  $C$ ;  $\rho$  – коефіцієнт тепловіддачі між середовищем і тілом, Вт/(м<sup>2</sup>·К);  $S$  – розрахункова товщина тіла, м;  $\lambda$  – теплопровідність тіла, Вт/(м·К);  $a$  – коефіцієнт температуропровідності тіла, м<sup>2</sup>/с;  $\tau$  – час нагрівання тіла, с.

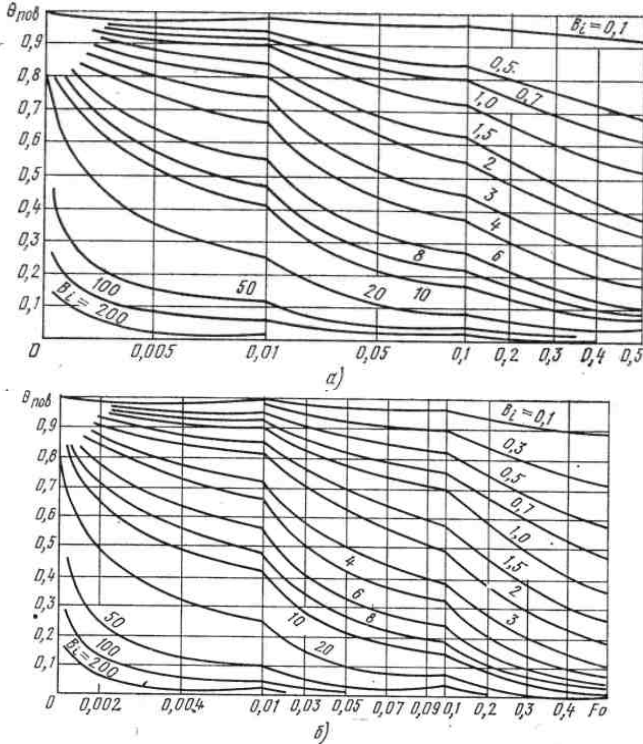


Рисунок 30 – Графіки для розрахунку нагрівання та охолодження: а – поверхні плити; б – поверхні циліндра

Графічна залежність  $T_{\text{пов}} = \varphi(Bi, Fo)$  для плити і циліндра показана на рис. 30 а, б. За графіками визначають температуру поверхні тіла. Графічна залежність  $T_{\text{ц}} = \varphi(Bi, Fo)$  для плити і циліндра показана на рис. 31 а, б. За графіками можна визначити температуру центру тіла.

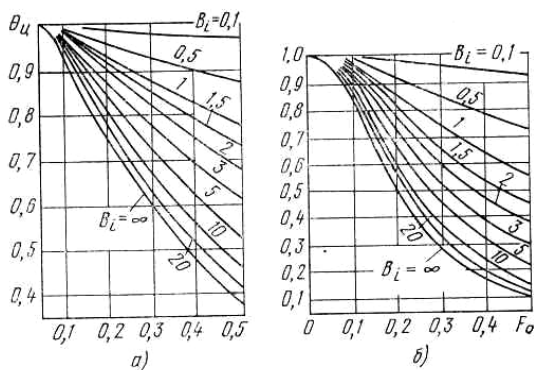


Рисунок 31 – Графіки для розрахунку нагрівання та охолодження: а – середини плити; б – середини циліндра

## РОЗДІЛ 9 КОНВЕКЦІЯ

### 9.1. Поняття конвекції

Передача теплоти конвекцією пов'язана з перенесенням самого середовища, тому інтенсивність передачі теплоти залежить від характеру руху і фізичних властивостей середовища. При ламінарному режимі руху газу або рідини перемішування середовища не спостерігається, і теплота від потоку до поверхні передається теплопровідністю. При турбулентному русі частини середовища безперервно переміщуються від центра потоку до поверхні, що різко інтенсифікує передачу теплоти. Слід мати на увазі, що і при турбулентному русі біля самої поверхні зберігається тонкий шар з ламінарним рухом, через який теплота передається теплопровідністю. Чим вища турбулентність потоку, тим тонший шар і тим інтенсивніше передається теплота.

*Процес передачі теплоти в газах і рідинах, що включає теплопровідність, називають конвекцією.*

Тепловий потік конвекцією від газу або рідини до поверхні або, навпаки, від поверхні до газу або рідини (Вт)

$$Q_k = \alpha_k (t_1 - t_2) F,$$

де  $Q_k$  – коефіцієнт тепловіддачі конвекцією, Вт/(м<sup>2</sup>·К);  $F$  – поверхня теплопередачі, м<sup>2</sup>;  $t_1 - t_2$  – різниця температур, °С.

За коефіцієнтом тепловіддачі конвекцією можна робити висновок про інтенсивність теплопередачі, тобто про те, яка кількість теплоти в Дж передається через поверхню, що дорівнює 1 м<sup>2</sup> за 1 с при різниці температур між газом і поверхнею, що становить 1°С.

Коефіцієнт тепловіддачі конвекцією залежить від форми, розміру і температури поверхні твердого тіла і від швидкості, температури, теплоємності і теплопровідності

рухомого газу. Коефіцієнт тепловіддачі конвекцією враховує передачу теплоти і теплопровідність.

Нижче розглянемо деякі закономірності теплопередачі конвекцією для стаціонарного температурного поля. Розрізняють конвекцію при вільному і вимушеному рухах газу.

## 9.2. Конвекція при вільному русі

Вільним називається рух газу або рідини, викликаний різницею щільності нагрітих і холодних частинок. Прикладом вільного руху є рух повітря біля зовнішньої поверхні печі. Температура стінки печі вища за температуру повітря, тому шари повітря, дотичні з піччю, нагріваються, їх щільність зменшується і вони піднімаються. На їх місце надходять нові, холодніші об'єми, які також нагріваються і піднімаються. Тому до тих пір, поки є різниця температур стінки печі і навколишнього повітря, повітря переміщатиметься.

Коефіцієнт тепловіддачі конвекцією при вільному русі газу залежить від розміщення поверхні в просторі. Наприклад, верх печі охолоджується інтенсивніше, ніж низ. Це пояснюється тим, що в першому випадку умови для підходу холодного повітря і відходу гарячого краще, ніж у другому (рис. 32).

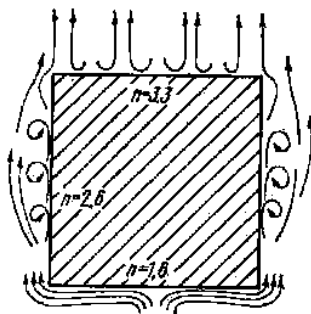


Рисунок 32 – Характер вільного руху газу біля нагрітих поверхонь

Залежно від розміщення поверхні в просторі коефіцієнт тепловіддачі конвекцією при вільному русі газу

$$\alpha_k = n^4 \sqrt{t_1 - t_2},$$

де  $n$  – коефіцієнт, що залежить від розміщення поверхні в просторі (2,6 – для вертикальної поверхні, 3,3 – для горизонтальної поверхні, поверненої вгору, 1,6 – для горизонтальної, поверненої вниз);  $t_1 - t_2$  – різниця температур поверхні і газу.

### 9.3 Конвекція при вимушеному русі

Вимушеним називається рух, викликаний дією насоса, вентилятора і так далі. При визначенні коефіцієнта тепловіддачі конвекцією широко застосовують такі критерії подібності.

#### Критерій Нусельта

$$Nu = \alpha_k d_{\text{гидр}} / \lambda.$$

#### Критерій Прандтля

$$Pr = \nu / a,$$

де  $\nu$  – кінематична в'язкість газу,  $\text{м}^2/\text{с}$

У практичних розрахунках шуканою величиною зазвичай є коефіцієнт тепловіддачі конвекцією  $\alpha_k$ , що входить у критерій Нусельта.

Критеріальне рівняння для стаціонарного вимушеного руху має вигляд

$$Nu = \varphi(Re, Pr).$$

Теплопередача при вимушеному русі газу в основному визначається умовами руху, а тому для кожного конкретного виду руху розрахункові формули різні.

**Теплопередача при вимушеному русі газу в трубах.** Для відносно коротких труб ( $l/d < 50$ ) на теплопередачу роблять вплив зміни швидкості на вхідній ділянці труби. Як при ламінарному, так і при турбулентному режимі руху

у стінці труби завжди є шар, в якому газ рухається ламінарно. Це так званий ламінарний примежовий шар (шар Прандітля). При вході в трубу товщина  $s$  примежового шару дорівнює нулю. Довжина ділянки стабілізації руху для ламінарного режиму дорівнює  $0,03d \cdot Re$ , а для турбулентного режиму –  $40d$ . Товщина примежового шару, поступово збільшуючись від входу в трубу до кінця ділянки стабілізації, досягає граничного значення

$$s = 64,2 \cdot d / Re^{0,9}.$$

При **ламінарному режимі** руху газу і відсутності вільного руху газу в трубі перенесення теплоти в радіальному напрямі відбувається тільки за рахунок теплопровідності.

Критерій Нуссельта для довгої труби ( $l/d > 50$ )

$$Nu = 13,2(Re \cdot Pr)^{0,23} (l/d)^{-0,5}, \quad (6)$$

де  $l$  – довжина труби, м;  $d$  – діаметр труби (внутрішній), м.

Для короткої труби ( $l/d < 50$ ) коефіцієнт тепловіддачі конвекцією дещо більший. В цьому випадку набуте з формули (6) значення треба помножити на поправковий коефіцієнт  $kl$  ( $l/d = 1, kl = 1,9$ ;  $l/d = 5, kl = 1,44$ ;  $l/d = 20, kl = 1,13$ ).

Досягши значення  $Re = 2000$  теплопередача різко зростає, що пояснюється виникненням вихорів у потоці газу. Для визначення критерію Нуссельта в перехідному режимі можна використовувати критерійну залежність (рис. 33).

При **турбулентному режимі** руху газу перенесення теплоти відбувається за рахунок перемішування потоку газу. Температура газу по поперечному перерізу труби практично однакова. Різка зміна температури є лише усередині примежового шару.

Критерій Нуссельта для довгої труби ( $l/d > 50$ )

$$Nu = 0,021 Re^{0,8} Pr^{0,43}. \quad (7)$$



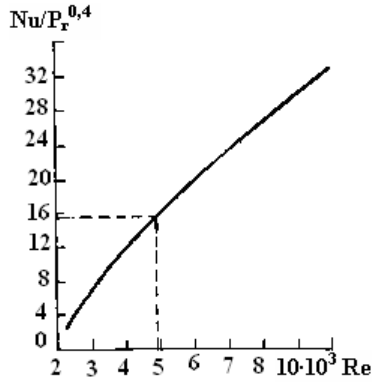


Рисунок 33 – Критерійна залежність

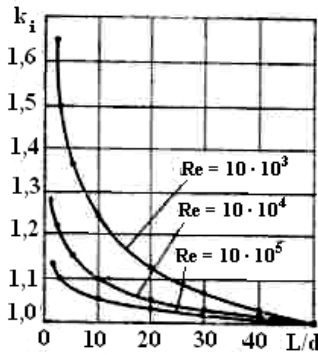


Рисунок 34 – Поправковий коефіцієнт  $k_l$  залежно від відношення  $l/d$

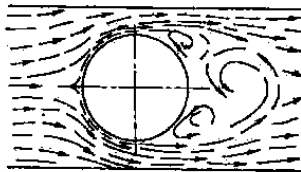


Рисунок 35 – Характер руху газу при поперечному обтіканні циліндра

Для повітря ( $Pr \approx 0,7$ ) формула спрощується:

$$Nu = 0,018 Re^{0,8} \quad (8)$$

Для коротких труб, коли  $l/d < 50$ , одержане з формули (7) значення множать на поправковий коефіцієнт  $kl$  (рис. 34).

Теплопередача при поперечному обтіканні труб. Під час руху газу зовні одиночної труби умови обтікання її різних ділянок абсолютно різні. При набіганні потоку на трубу її лобова частина обтікається газом безвідривно, а тильна частина знаходиться в зоні вихороподібного руху потоку (рис. 35). У зв'язку з цим теплопередача по колу труби неоднакова. Максимальне значення коефіцієнта тепловіддачі конвекцією спостерігається на лобовій частині циліндра ( $\varphi = 0$ ). Значення  $\alpha_k$  по поверхні циліндра у напрямі руху газу швидко зменшується і при  $\varphi = 90^\circ$  досягає мінімуму. Для тильної частини труби  $\alpha_k$  знову зростає (рис. 36).

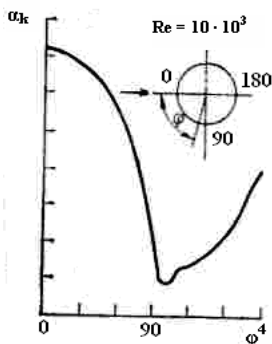


Рисунок 36 – Зміна відносного коефіцієнта тепловіддачі конвекцією по колу циліндра

Причина зниження  $\alpha_k$  на лобовій частині труби – наявність примежового шару. У лобовій частині труби він відсутній, а у міру наближення до екватора труби ( $\varphi = 90^\circ$ ) товщина примежового шару безперервно збільшується. Цей шар ніби ізолює трубу від потоку газу.

При використанні пучка труб більше поширення в промисловості дістало коридорне і шахове розміщення (рис. 37). Від схеми компоновки пучка залежать характер руху газу і обтікання трубок. Умови обтікання потоком першого ряду трубок близькі до умов обтікання одиночної труби.

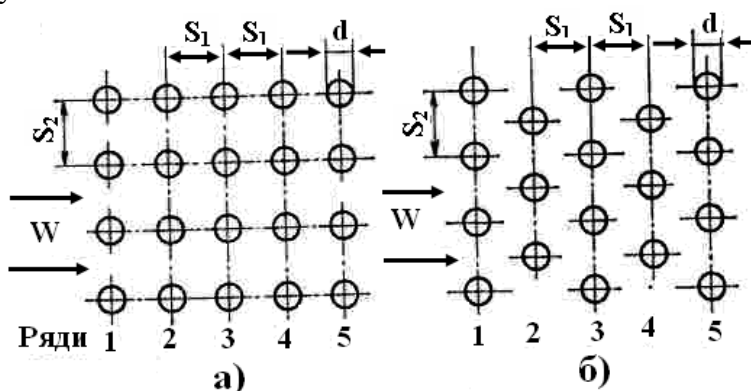


Рисунок 37 – Розміщення труб у коридорному (а) і в шаховому (б) пучках

У коридорному пучку всі труби другого і подальших рядів знаходяться позаду попередніх. Між трубами по глибині пучка утворюється зона із слабкою циркуляцією. Тому окремі труби пучка обтікаються потоком з меншою інтенсивністю, ніж одиночна труба. У шаховому пучку характер обтікання потоком окремих труб практично не відрізняється від обтікання труб першого ряду. Інтенсивність теплопередачі при шаховому розміщенні труб у пучку вища, ніж при коридорному (рис. 38).

При шаховому розміщенні труб у пучку  $Nu = 0,41 Re^{0,6} Pr^{0,33}$ . При коридорному розміщенні труб в пучку  $Nu = 0,23 Re^{0,65} Pr^{0,33}$ . У цих формулах за визначальну температуру взято середню температуру газу або рідини, за визначальну швидкість – швидкість у найвужчому

перерізі ряду труб і за визначальний розмір – зовнішній діаметр труби. Формули справедливі при  $Re = 2 (10^2 - 10^5)$ .

Для повітря вказані вище формули при коридорному розміщенні труб мають вигляд:  $Nu = 0,21 Re^{0,65}$ , при шаховому розміщенні  $Nu = 0,37 Re^{0,6}$ .

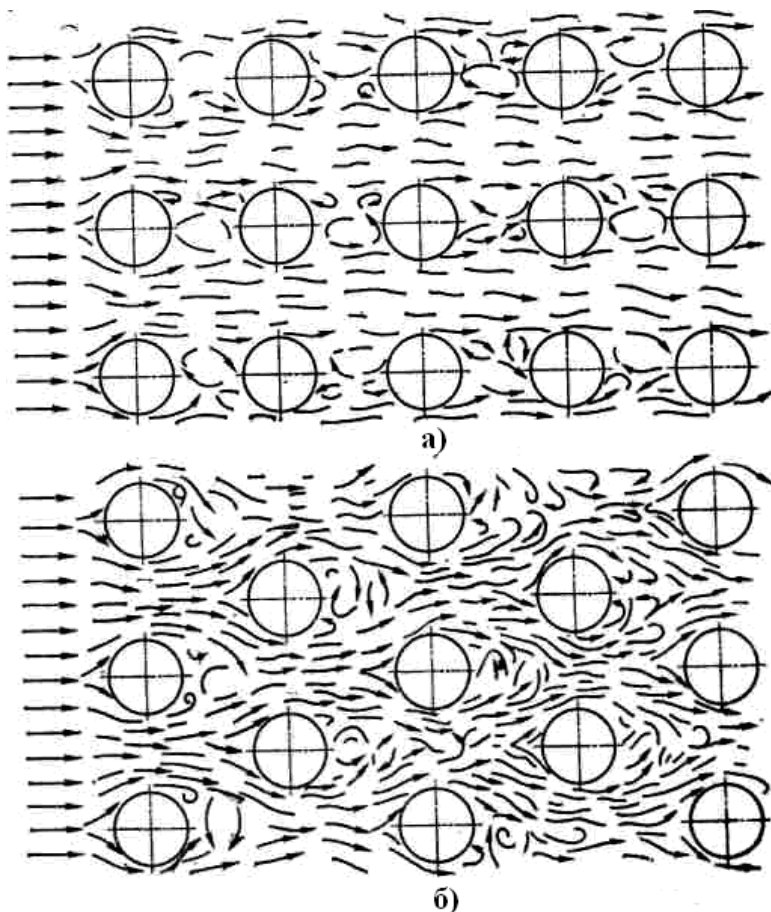


Рисунок 38 – Характер руху газу в коридорному (а) і шаховому (б) пучках труб

## РОЗДІЛ 10

### ТЕПЛОВЕ ВИПРОМІНЮВАННЯ

#### 10.1. Поняття випромінювання

Нагріте тіло випромінює теплову енергію. Передача теплової енергії відбувається за допомогою електромагнітних хвиль довжиною 0,4-400 мкм або частотою 7,5 (1011–108) Гц. Вказаний діапазон хвиль займає порівняно невелику ділянку на шкалі електромагнітних хвиль (рис. 39). Теплова енергія випромінюється видимими світловими променями в діапазоні довжин хвиль 0,4–0,8 мкм і невидимими інфрачервоними променями в діапазоні 0,8–400 мкм. При температурі зверху 3500°C теплове випромінювання відбувається в діапазоні ультрафіолетових хвиль.



Рисунок 39 – Шкала електромагнітних хвиль

Передача теплової енергії випромінюванням від джерела нагрівання до матеріалу, що нагрівається, в полум'євих і електричних печах можлива при температурі джерела нагрівання (полум'я або електронагрівач), що перевищує температуру матеріалу, що нагрівається.

Окрім теплової енергії, за допомогою електромагнітних хвиль в індукційних печах передається електрична енергія. В цьому разі електромагнітні хвилі частотою  $50-2 > 104$  Гц випромінює холодний індуктор, по якому проходить змінний електричний струм. У його потужне магнітне поле поміщають матеріал, що нагрівається.

Залежно від агрегатного полягання нагрітого тіла в тепловому випромінюванні бере участь або тонкий поверхневий шар, якщо тіло тверде (у металів  $0,0005$  мм), або весь об'єм, якщо тіло газоподібне. Зустрічаючи на своєму шляху тверді, рідкі або газоподібні тіла, теплові промені частково поглинаються, частково відбиваються і в деяких випадках частково проходять крізь ці тіла. Поглинені промені знову перетворюються на теплову енергію.

Таке перетворення енергії відбувається безперервно в системі з різною температурою тіл і в системі з однаковою температурою тіл. У останньому випадку кількість випромінюваної енергії дорівнює такій, що поглинається, тобто система знаходиться в тепловій рівновазі.

Кількість теплоти, що випромінюється за одиницю часу, називають тепловим потоком випромінювання  $Q_i$  (Вт). Тепловий потік випромінювання, віднесений до одиниці поверхні, називають поверхневою щільністю теплового потоку випромінювання  $q_i$  (Вт/м<sup>2</sup>):

$$q_i = Q_i / F.$$

Допустимо, що на тіло падає тепловий потік випромінювання  $Q_{\text{випром}}$ , частина якого  $Q_A$  поглинається тілом, частка  $Q_R$  відбивається і частка  $Q_D$  пропускається (рис. 40), тобто

$$Q_{\text{и}} = Q_A + Q_R + Q_D$$

Беремо такі позначення:  $Q_A/Q_i = A$  – коефіцієнт поглинання, або поглинальна здатність;  $Q_R/Q_i = R$  – коефіцієнт відбиття, або відбивна здатність;  $Q_D/Q_i = D$  – коефіцієнт пропускання, або пропускна здатність. Тоді

$$A + r + D = 1.$$

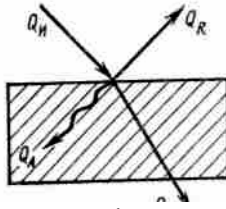


Рисунок 40 – Схема розподілу енергії випромінювання

Якщо  $A = 1$ , то  $R = D = 0$  – це означає, що вся випромінювана енергія поглинається. Такою властивістю володіє так зване **абсолютно чорне тіло**. Якщо  $R = 1$ ,  $A = D = 0$ , тобто випромінювана енергія відбивається. Такою властивістю володіє **дзеркальне тіло**, якщо відбиття відбувається згідно із законами геометричної оптики, і так зване **абсолютно біле тіло**, якщо відбиття дифузне. Якщо  $D = 1$ , то  $A = R = 0$ . В цьому випадку вся випромінювана енергія повністю проходить крізь тіло. Такою властивістю володіє так зване **абсолютно прозоре тіло**.

Уявлення про абсолютно чорне, дзеркальне і прозоре тіла умовне. Реальні тіла, що зустрічаються в природі, одночасно відбивають, поглинають і пропускають випромінювану енергію. Тверді і рідкі тіла випромінювану енергію практично не пропускають, тобто  $D = 0$ ;  $A + R = 1$ . Газоподібні тіла, навпаки, добре пропускають випромінювану енергію і погано поглинають її. Співвідношення між характеристиками теплопередачі встановлені законами теплового випромінювання.

## 10.2. Основи законів теплового випромінювання

**Закон Планка.** Інтенсивність випромінювання є функцією температури і довжини хвилі (рис. 41). Інтенсивність

випромінювання для довжини хвилі, що дорівнює нулю (тобто  $0 = 0$ ).

Із збільшенням довжини хвилі інтенсивність випромінювання спочатку зростає і досягає максимального значення, що відповідає довжині хвилі ( $\lambda_{\max}$ ), а потім зменшується і при довжині хвилі, що дорівнює нескінченності ( $\lambda_{\infty}$ ), дорівнює нулю. Кількість випромінюваної енергії для абсолютно чорного тіла характеризується на рис. 41 площею, обмеженою температурною кривою  $T$  і горизонтальною віссю графіка. З підвищенням температури кількість випромінюваної енергії збільшується і особливо у видимій частині спектра. До температури 900К випромінювання у видимій частині спектра дуже мало, і свічення тіла, нагрітого до цієї температури, відсутнє.

**Закон Віна.** З підвищенням температури максимальне випромінювання зміщується у бік коротших хвиль, тобто  $\lambda_{\max}$  при температурі  $T$  більше, ніж  $\lambda_{\max}$  при температурі  $T + \Delta T$ . Зв'язок між  $T$  і  $\lambda_{\max}$  для абсолютно чорного тіла встановлює закон Віна:

$$\lambda_{\max} T = 2896 \text{ мкм} \cdot \text{К}.$$

Закон Віна використовують для вимірювання температури тіла. Визначивши в спектрі випромінювання тіла величину  $\lambda_{\max}$ , можна далі визначити  $T$ :

$$T = 2896 \text{ мкм} \cdot \text{К} / \lambda_{\max}.$$

**Закон Стефана-Больцмана.** Поверхнева щільність теплового потоку випромінювання абсолютно чорного тіла ( $\text{Вт}/\text{м}^2$ ) пропорційна четвертому ступеню температури (К):

$$q_0 = C_0 (T/100)^4,$$

де  $C_0$  – коефіцієнт випромінювання абсолютно чорного тіла, дорівнює  $5,7 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$ .

Тіла, що випромінюють при даній температурі меншу в порівнянні з абсолютно чорним тілом кількість енергії, називають сірими.



Закон Стефана-Больцмана для сірих тіл

$$q = C(T/100)^4,$$

де  $C$  – коефіцієнт випромінювання даного тіла.

Коефіцієнт випромінювання сірого тіла завжди менший за коефіцієнт випромінювання абсолютно чорного тіла

$$C = \xi C_0,$$

де  $\xi$  – ступінь чорноти тіла, що дорівнює відношенню коефіцієнта випромінювання даного тіла до коефіцієнта випромінювання абсолютно чорного тіла, тобто  $\xi = C/c_0$ .

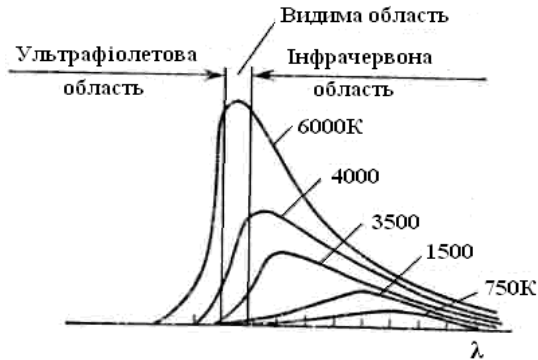


Рисунок 41 – Залежність інтенсивності випромінювання абсолютно чорного тіла від довжини хвилі та температури

Ступінь чорноти для різних матеріалів наведений у додатку 6.

**Закон Кірхгофа.** Відношення поверхневої щільності теплового потоку випромінювання тіла ( $Вт/м^2$ ) до його коефіцієнта поглинання є величина стала для всіх тіл, що мають однакову температуру, тобто

$$q_1/A_1 = q_2/A_2 = \dots = q_0/A_0,$$

де  $q_0$  – поверхнева щільність теплового потоку випромінювання абсолютно чорного тіла;  $A_0$  – коефіцієнт поглинання абсолютно чорного тіла.

Оскільки для абсолютно чорного тіла  $A_0 = 1$ , то

$$q_1/A_1 = q_2/A_2 = \dots = q_0,$$

тобто поверхнева щільність теплового потоку випромінювання абсолютно чорного тіла вища за поверхневу щільність теплового потоку випромінювання будь-якого дійсного тіла.

**Закон Ламберта.** Законом Стефана-Больцмана визначається кількість енергії  $q_0$ , що випромінюється абсолютно чорним тілом у просторі по всіх напрямках. Кількість енергії, що випромінюється по окремих напрямках, визначається законом Ламберта. Згідно з цим законом поверхнева щільність випромінювання  $q_N$  (рис. 42) у напрямі нормалі  $N$  до поверхні випромінювання  $F_1$

$$q_N = q_0/\pi = (C_0/\pi)(T/100)^4.$$

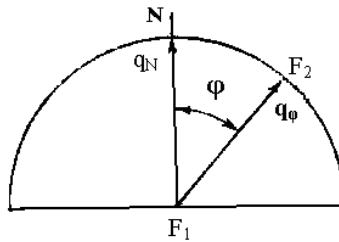


Рисунок 42 – До виведення закону Ламберта

Поверхнева щільність випромінювання в напрямі, що становить кут  $\varphi$  з нормаллю  $N$  до поверхні  $F_2$ :

$$q_\varphi = q_N \cos \varphi = (C_0/\pi)(T/100)^4 \cos \varphi.$$

### 10.3. Теплопередача випромінюванням між твердими тілами

Кількість теплоти, що передається одним тілом іншому, залежить від температури цих тіл, їх ступеня чорноти, форми і розміщення в просторі. Частина енергії, що ви-

промінюється на певну поверхню, називається кутовим коефіцієнтом. Тепловий потік від однієї поверхні до іншої

$$Q_{1-2} = \xi_{\pi} C_0 [(T_1/100)^4 - (T_2/100)^4] \phi_{1-2} F_1,$$

де  $T_1$  і  $T_2$  – температури тіл, К;  $F_1$  – площа поверхні першого тіла, м<sup>2</sup>;  $\xi_{1-2}$  – кутовий коефіцієнт випромінювання першого тіла на друге;  $\xi_{\pi}$  – зведений ступінь чорноти для двох тіл;

$$\xi_{\pi} = 1/[1 + \phi_{1-2} (1/\xi_1 - 1) + \phi_{2-1} (1/\xi_2 - 1)],$$

де  $\xi_{2-1}$  – кутовий коефіцієнт випромінювання другого тіла на перше;  $\xi_1$  і  $\xi_2$  – ступені чорноти першого і другого тіл.

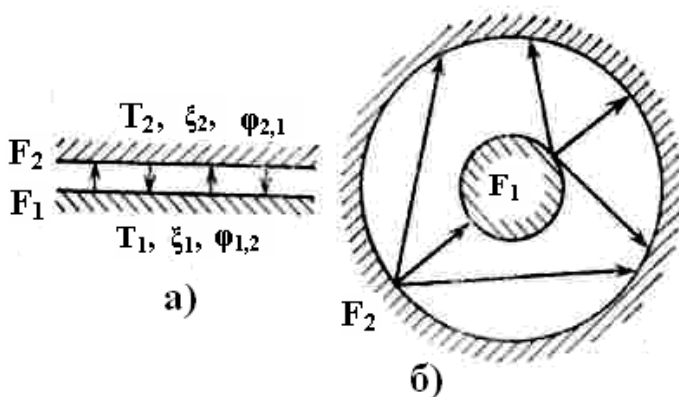


Рисунок 43 – Схема теплопередачі випромінюванням між тілами: а – паралельними; б – вимкнутими

При теплопередачі між двома нескінченно великими паралельними поверхнями (рис. 43 а) вся енергія, що випромінюється поверхнею  $F_1$ , потраплятиме на поверхню  $F_2$ , тобто кутовий коефіцієнт випромінювання першої поверхні на другу  $\phi_{1-2}=1$ . Відповідно  $\phi_{2-1}=1$ . Отже, для даного випадку  $\phi_{1-2}=\phi_{2-1}$ , і зведений ступінь чорноти

$$\xi_{\pi} = 1/(1/\xi_1 + 1/\xi_2 - 1),$$

а тепловий потік

$$Q_{1-2} = \xi_n C_0 [(T_1/100)^4 - (T_2/100)^4] F.$$

При теплопередачі між двома тілами, одне з яких знаходиться усередині іншого (рис. 43 б), поверхня  $F_2$  випромінюватиме енергію не лише на поверхню  $F_1$ , але і на себе, тобто  $\varphi_{2-1} + \varphi_{2-2} = 1$ , де  $\varphi_{2-2}$  – кутовий коефіцієнт, що враховує частину енергії, випромінюваної поверхнею  $F_2$  на себе. Поверхня  $F_1$  випромінюватиме енергію тільки на поверхню  $F_2$ , на себе випромінювати опукле тіло не може, тому  $\varphi_{1-1} = 0$ , а  $\varphi_{1-2} = 1$ .

Враховуючи, що  $\varphi_{2-1} F_1 = \varphi_{2-1} F_2$ , маємо  $\varphi_{2-1} = F_1 / F_2$  і

$$\xi_n = 1 / [(1/\xi_1 + (F_1/F_2)(1/\xi_2 - 1)].$$

Якщо  $F_1 / F_2 \approx 0$ , то  $\xi_n = \xi_1$ . Тепловий потік

$$Q_{1-2} = \xi_n C_0 [(T_1/100)^4 - (T_2/100)^4] F_1$$

При теплопередачі між двома паралельними смугами однакової ширини тепловий потік

$$Q_{1-2} = \xi_n C_0 [(T_1/100)^4 - (T_2/100)^4] F,$$

де  $F$  – поверхня смуги довжиною 1 м.

Кутові коефіцієнти для смуг однакової ширини тотожні між собою:

$$\varphi_{1-2} = \varphi_{2-1} = \sqrt{1 + (x/b)^2} - x/b,$$

де  $b$  – ширина смуги, м;  $x$  – відстань між смугами, м.

**Вплив екрана** на процес передачі теплоти випромінюванням між двома поверхнями (рис. 44) видно з такого розрахунку. Якщо екран відсутній, то поверхнева щільність теплового потоку від поверхні з температурою  $T_1$  до поверхні з температурою  $T_2$ :

$$q_{1-2} = \xi_n C_0 [(T_1/100)^4 - (T_2/100)^4].$$

Помістивши між поверхнями тонкий екран, ступінь чорноти якого такий самий, як і у поверхонь, і прийнявши, що температури його стінок однакові, складемо такі рівняння:

$$q_{1-3} = \xi_n C_0 [(T_1/100)^4 - (T_2/100)^4]$$

i

$$q_{3-2} = \xi_n C_0 [(T_1/100)^4 - (T_2/100)^4],$$

де  $q_{1-e}$  – поверхнева щільність теплового потоку від першої поверхні до екрана;  $q_{e-2}$  – поверхнева щільність теплового потоку від екрана до другої поверхні;  $T_e$  – температура екрана. Оскільки при стаціонарному режимі  $q_{1-e} = q_{e-2}$ , то

$$\xi_n C_0 [(T_1/100)^4 - (T_3/100)^4] = \xi_n C_0 [(T_e/100)^4 - (T_1/100)^4],$$

$$(T_e/100)^4 = [(T_1/100)^4 + (T_2/100)^4]/2.$$

Підставивши одержане значення  $(T_e/100)^4$  у рівняння теплопередачі поверхні з екраном і враховуючи, що  $q_{1-e} = q_{e-2} = q_{1-2}$ , отримаємо

$$q_{1-2} = \xi_n C_0 [(T_1/100)^4 - (T_2/100)^4]/2.$$

Таким чином, встановивши один екран, можна тепловий потік зменшити удвічі. При  $n$  екранах тепловий потік випромінювання зменшиться в  $n + 1$ . Якщо застосувати екран з малим ступенем чорноти, то тепловий потік ще зменшиться. Екрани знаходять широке застосування у високо-температурних вакуумних електрод печах як елементи теплової ізоляції.

Через **вікна та отвори** в стінах, склепінні або поді печі відбувається випромінювання теплової енергії. Її кількість залежить від форми і розмірів отвору:

$$Q = C_0 [(T_1/100)^4 - (T_2/100)^4] F \Phi,$$

де  $T_1$  і  $T_2$  – температури печі та простору, що оточує її, К;  $F$  – площа вікна або отвору, м<sup>2</sup>;  $\Phi$  – коефіцієнт діафрагмування (див. додаток 5).

У деяких випадках рівняння теплопередачі випромінюванням застосовують у перетвореному вигляді. Наприклад, якщо обидві частини рівняння

$$Q_{\text{випром}} = \xi_n C_0 F [(T_1/100)^4 - (T_2/100)^4]$$

розділити на різницю температур, тобто

$$Q_{\text{випром}} / (t_1 - t_2) = \xi_{\text{п}} C_0 F [(T_1/100)^4 - (T_2/100)^4] / (T_1 - T_2),$$

отримаємо

$$Q_{\text{випром}} = \xi_{\text{п}} C_0 F [(T_1/100)^4 - (T_2/100)^4] (t_1 - t_2) / (T_1 - T_2),$$

де  $t_1 - t_2 = T_1 - T_2$ , оскільки  $T + 273$ .

Позначивши

$$\alpha_{\text{випром}} = \xi_{\text{п}} C_0 [(T_1/100)^4 - (T_2/100)^4] (T_1 - T_2),$$

отримаємо, що тепловий потік випромінювання (Вт)

$$Q_{\text{випром}} = \alpha_{\text{випром}} (t_1 - t_2) F,$$

де  $\alpha_{\text{випром}}$  – коефіцієнт тепловіддачі випромінювання.

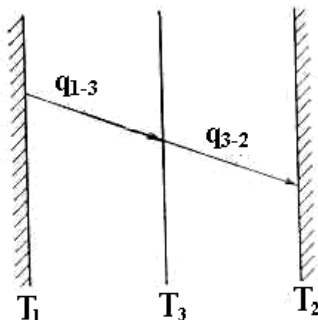


Рисунок 44 – Схема теплопередачі випромінюванням за наявності екрана

**Приклад.** Визначити тепловий потік випромінювання між двома паралельним смугами шириною 0,25 м кожна. Ступінь чорноти смуг  $\xi_1 = 0,7$ ,  $\xi_2 = 0,9$ . Температури їх поверхні  $t_1 = 800^\circ\text{C}$  і  $t_2 = 300^\circ\text{C}$ . Відстань між смугами 1 м.

Кутові коефіцієнти для двох паралельних смуг однакової ширини

$$\varphi_{1,2} = \varphi_{2,1} = \sqrt{1 + (x/b)^2} - x/b = \sqrt{1 + (1/0,25)^2} - 1/0,25 = 0,12.$$

Наведений ступінь чорноти

$$\begin{aligned}\xi_n &= 1/[1 + \varphi_{1,2}(1/\xi_1 - 1) + \varphi_{2,1}(1/\xi_2 - 1)] = \\ &= 1/[1 + 0,12(1/0,7 - 1) + 0,12(1/0,9 - 1)] = 0,94.\end{aligned}$$

Тепловий потік, віднесений до 1 м довжини смуги:

$$Q_{1-2} = \xi_n C_0 = [(T_1/100)^4 - (T_2/100)^4] \varphi_{1,2} F = 0,94 \cdot 5,7 \{[(800 + 273)/100]^4 - [(300 + 273)/100]^4\} 0,12 \cdot 0,25 \cdot 1 = 1960 \text{ Вт.}$$

#### 10.4. Випромінювання газів

Одно- і двоатомні гази (С, Н<sub>2</sub>, О<sub>2</sub>, N<sub>2</sub> і т. д.) практично не випромінюють і не поглинають променисту енергію. Ці гази прийнято називати променепрозорими. Триатомні гази і гази більшої атомарності (СО<sub>2</sub>, Н<sub>2</sub>О, SO<sub>2</sub> і т. д.) мають значну випромінювальну і поглинальну здатність. На відміну від випромінювання твердих тіл гази можуть випромінювати і поглинати променисту енергію лише в певних інтервалах довжин хвиль (смугах), розміщених у різних частках спектра випромінювання. На рис. 45 показані спектри випромінювання газового тіла (а) і поглинання (б), що мають три смуги. Поза цими смугами газове тіло не випромінює і не поглинає променисту енергію.

Велике значення для випромінювання газів має товщина газового шару: із збільшенням товщини газового шару випромінювання зростає.

Ступінь чорноти газу є функцією, що залежить від температури газу і добутку його парціального тиску на ефективну довжину променів, тобто

$$\xi = \varphi(t, \rho \cdot S_{\text{эф}}),$$

де  $t$  – температура газу, °С;  $\rho$  – парціальний тиск газу, кПа;  $S_{\text{эф}}$  – середня ефективна довжина променів, м (табл. 5).

У практичних розрахунках доводиться враховувати випромінювання газів СО<sub>2</sub> і Н<sub>2</sub>О. Ступінь чорноти газової суміші, в якій містяться гази СО<sub>2</sub> і Н<sub>2</sub>О:

$$\xi_z = \xi_{\text{CO}_2} + \beta \xi_{\text{H}_2\text{O}},$$

де  $\xi_{CO_2}$  і  $\beta\xi_{H_2O}$  – ступінь чорноти  $CO_2$  і  $H_2O$ ;  $\xi$  – поправковий коефіцієнт, що залежить від парціального тиску водяної пари. Значення  $\xi_{CO_2}$ ,  $\beta\xi_{H_2O}$  і  $\xi$  визначають за рис. 46 а, б і 47.

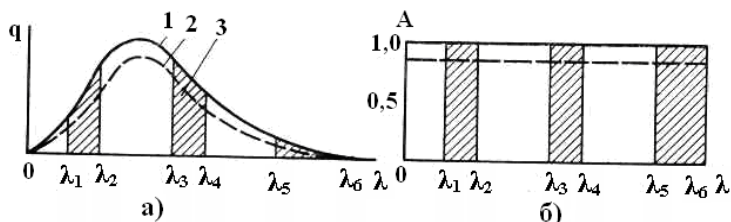


Рисунок 45 – Спектри випромінювання (а) і поглинання (б) тіл: 1 – абсолютно чорного; 2 – сірого; 3 – газового

Таблиця 5 – Середня ефективна довжина променів  $S_{\text{еф}}$  для газових тіл різних форм

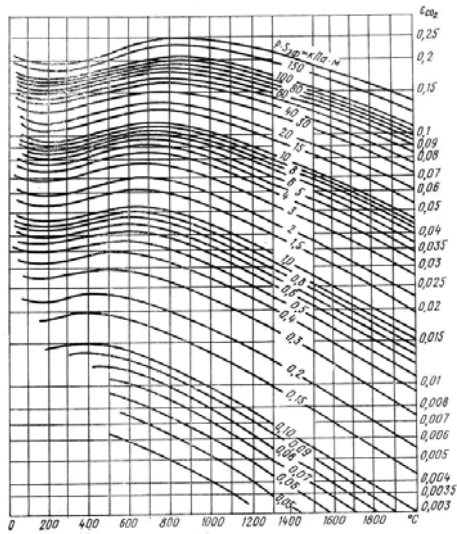
Форма газового тіла	$S_{\text{еф}}$
Куб із стороною $d$	$0,60d$
Циліндр діаметром $d$ , нескінченно довгий	$0,9d$
Плоскопаралельний шар товщиною $s$	$1,8s$
по трикутнику $x = d$	$2,8x$
по трикутнику $x = 2d$	$3,8x$
по квадрату $x = d$	$3,5x$

Знаючи  $\xi_r$ , можна визначити енергію, що випромінюється газом у порожнечу:

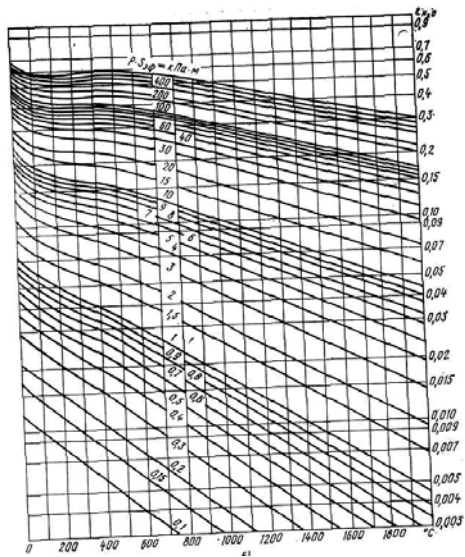
$$q = \xi_r C_0 (T_r / 100)^4 \text{ Вт} / (\text{м}^2 \cdot \text{К}).$$

При випромінюванні газу на тверду поверхню необхідно враховувати власне випромінювання поверхні.





а)



б)

Рисунок 46 – Ступінь чорноти вуглекислоти (а)  
і водяної пари (б)

Поверхнева щільність теплового потоку випромінювання газу в навколишню поверхню ( $\text{Вт}/\text{м}^2$ )

$$q = \xi_z \xi'_{\text{пов}} C_0 [(T_z/100)^4 - (T_n/100)^4],$$

де  $\xi'_{\text{пов}}$  – ефективний ступінь чорноти поверхні.

При  $\xi_{\text{пов}} = 0,8-1$   $\xi'_{\text{пов}} = 0,5 (\xi_{\text{пов}} + 1)$ .

Тепловий потік випромінювання від газу до металу, що нагрівається, в печі ( $\text{Вт}$ )

$$Q = C_{z.k.m.} F_m [(T_z/100)^4 - (T_m/100)^4],$$

де  $C_{z.k.m.}$  – зведений коефіцієнт випромінювання від газів на метал з урахуванням ролі кладки,  $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ ;  $T_z$  – температура газу,  $\text{К}$ ;  $T_m$  – температура металу,  $\text{К}$ .

Коефіцієнт  $C_{z.k.m.}$  може бути розрахований за формулою В.М.Тимофєєва, виведеною при таких допущеннях: ступінь чорноти і температура газів сталі за всім обсягом печі, температура внутрішньої поверхні кладки однакова, втрати теплоти через стінки печі компенсуються за рахунок конвекції усередині її робочого простору:

де  $F_m$  і  $F_{\text{кл}}$  – поверхні металу і кладки,  $\text{м}^2$ ;  $\xi_m$  і  $\xi_g$  – ступінь чорноти металу і газу при  $T_g$ .

Випромінювання газового і мазутного факелів залежить не лише від випромінювання трьохатомних газів, але і від випромінювання частинок саж, що містяться у факелі (продуктів розкладання вуглеводнів, розжарених частин сажового вуглецю).

**Приклад.** Визначити коефіцієнт тепловіддачі випромінювання від потоку газу до зовнішньої поверхні труб рекуператора, якщо температура газу на вході  $1100^\circ\text{C}$  і на виході з рекуператора  $900^\circ\text{C}$ . Труби розміщені в шаховому порядку (див. рис. 37). Зовнішній діаметр труб  $d = 60$  мм. Крок труб  $S_1 = 2d$ ,  $S_2 = 1,73d$ .

Візьмемо середню температуру поверхні труб  $500^\circ\text{C}$  і ступінь чорноти поверхні  $0,8$ . Газ містить  $10\%$   $\text{CO}_2$ ,  $20\%$   $\text{H}_2\text{O}$ . Загальний тиск газу  $100$  кПа.

Середня довжина світла  $S_{\text{еф}}$  в міжтрубному просторі визначається з урахуванням даних табл. 5. Для заданого кроку труб і їх розміщення відстань між їх поверхнями дорівнює діаметру труби, тому  $S_{\text{еф}} = 2,8d = 2,8 \cdot 0,06 = 0,168$  м.

Добуток парціального тиску  $\text{CO}_2$  і  $\text{H}_2\text{O}$  на середню довжину світла

$$\rho_{\text{CO}_2} S_{\text{еф}} = 10 \cdot 0,168 = 1,68 \text{ кПа} \cdot \text{м},$$

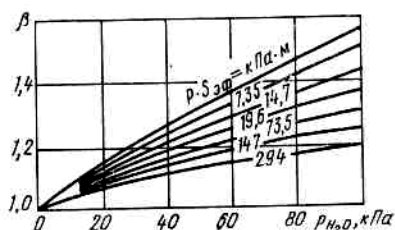
$$\rho_{\text{H}_2\text{O}} S_{\text{еф}} = 20 \cdot 0,168 = 3,36 \text{ кПа} \cdot \text{м}.$$

Середня температура газів

$$t_r = (t_r^{\text{H}} + t_r^{\text{K}}) / 2 = (1100 + 900) / 2 = 1000 \pm \text{C}$$

Ступінь чорноти  $\text{CO}_2$  і  $\text{H}_2\text{O}$  при  $1000^\circ\text{C}$  (див. рис. 46 а, б)

$$\xi_{\text{CO}_2} = 0,056; \quad \xi_{\text{H}_2\text{O}} = 0,052.$$



## 10.5. Випромінювання в індукційних печах

В області порівняльних низьких частот (див. рис. 39) печі, подача енергії від джерела випромінювання до тіла, що нагрівається, відбувається не за рахунок електромагнітних хвиль, що випромінюються гарячою поверхнею, а за рахунок електромагнітних хвиль, що випромінюються індуктором, по якому проходить змінний електричний струм. Електромагнітне поле біля індуктора характеризується напруженістю  $H$  магнітного поля і напруженістю  $E$  електричного поля.

При падінні електромагнітної хвилі на поверхню металевого тіла відбувається поглинання тілом енергії електромагнітної хвилі. Глибина проникнення електромагнітної хвилі в тіло, що нагрівається, залежить від його електричного опору і магнітної проникності, а також від частоти коливання електромагнітної хвилі. У міру проникнення хвилі в тіло напруженість магнітного поля, а відповідно й електричного, безперервно зменшується. У результаті зменшується кількість енергії, проникаючої в глибину тіла.

Таким чином, в індукційних печах енергія електромагнітної хвилі виділяється в поверхневому шарі тіла, що нагрівається, а потім теплопровідністю передається вглиб тіла.

## РОЗДІЛ 11

### ПРОЦЕСИ ТЕПЛОПЕРЕДАЧІ В ПЕЧАХ

#### 11.1 Теплопередача від одного газу до іншого через стінку

Рухомий гарячий газ передає теплоту холодній поверхні, з якою він стикається, випромінюванням і конвекцією. Загальний тепловий потік до поверхні дорівнює сумі теплових потоків випромінювання і конвекції

$$Q = Q_{\text{випром}} + Q_{\text{к}} = \alpha_{\text{випром}}(t_1 - t_2)F + \alpha_{\text{к}}(t_1 - t_2)F$$

при

$$Q = (\alpha_{\text{випром}} + \alpha_{\text{к}})(t_1 - t_2)F = \alpha(t_1 - t_2)F,$$

де  $\alpha$  – сумарний коефіцієнт тепловіддачі.

Питоме значення коефіцієнтів тепловіддачі залежить від умов теплопередачі. Так,  $\alpha_{\text{випром}}$  залежить в основному від температурного перепаду гарячого і холодного тіл, а  $\alpha_{\text{к}}$  – від швидкості газу, що вимірюється теплотою з твердою поверхнею. Розглянемо теплопередачу від одного газового середовища до іншого через плоску стінку товщиною  $S$  із теплопровідністю (рис. 48). З одного боку стінки знаходиться гарячий газ з температурою  $t_1$ , з іншого – холодне повітря з температурою  $t_4$ . Сумарний коефіцієнт тепловіддачі на гарячій стороні  $\alpha_1$ , на холодній  $\alpha_2$ . Температурне поле є стаціонарним.

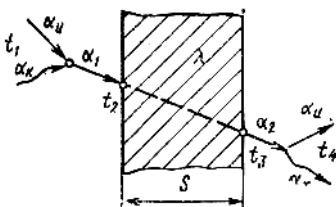


Рисунок 48 – Сумарна теплопередача через плоску стінку

Поверхнева щільність теплового потоку від гарячого газу до стінки

$$q_1 = \alpha_1(t_1 - t_2),$$

де  $t_2$  – температура стінки, дотичної з гарячим газом.

Поверхнева щільність теплового потоку через стінку

$$q_2 = \lambda(t_2 - t_3)/S,$$

де  $t_3$  – температура стінки, дотичної з холодним повітрям.

Поверхнева щільність теплового потоку від стінки до повітря

$$q_3 = \alpha_2(t_3 - t_4).$$

При стаціонарному тепловому потоці  $q_x = q_2 = q_3 = q$ .

Оскільки

$$t_1 - t_4 = q = (1/\alpha_1 + S/\lambda + 1/\alpha_2),$$

то поверхнева щільність теплового потоку

$$q = k(t_1 - t_4),$$

де  $k = 1/(1/\alpha_1 + S/\lambda + 1/\alpha_2)$  – коефіцієнт теплопередачі.

Коефіцієнт теплопередачі для багатошарової стінки

$$k = 1/(1/\alpha_1 + S_1/\lambda_1 + S_2/\lambda_2 + \dots + 1/\alpha_2),$$

де  $S_1, S_2 \dots$  – товщина шарів;  $\lambda_1, \lambda_2$  – теплопровідність шарів.

**Приклад.** Визначити поверхневу щільність теплового потоку через плоску тришарову стінку, якщо температура газів у печі  $900^\circ\text{C}$ , температура простору, що оточує піч,  $t_2 = 30^\circ\text{C}$ ;  $\alpha_1 = 200 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$   $\alpha_2 = 20 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ . Внутрішній шар стінки з піношамотною легкоатлета  $S_1 = 0,23 \text{ м}$ ,  $\lambda_1 = 0,4 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ . Середній шар із діатоміту  $S_2 = 0,23 \text{ м}$ ,  $\lambda_2 = 0,15 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ . Зовнішній шар з шлакової вати  $S_3 = 0,1 \text{ м}$ ,  $\lambda_3 = 0,07 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ .

Коефіцієнт теплопередачі

$$k = 1/(1/\alpha_1 + S_1/\lambda_1 + S_2/\lambda_2 + S_3/\lambda_3 + 1/\alpha_2) =$$

$$= 1/(1/200 + 0,23/0,4 + 0,23/0,15 + 0,1/0,07 + 1/20) = 0,28 \text{ Вт/м} \cdot \text{К}.$$

Поверхнева щільність теплового потоку

$$q = k(t_1 - t_2) = 0,28(900 - 30) = 244 \text{ Вт/м}^2.$$

Температуру внутрішньої поверхні стінки визначаємо з рівняння  $q = \alpha_1(t_1 - t_2)$ ; тоді

$$t_2 = t_1 - q/\alpha_1 = 900 - 244/200 = 899 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Температура на межі шамотного і діатомітового шарів

$$t_3 = t_2 - qS_1/\lambda_1 = 899 - 244 \cdot 0,23/0,4 = 759 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Температура на межі діатоміту і шлакової вати

$$t_4 = t_3 - qS_2/\lambda_2 = 759 - 244 \cdot 0,23/0,15 = 385 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Температура зовнішнього шару стінки печі

$$t_5 = t_4 - qS_3/\lambda_3 = 385 - 244 \cdot 0,1/0,07 = 36 \text{ }^\circ\text{C}.$$

## 11.2. Інтенсифікація теплопередачі

У ряді випадків потрібно збільшити кількість теплоти, що передається. В одних випадках це необхідно для прискорення нагрівання, в інших – для більш швидкого охолодження. Можливість інтенсифікації процесу теплопередачі визначається аналізом рівняння теплопередачі. У кожному випадку повинні розглядатися всі етапи передачі теплоти: від одного середовища до поверхні стінки; через стінку і, нарешті, від протилежної сторони стінки до іншого середовища.

Аналіз рівності, за якою визначається коефіцієнт теплопередачі, тобто

$$k = 1/(1/\alpha_1 + S/\lambda + 1/\alpha_2),$$

показує, що значення  $k$  може бути збільшене за рахунок зменшення теплових опорів  $R_2 = S/\lambda$ ,  $R_1 = 1/\alpha_1$ ,  $R_2 = S/\lambda$  і  $R_3 = 1/\alpha_2$ . Визначивши, який з перелічених теплових опорів обмежує теплопередачу, намічають шляхи зменшення

даного теплового опору. Для зменшення величини  $k$  необхідно збільшити обмежувальний тепловий опір.

У попередньому прикладі значення  $k$  визначено за формулою

$$k = 1 / (1/\alpha_1 + S_1/\lambda_1 + S_2/\lambda_2 + S_3/\lambda_3 + 1/\alpha_2),$$

тобто  $k$  залежить від п'яти теплових опорів:

$$R_1 = 1/200 = 0,005; R_2 = 0,23/0,4 = 0,57; R_3 = 0,23/0,15 = 1,5;$$

$$R_5 = 1/20 = 0,05. R_4 = 0,1/0,07 = 0,4.$$

Величина  $k$  практично залежить тільки від  $R_3$  і  $R_4$ , а решта теплових опорів не визначає теплопередачу. Для зменшення теплопередачі необхідно застосувати матеріал з меншим значенням  $\lambda_1$  або зменшити товщину стінки  $S_1$  і збільшити товщину стінки  $S_2$ .

Тепловий опір стінки, що розділяє два гази, залежить від стану її поверхні. Відкладення накипу і сажі на стінці теплообмінного апарата, наприклад рекуператора або радіаційної труби, чинить великий вплив на величину теплового потоку. Шар накипу товщиною 1 мм по теплового опору еквівалентний сталевій стінці завтовшки 40 мм, а шар сажі товщиною 1 мм – сталевій стінці 400 мм. Через відкладення не лише зменшується тепловий потік, але і збільшується температура нагрівання металевих частинок теплообмінника, що може призвести до його перегрівання і руйнування. Для виключення утворення накипу, наприклад в індукційних печах, для охолодження елементів печі використовують спеціальну знесолену воду.



## РОЗДІЛ 12

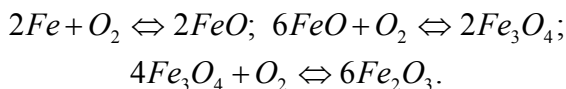
### НАГРІВАННЯ МЕТАЛУ. ВЗАЄМОДІЯ МЕТАЛУ З АТМОСФЕРОЮ ПЕЧІ

#### 12.1. Окиснення і зневуглецювання металу

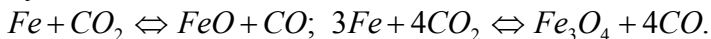
При термічній обробці відливань поверхня металі взаємодіє з атмосферою печі. Залежно від хімічного складу металу і атмосфери печі проходять різні процеси. Основні з них – окиснення, відновлення, зневуглецювання (цементація) і зневуглецювання. Залежно від того, який з цих процесів проходить, атмосфера в печі називається окиснювальною, відновною, зневуглецювальною і навуглецювальною. Якщо немає взаємодії між металом і атмосферою печі, то атмосфера називається нейтральною.

**Окиснення і відновлення сталі.** У печах газами-окислювачами є  $O_2$ ,  $CO_2$  і  $H_2O$ , а газами-відновниками –  $H_2$  і  $CO$ .

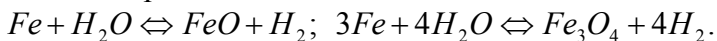
Кисень взаємодіє із залізом:



Вуглекислий газ взаємодіє із залізом:



Водяна пара взаємодіє із залізом:



Напрямок перебігу цих реакцій залежить від складу атмосфери печі і температури. Наприклад, в атмосфері, що складається тільки з двох газів  $CO$  і  $CO_2$ , залежно від концентрації в ній  $CO$  напрям перебігу реакцій при різній температурі можна визначити за діаграмою рівноваги (рис. 49 а). Діаграма розділена рівноважними лініями на чотири області:  $Fe$ ,  $FeO$ ,  $Fe_3O_4$  і  $Fe_2O_3$ . Якщо при нагріванні

металу в печі створюються умови, відповідні області Fe, тобто склад атмосфери і температура відповідають будь-якій точці, розміщеній в області Fe, то чисте залізо при нагріванні в печі за цих умов не окислюватиметься, а оксиди FeO, Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> і Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> відновляться. Тому атмосфера для чистого заліза вважається нейтральною, а для оксидів заліза – відновною.

Напрямок перебігу реакцій для атмосфери, що складається із H<sub>2</sub> і H<sub>2</sub>O, при різній температурі можна визначити за рис. 49 б.

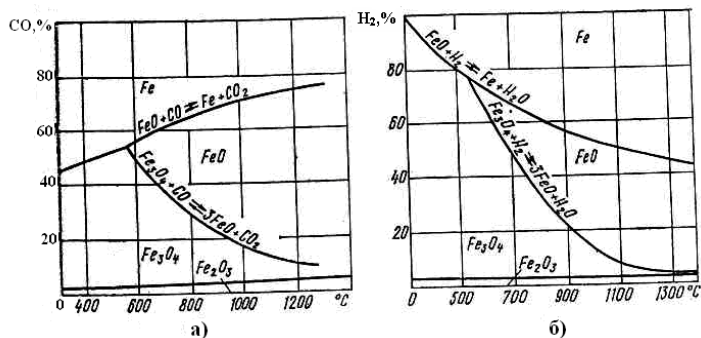
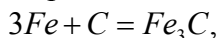
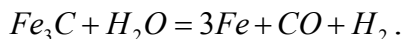
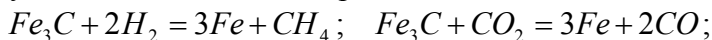


Рисунок 49 – Діаграма рівноваги заліза і його оксидів із сумішами: а – CO і CO<sub>2</sub>; б – H<sub>2</sub> і H<sub>2</sub>O

**Вуглецювання і зневуглецювання сталі.** У печах як навуглецьовувальні гази використовують CH<sub>4</sub> і C. Зневуглецювання викликають гази CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub> і H<sub>2</sub>O. Навуглецювання заліза відбувається за реакцією



зневуглецювання сталі – за реакціями



Змінюючи склад атмосфери печі, можна регулювати вміст вуглецю в поверхневому шарі сталевого або чавунно-

го відливання. Навуглецьовувальні або знеуглецьовувальні властивості атмосфери печі залежать від її вуглецевого потенціалу. Кожна атмосфера при певній температурі володіє відповідним вуглецевим потенціалом. Вміст вуглецю у виливку, нагрітому в даній атмосфері, при достатній витримці відповідатиме значенню її вуглецевого потенціалу. Наприклад, якщо в атмосфері з вуглецевим потенціалом, що дорівнює 0,8% С, нагрівають декілька виливків, що містять 0,2; 0,4; 0,8; 1,2 і 1,5 % С, то після закінчення нагрівання, при достатній витримці в печі, у всіх цих виливках міститиметься 0,8 % С. Отже, в атмосфері з вуглецевим потенціалом 0,8 % С виливки, що містять 0,2 і 0,4 % С, будуть науглецьовуватися, а виливки, що містять 1,2 і 1,5 % С, будуть знеуглецьовуватися. Для виливок, що містять 0,8 % С, атмосфера печі є нейтральною.

Вуглецевий потенціал атмосфери печі регулюють зміною концентрації в ній  $\text{CO}_2$  або  $\text{H}_2\text{O}$ . На рис. 50 а подана залежність вуглецевого потенціалу атмосфери від вмісту в ній  $\text{CO}_2$  при різній температурі. По вертикалі вказаний вміст в атмосфері  $\text{CO}_2$ , по горизонталі – вуглецевий потенціал атмосфери.

Можна, наприклад, визначити, який має бути вміст  $\text{CO}_2$  в атмосфері при термічній обробці сталевого виливка, що містить 0,6 % С, при температурі  $870^\circ\text{C}$ , щоб не відбувалося науглецювання або знеуглецювання. Для даного випадку за рис. 50 а знаходимо необхідний вміст  $\text{CO}_2$  в атмосфері печі, він має дорівнювати  $\sim 0,3\%$ . Для отримання стабільних результатів термічної обробки виливків склад пічної атмосфери має бути постійним. Контролюють і регулюють склад атмосфери печі за допомогою спеціальної установки, змінюючи точку роси атмосфери або вміст в атмосфері вуглекислого газу.

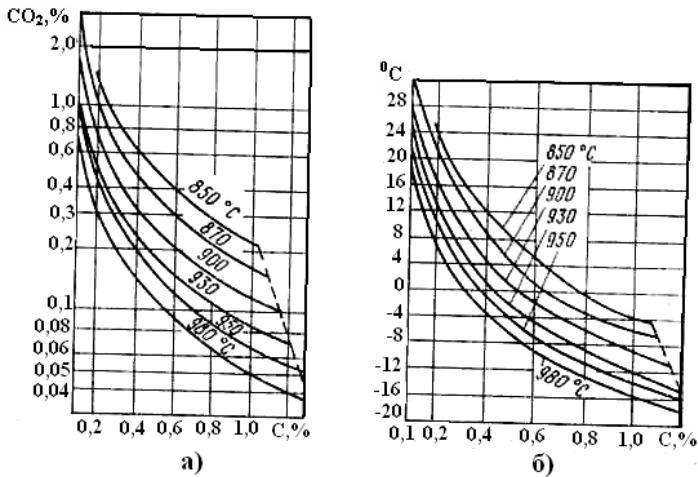


Рисунок 50 – Вуглецевий потенціал атмосфери

Кількість H<sub>2</sub>O в атмосфері зазвичай визначають не у відсотках, а за так званою точкою роси – температурою, при якій водяні пари даної атмосфери конденсуються. Залежність вуглецевого потенціалу атмосфери від її точки роси показана на рис. 50 б. Якщо відомі хімічні склади сталі або чавуну і температура термічної обробки, то, підбираючи відповідну атмосферу в печі, можна забезпечити перебіг необхідних реакцій і отримати виливки із заданими технологічними і механічними властивостями.

## 12.2. Захисні атмосфери

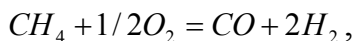
Термічна обробка відливань зі сталі та чавуну в середовищі захисного газу дає ряд переваг перед термічною обробкою у звичайній повітряній атмосфері або атмосфері, що складається з продуктів повного горіння палива. Відсутність окисної плівки або окисного шару на поверхні металу після термічної обробки в середовищі захисного газу

виключає втрати металу в окалину і не вимагає подальшого очищення і механічної обробки деталей.

Відсутність знеуглецьованого шару на поверхні сталевого відливання, наприклад отриманого методом литва за моделями, що виплавляються, забезпечує необхідну твердість поверхні. Це дозволяє виключити таку операцію, як механічна обробка, необхідну для зняття знеуглецьованого шару, що утворюється при термічній обробці в атмосфері повітря або продуктів повного горіння палива.

Захисні атмосфери знаходять широке застосування в ливарному виробництві при відпалі білого чавуну і нормалізації сталевих виливків, гартуванні. Для термічної обробки в середовищі захисного газу використовують печі, що відрізняються герметичністю сталевого каркаса й ущільненням завантажувальних і розвантажувальних вікон. Подача в піч захисної атмосфери здійснюється через один або декілька введень, як правило, розташованих у високотемпературній зоні печі.

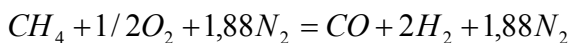
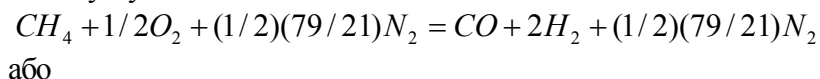
Як сировина для отримання захисних атмосфер служать різні гази, деревне вугілля, рідке паливо. Найбільш поширений у машинобудуванні метод отримання захисних атмосфер з природного газу. Природний газ складається в основному з метану. При горінні метану з недоліком повітря утворюються продукти неповного його горіння, до складу яких входять водень і окисел вуглецю. Чим більший недолік повітря, тобто чим менший коефіцієнт витрати повітря, тим більше в продуктах неповного горіння метану буде водню та окислу вуглецю. Мінімальна кількість повітря для неповного горіння метану визначається з реакції



тобто для горіння  $1 \text{ м}^3 \text{ CH}_4$  подається  $0,5 \text{ м}^3 \text{ O}_2$ , і при цьому утворюється  $1 \text{ м}^3 \text{ C}$  і  $2 \text{ м}^3 \text{ H}_2$ . Горіння метану з ще мен-

шою кількістю повітря ( $n < 0,25$ ) неприпустиме через появу вільного вуглецю в продуктах горіння. Вуглець, потрапляючи в печі, скупчується у вигляді відкладень саж, які заважають роботі механізмів печі й ускладнюють регулювання процесу нагрівання.

Оскільки для горіння метану використовується не чистий кисень, а повітря, що складається з 21%O<sub>2</sub> і 79%N<sub>2</sub>, то при коефіцієнті витрати повітря  $n = 0,25$  реакція горіння метану буде така:



Ця реакція ендотермічна, може проходити лише при підведенні в реакційну камеру додаткової теплоти. Продукти ендотермічної реакції називаються ендогазом. Склад ендогазу при  $n = 0,25$ : 20,5 % C, 41 % H<sub>2</sub>, решта – азот.

При збільшенні коефіцієнта витрати повітря в продуктах горіння концентрація H<sub>2</sub> і C зменшується, а концентрація N<sub>2</sub> збільшується. Одночасно в продуктах горіння з'являються гази CO<sub>2</sub> і H<sub>2</sub>O. Чим більший коефіцієнт витрати повітря, тим більше виділяється теплоти. При  $n = 0,55 - 0,6$  процес горіння метану можливий без додаткового підігрівання суміші. Реакція стає екзотермічною, а продукт такої реакції називають екзогазом.

Склад продуктів неповного горіння метану при різних коефіцієнтах витрати повітря показаний на рис. 51. Область екзогазу розміщена при  $n = 0,55 - 1$ . В екзогазі, отриманому при  $n = 0,55 - 0,9$ , міститься ще достатня кількість газів-відновників H<sub>2</sub> і CO, тому його називають багатим екзогазом на відміну від екзогазу, отриманого при  $n = 0,9 - 1$ , який містить незначну кількість H<sub>2</sub> і CO і тому називається бідним екзогазом.

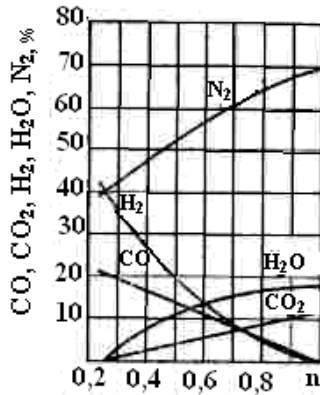


Рисунок 51 – Склад продуктів неповного горіння метану залежно від коефіцієнта витрати повітря

Ендогаз і багатий екзогаз є горючими і вибухонебезпечними газами. Бідний екзогаз у суміші з повітрям не горить і не вибухонебезпечний. Ендогаз, як правило, прямо подають у печі. Екзогаз, як правило, спочатку очищають від  $\text{CO}_2$  і  $\text{H}_2\text{O}$  і лише після цього подають у піч. Для отримання ендогазу використовують ендогазові установки, а екзогазу – екзогазові.

### 12.3. Установки для приготування захисних атмосфер

Ендогазові установки (рис. 52). Принцип їх роботи полягає в приготуванні суміші природного газу і повітря при нагріванні цієї суміші до температури  $1050^\circ\text{C}$  і охолодженні продуктів неповного горіння, що утворилися, до  $20\text{--}30^\circ\text{C}$ . Природний газ надходить з цехового газопроводу через витратомір 1 і регулювальник нульового тиску 2 до змішувача 3. Повітря, необхідне для отримання ендогазу, засмоктується компресором 11 з цеху через витратомір 4 і фільтр 5. У змішувачі природний газ і повітря змішуються в заданій пропорції. Конструкція змішувача забезпечує

автоматичне збереження заданої пропорції газ – повітря на різних режимах роботи установки. З компресора газоповітряна суміш під тиском 20 кПа подається в реторту 8 генератора 6. Генератор може мати електричне або газове нагрівання. Температура в ньому підтримується 1050°С. Реторта виготовлена з хромонікелевої сталі і заповнена каталізатором 9. Реторта виготовлена з хромонікелевої сталі і заповнена каталізатором 9.

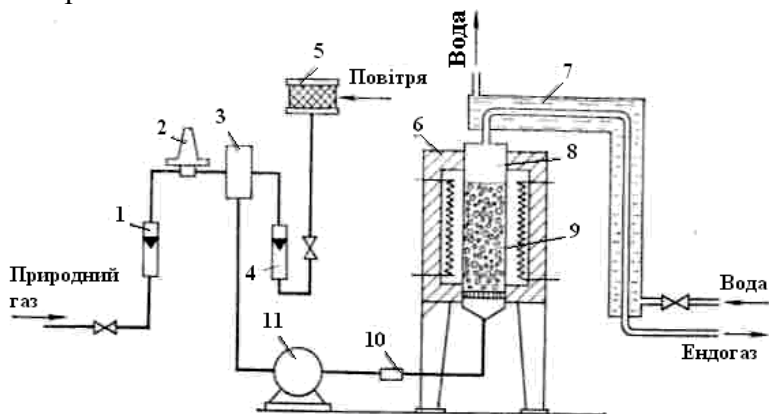


Рисунок 52 – Схема ендогазової установки

Газоповітряна суміш, надходячи в реторту, стикається з каталізатором, нагрівається до необхідної температури, і відбувається взаємодія метану з киснем повітря. Гарячий ендогаз після виходу з реторти охолоджують до температури 20–30°С у холодильнику 7, в який безперервно надходить холодна вода. Ендогаз охолоджують, щоб попередити перебіг реакції  $2\text{CO} = \text{CO}_2 + \text{C}$ . Ця реакція проходить при 650°С, унаслідок чого погіршується склад ендогазу і в трубопроводах випадає сажа.

Як каталізатор використовують шматочки високоглинозему, просочені солями нікелю. Металевий нікель надає каталітичну дію на реакції утворення CO і  $\text{H}_2$ . У ендогазових установках застосовують каталізатор ГАП-8.



На випадок займання газоповітряної суміші на ділянці від компресора до реторти для попередження потрапляння полум'я в компресор і змішувач перед ретортою встановлений полум'ягасний клапан 10. У полум'ягасному клапані є обойма з гофрованої мідної смуги, що перешкоджає поширенню полум'я, і біметалічні пластинки. При розігріванні біметалічних пластинок до температури  $90^{\circ}\text{C}$  спрацьовує клапан, що перекидає трубопровід і зупинний компресор.

Якщо в природному газі містяться сірчисті сполуки, то перед подачею природного газу в ендогазову установку його необхідно очистити від сірки. Інакше сірчисті сполуки виводять з ладу каталізатор, реакції в реторті проходять не повністю і в газі, що виходить з реторти, міститимуться  $\text{CH}_4$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$  і  $\text{O}_2$ . Для очищення від сірки природний газ нагрівають до температури  $350^{\circ}\text{C}$  за наявності каталізатора ГІАП-10.

**Екзогазові установки** (рис. 53). Залежно від необхідного складу захисного газу в промисловості застосовують два типи екзогазових установок – для отримання багатого і бідного екзогазу. Установки для отримання багатого екзогазу складаються з системи підготовки газоповітряної суміші, камери згоряння і системи для очищення продуктів горіння від водяної пари. Система підготовки газоповітряної суміші аналогічна системі ендогазової установки. Камера згоряння виконана у вигляді звичайної топки для спалювання газоподібного палива. Система очищення від  $\text{H}_2\text{O}$  складається з попереднього охолоджувача, розміщеного поряд з камерою згоряння, і додаткової холодильної установки.

Послідовність отримання багатого екзогазу така. Компресор 10 через полум'ягасник 9 подає в пальник 4 газоповітряну суміш з  $n = 0,55$ . Надходячи в камеру згоряння 5, суміш займається. При виході з камери згоряння продукти неповного горіння містять 4 %  $\text{CO}_2$ , 13 %  $\text{H}_2\text{O}$ , 12 % С,

16 %  $H_2$  і решта  $N_2$ . Цей склад через високий вміст  $H_2O$  ( $\sim 10 \text{ г/м}^3$ ) практично не придатний для термічної обробки.

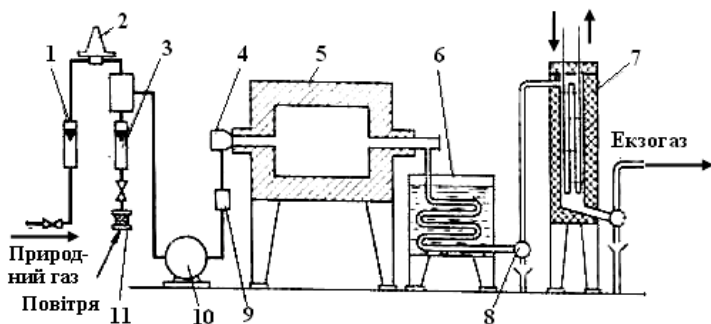


Рисунок 53 – Схема установки для отримання багатого екзогазу

В охолоджувачі 6 газ охолоджується до  $20\text{--}30^\circ\text{C}$ . Волога, що сконденсувалася, віддається через конденсатовідвідник 8. Після охолоджувача 6 в екзогазі міститься  $30 \text{ г/м}^3$  вологи. Для повнішого осушення екзогазу його пропускають через установку 7, в якій використовують фреон. Додаткове охолодження екзогазу до  $3\text{--}5^\circ\text{C}$  знижує вміст вологи в екзогазі до  $5\text{--}6 \text{ г/м}^3$ . Остаточний склад екзогазу, що направляється в піч, такий: 5%  $CO_2$ , 1%  $H_2O$ , 14%  $CO$ , 18%  $H_2$ , решта  $N_2$ .

Вихідний природний газ подається через витратомір 1 і регулювальник тиску 2, а повітря, що засмоктується з атмосфери, проходить через фільтр 11 і витратомір 3.

Установки для отримання бідного екзогазу, окрім системи підготовки газоповітряної суміші, камери згоряння, водяного і фреонового охолоджувачів, мають блок тонкого очищення від  $CO_2$  і  $H_2O$ . Блок містить місткості, заповнені керамічними поглиначами (цеолітами), що адсорбують гази  $CO_2$  і  $H_2O$ .

При спалюванні природного газу з  $n = 0,95$  в екзогазі міститься 0,6–0,7%  $C$ , 1,2–1,3%  $H_2$ , решта  $N_2$ . Точка роси екзогазу –  $30^\circ\text{C}$ .

## РОЗДІЛ 13

### РОЗРАХУНОК НАГРІВАННЯ МЕТАЛУ

#### 13.1. Розрахунок нагрівання тонких і масивних тіл

Тривалість нагрівання металу до заданої температури визначає габаритні розміри печі. При розрахунку тривалості нагрівання металу враховують умови не лише передачі теплоти від пічного простору до поверхні металу, що нагрівається, але і відведення теплоти від поверхні вглиб металу.

Тіла, що нагріваються, розрізняють за перепадом температури між поверхнею і центром: масивні тіла – із значним перепадом, і тонкі тіла – з незначним перепадом. Таке розподілення тіл, що нагріваються, умовно обумовлене його геометричними розмірами, теплофізичними властивостями й інтенсивністю підведення теплоти з навколишнього простору. Одна і та сама деталь або відливочок залежно від умов нагрівання може вважатися і тонким, і масивним тілом.

Мірою ступеня масивності тіла, що нагрівається, служить критерій Біо ( $Bi$ )

$$Bi = \alpha S / \lambda,$$

де  $\alpha$  – коефіцієнт тепловіддачі від навколишнього простору, Вт/(м<sup>2</sup>·К);  $S$  – розрахункова товщина тіла, що нагрівається, м;  $\lambda$  – теплопровідність тіла, що нагрівається, Вт/(м·К). Критерієм  $Bi$  є відношення інтенсивності підведення теплоти до поверхні тіла від навколишнього середовища до інтенсивності відведення теплоти від поверхні вглиб тіла.

Якщо відношення  $\alpha/S$  в 4 рази і більше перевищує  $\lambda$  ( $Bi < 0,25$ ), теплота від поверхні встигає відводитися вглиб тіла. Критерій  $Bi < 0,25$  відповідає області тонких тіл. При

$Bi \geq 0,5$  поверхня тіла щодо його центру перегрівається, тобто маємо область масивних тіл. Інтервал критерію  $Bi = 0,25 - 0,5$  відносять до перехідної області, і залежно від точності розрахунку тіло, що нагрівається, розглядають або як тонке, або як масивне. Розрахункова товщина тіла, що нагрівається, залежить від умов нагрівання металу. При одnobічному нагріванні, наприклад, металевій плити, що лежить на поді печі, розрахункова товщина дорівнює товщині плити. При двосторонньому нагріванні, наприклад, металевій плити, що обігрівається з двох боків, розрахункова товщина дорівнює половині товщини плити. При нагріванні циліндрових тіл, що лежить на поді печі, розрахункова товщина дорівнює радіусу тіла.

Розрахунок тонких тіл простіший за розрахунок масивних тіл, тому в початковій стадії необхідно визначити критерій  $Bi$ .

### 13.2. Нагрівання тонких тіл

Розглянемо умови нагрівання тонкого тіла в середовищі зі сталою температурою. Позначимо (рис. 54) підведену до тіла від навколишнього простору за час  $d\tau$  кількість теплоти  $dQ$ , а збільшення температури і теплоємності тіла відповідно  $dt$ , і  $dJ$ :

$$dQ = Fq d\tau,$$

де  $F$  – площа поверхні тіла,  $m^2$ ;  $q$  – поверхнева щільність теплового потоку,  $Вт/m^2$ ;

$$dJ = Gc dt,$$

де  $G$  – маса тіла,  $кг$ ;  $c$  – питома теплоємність тіла,  $Дж/(кг \cdot K)$ . Оскільки

$$dQ = dJ,$$

отримаємо

$$Fq d\tau = Gc dt.$$

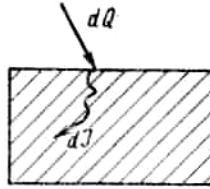


Рисунок 54 – До розрахунку нагрівання тонкого тіла

Якщо взяти, що  $q = \alpha(t_{\text{печі}} - t)$ , то

$$F\alpha(t_{\text{печі}} - t)d\tau = Gc dt,$$

де  $t_{\text{печі}}$  – температура печі, °C;  $t$  – поточна температура тіла, °C; звідки

$$d\tau = [Gc / F\alpha(t_{\text{печі}} - t)]dt$$

Інтегруючи цей вираз у межах від початкової температури тіла  $t^{\text{н}}$  – до кінцевої температури тіла і беручи питому теплоємність тіла, теплопровідність і коефіцієнт тепловіддачі сталими, отримуємо

$$\tau = (Gc / F\alpha) \int_{t^{\text{н}}}^{t^{\text{к}}} [1 / (t_{\text{печі}} - t)] dt = (Gc / F\alpha) \ln[(t_{\text{печі}} - t^{\text{н}}) / (t_{\text{печі}} - t^{\text{к}})]$$

Цей вираз використовують для визначення тривалості нагрівання тонкого тіла. Розв'язуючи його, можна отримати формулу для визначення температури тіла через відомий проміжок часу:

$$t^{\text{к}} = t_{\text{печі}} - (t_{\text{печі}} - t^{\text{н}}) e^{F\alpha\tau / Gc},$$

де  $e$  – основа натурального логарифма.

**Приклад 1.** Визначити тривалість нагрівання виливка діаметром 30 мм і завдовжки 300 мм від температури 20 до 600°C. Температура печі – 1000°C. Виливок з вуглецевої сталі  $\rho = 7800 \text{ кг/м}^3$ . Ступінь чорноти виливка – 0,8, ступінь чорноти стін печі – 0,75. Нагрівання конвекцією не враховуємо.

Зведений ступінь чорноти системи піч-виливок

$$\xi_{\Pi} = 1/(1/\xi_{\text{піч}} + 1/\xi_{\text{м}} - 1) = 1/(1/0,75 + 1/0,8 - 1) = 0,63.$$

Коефіцієнт тепловіддачі в початковий період нагрівання

$$\sigma^{\text{н}} = \sigma_{\Pi} C_0 [(T_{\text{піч}}/100)^4 - (T_{\text{н}}/100)^4] / (t_{\text{піч}} - t^{\text{н}}) = 0,63 \cdot 5,7 \{ [(1000 + 273)/100]^4 - [(20 + 273)/100]^4 \} / (1000 - 20) = 96 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}).$$

Коефіцієнт тепловіддачі в кінці нагрівання

$$\sigma^{\text{к}} = \sigma_{\Pi} C_0 [(T_{\text{піч}}/100)^4 - (T^{\text{к}}/100)^4] / (t_{\text{піч}} - t^{\text{к}}) = 0,63 \cdot 5,7 \{ [(1000 + 273)/100]^4 - [(600 + 273)/100]^4 \} / (1000 - 600) = 184 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}).$$

Середній коефіцієнт тепловіддачі за період нагрівання

$$\alpha^{\text{ср}} = (\alpha^{\text{н}} + \alpha^{\text{к}}) / 2 = (96 + 184) / 2 = 140 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}).$$

Розрахункова товщина тіла, що нагрівається

$$S = 0,5d = 0,5 \cdot 0,03 = 0,015 \text{ м.}$$

Теплопровідність для вуглецевої сталі при 600°C дорівнює  $V = -35,6 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$  (додаток 4)

$$Bi = \alpha S / \lambda = 140 \cdot 0,015 / 35,6 = -0,06,$$

тобто виливок, що нагрівається є тонким тілом.

Маса виливка

$$G = \pi d^2 l \rho / 4 = -3,14 \cdot 0,03^2 \cdot 0,3 \cdot 7800 / 4 = 1,65 \text{ кг}$$

При розрахунку поверхні виливка поверхню торців не враховуємо

$$F = \pi d l = 3,14 \cdot 0,03 \cdot 0,3 = 0,028 \text{ м}^2$$

Час нагрівання виливка (питома теплоємність сталі при 600°C 590 Дж/(кг·К), додаток 4):

$$\begin{aligned} \tau &= (Gc/F\alpha) \ln[(t_{\text{піч}} - t^{\text{н}}) / (t_{\text{печ}} - t^{\text{н}})] = \\ &= (1,65 \cdot 590 / 0,028 \cdot 140) \ln[(1000 - 20) / (1000 - 600)] = 223 \text{ с.} \end{aligned}$$

**Приклад 2.** Визначити температуру нагрівання вилівка 2 хв після її завантаження в піч (умови нагрівання див. приклад 1):

$$t^k = t_{\text{піч}} \left( t_{\text{піч}} - t^H \right) e^{-F\alpha\tau/Gc} = 1000(1000 - 20)2,7^{-0,028 \cdot 140 \cdot 120 / 1,65 \cdot 590} = 396^\circ\text{C}.$$

### 13.3. Нагрівання масивних тіл

Розрахунок здійснюють у такій послідовності:

1. Критерій Ві за формулою  $Vi = \alpha S/\lambda$ .
2. Температурний критерій поверхні тіла за формулою

$$\theta_{\text{пов}} = (t_{\text{пов}}^k - t_{\text{пов}}^K) / (t_{\text{пов}}^H - t_{\text{пов}}^H).$$

3. Критерій Fo за графіком для температурного критерію поверхні (див. рис. 30).
4. Температурний критерій центра тіла за графіком для  $\theta_{\text{ц}}$  (див. рис. 31).
5. Температура центра тіла за формулою

$$t_{\text{ц}}^k = t_{\text{піч}} - \theta_{\text{ц}} (t_{\text{піч}} - t_{\text{ц}}^H).$$

6. Тривалість нагрівання тіла за формулою  $\tau = FoS^2\alpha$ .

При розрахунку часу охолодження масивного тіла, а також його температури на поверхні і в центрі слід визначити температурні критерії поверхні і центра за формулами

$$\theta_{\text{пов}} = (t_{\text{пов}}^k - t_{\text{н.с}}) / (t_{\text{пов}}^H - t_{\text{н.с}}),$$

$$\theta_{\text{ц}} = (t_{\text{ц}}^k - t_{\text{н.с}}) / (t_{\text{ц}}^H - t_{\text{н.с}}),$$

де  $t_{\text{н.с}}$  – температура навколишнього середовища, °C.

**Приклад 2.** Визначити температуру поверхні й центра сталевого вилівка у процесі його нагрівання. Вилівок з вуглецевої сталі діаметром 600 мм з початковою температурою 20°C, поміщений, у піч із температурою 1000°C, нагрівається доти, поки температура її поверхні не досягне

950<sup>0</sup>С. Візьмемо середні значення теплофізичних властивостей виливка, що залишаються сталими у процесі нагрівання: питома теплоємність  $c = 575$  Дж/(кг·К), густина  $\rho = 7800$  кг/м<sup>3</sup>, теплопровідність  $\gamma = 48$  Вт/(м·К). Ступінь чорноти печі  $\xi_{\text{печ}} = 0,75$ . Прийmemo також, що в процесі нагрівання температура печі не змінюється і нагрівання металу відбувається тільки випромінюванням.

Для одержання проміжних значень температури виливка виділимо три періоди нагрівання за температурою поверхні виливка: перший – 20-600<sup>0</sup>С, другий – 600-850<sup>0</sup>С, третій – 850-950<sup>0</sup>С.

Розрахунок першого періоду.

Наведений ступінь чорноти системи піч-виливок:

$$\xi_{\text{п}} = 1/(1/\xi_{\text{печ}} + 1/\xi_{\text{м}} - 1) = 1/(1/0,75 + 1/0,8 - 1) = 0,63.$$

Коефіцієнт тепловіддачі випромінювання на початку періоду

$$\beta^{\text{н}} = \alpha_{\text{п}} C_0 [(T_{\text{печ}}/100)^4 - (T^{\text{н}}/100)^4] / (t_{\text{печ}} - t^{\text{н}}) = 0,63 \cdot 5,7 \{ [(1000 + 273)/100]^4 - [(20 + 273)/100]^4 \} / (1000 - 20) = 96 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}).$$

Коефіцієнт тепловіддачі випромінювання в кінці періоду

$$\beta^{\text{к}} = \alpha_{\text{п}} C_0 [(T_{\text{печ}}/100)^4 - (T^{\text{к}}/100)^4] / (t_{\text{печ}} - t^{\text{к}}) = 0,63 \cdot 5,7 \{ [(1000 - 273)/100]^4 - [(600 + 273)/100]^4 \} / (1000 - 600) = 184 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}).$$

Середній коефіцієнт тепловіддачі випромінювання

$$\alpha^{\text{ср}} = (\alpha^{\text{н}} + \alpha^{\text{к}}) / 2 = (96 + 184) / 2 = 140 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}).$$

Розрахункова товщина виливка

$$S = 0,5d = 0,5 \cdot 0,6 = 0,3 \text{ м.}$$

Критерій Ві

$$Bi = \alpha S / \lambda = 140 \cdot 0,3 / 48 = 0,875,$$

тобто виливок, що нагрівається, є масивним тілом. Температурний критерій поверхні виливка

$$\theta_{\text{пов}} = (t_{\text{печ}} - t^{\text{к}}) / (t_{\text{печ}} - t^{\text{н}}) = (1000 - 600) / (1000 - 20) = 0,41.$$



Критерій  $Fo$  визначається за рис. 36. Для  $Bi = 0,875$  і  $\theta_{пов} = 0,41$   $Fo = 0,48$ . Температурний критерій центра вилівка визначується по рис. 31. Для  $Bi = 0,875$  і  $Fo = 0,48$   $\theta_{ц} = 0,6$ .

Температура центра вилівка в кінці періоду, оскільки

$$\theta_{ц} = (t_{пнч} - t_{ц}^k) / (t_{пнч} - t_{ц}^H),$$

то

$$t_{ц}^H = t_{пнч} - \theta_{ц} (t_{пнч} - t_{ц}^k) = 1000 - 0,6(1000 - 20) = 412 \pm C.$$

Коефіцієнт теплопроводності вилівка

$$a = \lambda / cp = 48 / (575 \cdot 7800) = 0,000011 \text{ м}^2/\text{с}.$$

Час нагрівання поверхні тіла до  $600^{\circ}\text{C}$ : оскільки  $Fo = at/S^2$ , то

$$\tau_1 = Fo S^2 / a = 0,48 \cdot 0,3^2 / 0,000011 = 3927 \text{ с, або } 1,1 \text{ год.}$$

Розрахунок другого періоду.

Коефіцієнт тепловіддачі випромінювання на початку другого періоду дорівнює коефіцієнту тепловіддачі випромінювання в кінці першого періоду, тобто  $\alpha^H = 184 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ . Коефіцієнт тепловіддачі випромінювання в кінці другого періоду

$$\alpha^k = \alpha_{п} C_0 [(T_{пнч}/100)^4 - (T^k/100)^4] / (t_{пнч} - t^k) = 0,63 \cdot 5,7 \{ [(1000 + 273)/100]^4 - [(850 - 273)/100]^4 \} / (1000 - 850) = 248 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}).$$

Середній коефіцієнт тепловіддачі випромінювання за другий період

$$\alpha^{ср} = (\alpha^H + \alpha^k) / 2 = (184 + 248) / 2 = 216 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}).$$

Критерій  $Bi$

$$Bi = \alpha S / \lambda = 216 \cdot 0,3 / 48 = 1,35.$$

Температурний критерій поверхні вилівка

$$\theta_{пов} = (t_{пнч} - t^k) / (t_{пнч} - t^H) = (1000 - 850) / (1000 - 600) = 0,375.$$

Критерій  $Fo$  визначається за рис. 30. Для  $Bi = 1,35$  і  $\theta_{пов} = 0,375$   $Fo = 0,35$ . Температурний критерій центра виливка визначимо за рис. 31. Для  $Bi = 1 = 1,35$  і  $Fo = 0,35$   $\theta_{ц} = 0,62$ .

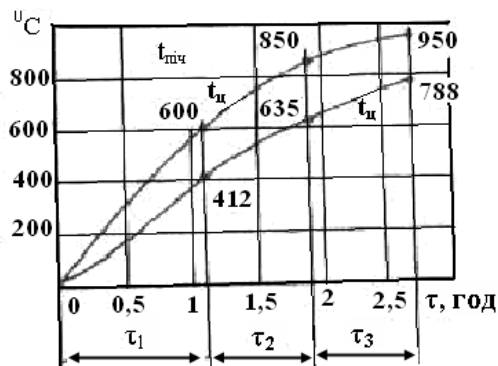


Рисунок 55 - Графік нагрівання масивного тіла

Температура центра виливка в кінці періоду

$$t_{ц}^k = t_{пч} - \theta_{ц}(t_{пч} - t_{ц}^H) = 1000 - 0,62(1000 - 412) = 635 \pm C.$$

Час нагрівання поверхні виливка від 600 до 850°C

$$\tau_2 = Fo S^2/a = 0,35 \cdot 0,3^2/0,000011 = 2864 \text{ с, або } 0,8 \text{ год.}$$

Розрахунок третього періоду.

Коефіцієнт тепловіддачі випромінювання в кінці періоду

$$\beta^k = \alpha_{п} C_0 [(T_{пч}/100)^4 - (T^k/100)^4] / (t_{пч} - t^k) = 0,63 \cdot 5,7 \{ [(1000 + 273)/100]^4 - [(950 + 273)/100]^4 \} / (1000 - 950) = 280 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}).$$

Середній коефіцієнт тепловіддачі випромінювання за третій період

$$\alpha^{ср} = (\alpha^H + \alpha^k) / 2 = (248 + 280) / 2 = 256 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}).$$

Критерій  $Bi$

$$Bi = \alpha S / \lambda = 264 \cdot 0,3 / 48 = 1,65.$$

Температурний критерій поверхні виливка

$$\theta_{\text{пов}} = (t_{\text{піч}} - t^{\text{к}}) / (t_{\text{піч}} - t^{\text{н}}) = (1000 - 950) / (1000 - 850) = 0,33.$$

Критерій Fo визначається за рис. 30. Для  $Bi = 1,65$  і  $\theta_{\text{пов}} = 0,33$   $Fo = 0,34$ .

Температурний критерій центра виливка визначається за рис. 31. Для  $Bi = 1,65$  і  $Fo = 0,34$   $\theta_{\text{ц}} = 0,58$ .

Температура центра виливка в кінці третього періоду

$$t_{\text{ц}}^{\text{к}} = t_{\text{піч}} - \theta_{\text{ц}} (t_{\text{піч}} - t_{\text{ц}}^{\text{н}}) = 1000 - 0,58(1000 - 635) = 788^{\circ}\text{C}.$$

Час нагрівання поверхні відливання від  $850$  до  $950^{\circ}\text{C}$

$$\tau_3 = Fo S^2 / a = 0,34 \cdot 0,3^2 / 0,000011 = 2782 \text{ с, або } 0,8 \text{ год.}$$

Загальний час нагрівання поверхні виливка від  $20$  до  $950^{\circ}\text{C}$

$$\tau = \tau_1 + \tau_2 + \tau_3 = 1,1 + 0,8 + 0,8 = 2,7 \text{ год.}$$

Результати розрахунку у вигляді графіка подані на рис.55. Якщо потрібний менший температурний перепад між поверхнею і центром тіла, необхідно збільшити час витримки металу в печі й одночасно знизити температуру в печі.

**Приклад 2.** Визначити температуру поверхні й центра сталевого виливка через  $15$  хв після витягання його з печі. Початкові умови відповідають кінцю третього періоду нагрівання в прикладі 1.

Коефіцієнт тепловіддачі випромінювання виливка в навколишній простір

$$\bar{\alpha} = \alpha_{\text{н}} C_0 [(T^{\text{к}}/100)^4 - (T_{\text{н.с}}/100)^4] / (t^{\text{к}} - t_{\text{н.с}}) = 0,63 \cdot 5,7 \{ [(950 + 273)/100]^4 - [(20 - 273)/100]^4 \} / (950 - 20) = 86 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}).$$

Критерій  $Bi$

$$Bi = \alpha S / \lambda = 86 \cdot 0,3 / 48 = 0,54.$$

Критерій  $Fo$

$$Fo = a \tau / S^2 = 0,000011 \cdot 15 \cdot 60 / 0,3^2 = 0,11.$$

Температурний критерій поверхні виливка визначається за рис. 30. Для  $Bi = 0,54$  і  $Fo = 0,11$   $\theta_{пов} = 0,8$ .







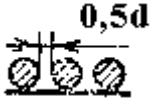
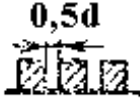
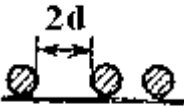
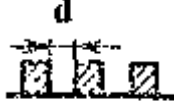
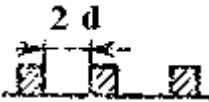
Положення заготовки	Коефіцієнт	Положення заготовки	Коефіцієнт
	1,0		1,0
	1,0		1,4
	2,0		4,0
	1,4		2,2
	1,5		2,0
			1,6

Рисунок 56 – Вплив умов розміщення металу в печі на час його нагрівання

Температура поверхні виливка:

оскільки

$$\theta_{пов} = (t_{пов}^к - t_{н.с}) / (t_{пов}^н - t_{н.с}),$$

то

$$t_{пов}^к = t_{н.с} + \theta_{пов} (t_{пов}^н - t_{н.с}) = 20 + 0,8(950 - 20) = 765^\circ\text{C}.$$

Температурний критерій центра виливка визначається за рис. 31. Для  $Bi = 0,54$  і  $Fo = 0,11$   $\theta_{\text{ц}} = 0,97$ . Оскільки

$$\theta_{\text{ц}} = (t_{\text{к}}^{\text{к}} - t_{\text{н.с}}) / (t_{\text{ц}}^{\text{н}} - t_{\text{о.с}}),$$

то

$$t_{\text{ц}}^{\text{к}} = t_{\text{н.с}} + \theta_{\text{ц}} (t_{\text{ц}}^{\text{н}} - t_{\text{н.с}}) = 20 + 0,97(788 - 20) = 765^{\circ}\text{C}.$$

Температура газів і пічного простору змінюється в процесі нагрівання, тому при розрахунку теплопередачі й тривалості нагрівання у вказаних печах криву зміни температури розбивають на окремі зони і розраховують тривалість нагрівання для кожної зони окремо. Розрахункова товщина тіла, що нагрівається, може бути різною в різних зонах, якщо змінюються умови нагрівання (нагрівання може бути одно- або двостороннім у різних частинах печі).

Розміщення виробів у печі впливає на тривалість нагрівання. Щільніше розміщення виробів призводить до зменшення теплового потоку від газів і пічного простору.

На рис. 56 показано різне розміщення металу, що нагрівається, в печі. Для кожного положення наведений коефіцієнт вказує, як треба змінити тривалість нагрівання, отриману з критерійних залежностей для суцільної плити або циліндра.

### **13.4. Основи раціональної технології нагрівання металу**

У плавильних печах метал нагрівають до температури, що перевищує температуру його плавлення. У термічних печах метал нагрівають до температури, при якій у металі відбуваються необхідні структурні перетворення. У плавильних печах метал нагрівають з максимальною швидкістю, що підвищує продуктивність печі й зменшує чад металу. При нагріванні металу в термічних печах швидкість нагрівання залежить від розмірів виливка. Різниця температур по перерізу дрібних виливків при їх нагріванні незначна,

тому вони швидко нагріваються. При нагріванні великих виливок у них унаслідок різниці температур по перерізу може виникнути значна напруга і, як наслідок, утворюватися тріщини. Крім того, це може викликати їх викривлення. Тому великі виливки потрібно нагрівати з певною швидкістю. Відповідно до технології нагрівання застосовують одноступінчасте або багатоступінчасте нагрівання.

При одноступінчастому нагріванні весь об'єм печі має однакову температуру. Для багатоступінчастого нагрівання в печі є декілька зон з різною температурою. Метал, що нагрівається, спочатку поміщають у зону з низькою температурою, а після достатньої витримки його переносять у зону з вищою температурою. Попереднє підігрівання металу перед його завантаженням у піч, наприклад перед завантаженням в індукційну піч, значно покращує економічні показники процесу.

При термічній обробці виливків необхідно стежити за рівномірним нагріванням садіння, оскільки тільки в цьому випадку можна забезпечити стабільність процесу. Температура нагрівання металу в термічних печах не повинна перевищувати допустиму, інакше це призведе до погіршення структури металу. Нагрівання металу до вищої температури інтенсифікує зростання зерна металу (перегріву) і знижує механічні властивості виливків. Одноступінчасте нагрівання з максимальною швидкістю найбільш економічне. При багатоступінчастому нагріванні металу питома витрата палива зростає. Різні режими нагрівання оцінюють з економічної точки зору з урахуванням вартості не лише палива, але і продукції, що випускається.

## РОЗДІЛ 14

### МАТЕРІАЛИ ТА БУДІВЕЛЬНІ ЕЛЕМЕНТИ ПЕЧЕЙ. ВОГНЕТРИВКІ Й ТЕПЛОІЗОЛЯЦІЙНІ МАТЕРІАЛИ

#### 14.1. Класифікація вогнетривких матеріалів та їх властивості

Під час спорудження печей ливарного виробництва разом із звичайними будівельними матеріалами застосовують матеріали, призначені для роботи при високих температурах в умовах дії розплавлених металів і шлаків та активних газових атмосфер. Це керамічні матеріали (вогнетривкі і теплоізоляційні), а також жаростійкі метали і сплави, що використовуються для виготовлення вузлів і деталей, які працюють при високих температурах і несуть механічні навантаження.

Вогнетривкі керамічні матеріали застосовують також для виготовлення електричних нагрівачів опору.

Вогнетривкими називають матеріали, здатні протистояти тривалій дії високих температур (понад 1000°C), а також фізико-хімічних процесів, що проходять у печах. Більшість вогнетривких матеріалів – це фізично складні і хімічно неоднорідні системи з кристалічною і склоподібною фазами. Кристали складаються з вогнетривких оксидів, таких як  $Al_2O_3$ ,  $SiO_2$ ,  $MgO$  і т. п., що мають високу температуру плавлення. У більшості вогнетривких матеріалів вогнетривкі кристали відокремлені один від одного склоподібною фазою, проте в деяких матеріалах вони утворюють кристалічний зросток. Сутність виробництва більшості вогнетривких матеріалів полягає в перетворенні дрібноподрібною маси вихідних вогнетривких матеріалів на моноліт вогнетривкого виробу при температурах, нижчих, ніж

температура плавлення основних вогнетривких складових початкової маси.

Вогнетривкі матеріали поділяють на вироби, що мають певну форму (цегла, фасонні вироби різної складності, великоблочні), і неформовані матеріали (порошкові маси, бетонні суміші, мартели та ін.).

**Класифікація вогнетривких матеріалів.** Встановлено шість основних ознак класифікації вогнетривких матеріалів: хіміко-мінералогічний склад, вогнетривкість, щільність, спосіб формування, термічна обробка, форма і розміри.

**За хіміко-мінералогічним складом** вогнетривкі матеріали розподіляють на типи: кремнеземні, алюмосилікатні (низько-, середньо- і високоглиноземисті), магнезійні, магнезійно-вапняні, магнезійно-шпінелідні, магнезійно-силікатні, вуглецеві, карбідокремнієві, цирконисті, окисні й неокисні.

Усередині кожного типу виділені групи, що відрізняються за вмістом визначальних компонентів.

**За вогнетривкістю** вогнетривкі матеріали поділяють на вогнетривкі (1580-1770°C), високовогнетривкі (1770-2000°C) і вищої вогнетривкості (понад 2000°C).

**За щільністю** вогнетривкі матеріали поділяють на особливо щільні (з відкритою пористістю до 3 %), високощільні (3-10 %) і далі аж до легковагих (45-85 %) та ультралегковагих (понад 85 %).

**За способом формування** вогнетривкі вироби поділяють на пластично-формовані, сухо-формовані, шлікерно-литі, термопластично-пресовані, гарячепресовані, плавлено-литі і пилові.

**За термічною обробкою** вогнетривкі вироби поділяють на обпалювальні і безвипалювальні.

**За формою і розмірами** вогнетривкі вироби ділять на прямі і клинові нормальних розмірів, фасонні прості, скла-



дні, особливо складні, фасонні великоблочні масою понад 60 кг і спеціальні промислового і лабораторного призначення.

Сфера застосування вогнетривких матеріалів визначається їх фізичними і робочими властивостями.

Вогнетривкі матеріали оцінюють за їх фізичними і робочими властивостями.

### **Фізичні властивості вогнетривких матеріалів.**

Пористість і щільність взаємозв'язані; чим вища пористість, тим нижча щільність, і навпаки. Пористість виражають у відсотках. Розрізняють пористість уявну або відкрити, при якій пори сполучаються з атмосферою; пористість уявну закрити, при якій пори розташовані усередині виробу і не сполучаються з атмосферою, і пористість загальну, що дорівнює сумі двох перших. Підвищена пористість є причиною підвищеної газопроникності і зниженої шлакостійкості і механічної міцності.

**Газопроникність**, що знаходиться в прямій залежності від наявності відкритих кризних пор у виробі, визначають коефіцієнтом газопроникності.

**Питома теплоємність** [кДж/(кг·К)] має особливе значення для печей періодичної дії: чим менша питома теплоємність вогнетривких матеріалів, тим менші втрати теплоти на розігрівання футерування до робочої температури.

**Теплопровідність** [Вт/(м·К)] залежить від природи матеріалу, його пористості, температури і стану. Залежність теплопровідності від температури описується формулою

$$\lambda_t = \lambda_0 \pm bt,$$

де  $b$  – емпіричний коефіцієнт;  $t$  – температура, °С.

Теплопровідність більшості вогнетривких матеріалів збільшується з підвищенням температури.

**Електрична провідність** має велике значення для футерування електричних печей. Переважна більшість вогнетривких матеріалів не електропровідні. Їх електричний

опір тим вище, чим менше сторонніх домішок у вогнетривкому матеріалі. Виняток становлять вуглецеві, графітові і карборундові вироби.

**Магнітна провідність**  $\mu$  є відношенням абсолютної магнітної провідності матеріалу до магнітної провідності вакууму. Чисті вогнетривкі матеріали є діамагнітними, тобто для них  $\mu < 1$ .

**Теплове розширення** при нагріванні залежить від природи матеріалу і температури. Для компенсації теплового розширення в кладці футерування печі передбачають зазори (температурні шви), що закриваються у міру розігрівання футерування.

**Робочі властивості вогнетривких матеріалів.** **Вогнетривкість** є властивістю матеріалу протистояти переходу в пластичний або рідкоплинний стан при високих температурах. Вогнетривкість визначають таким чином. З випробовуваного матеріалу за ГОСТом виготовляють піроскопи, що мають форму трикутних усічених пірамід. Піроскоп у вертикальному положенні поміщають на підставці в піч і нагрівають. З підвищенням температури піроскоп розм'якшується і нахиляється. Температуру, при якій верхній кінець піроскопа торкнеться підставки, називають вогнетривкістю даного матеріалу. Піроскоп нахиляється поступово, оскільки вогнетривкий матеріал є багатокомпонентною системою і при нагріванні її компоненти розм'якшуються і розплавляються послідовно, починаючи з більш легкоплавких.

*Деформація під навантаженням при високих температурах* визначає здатність вогнетривких матеріалів протистояти одночасній дії високих температур і навантаженню на стискування. Для випробування виробів виготовляють зразок заввишки 50 мм і діаметром 36 мм. Зразок поміщають у піч, стискаючи під тиском 0,2 МПа, і нагрівають. Температуру відзначають при деформації зразка 4 і

40 %. Температуру, відповідну деформації 4 %, називають температурою початку деформації, а температуру, відповідну деформації 40 %, називають температурою кінця деформації.

Температура початку деформації під навантаженням характеризує будівельну міцність вогнетривкого матеріалу. Вогнетривкі матеріали в печах випробовують напруженням стискування, що не перевищує, як правило, 0,2 МПа, тому температура початку деформації під навантаженням практично дорівнює максимальній температурі застосування вогнетривкого матеріалу.

Різні матеріали при високих температурах поведуться по-різному. На їх деформацію впливають такі основні фактори:

а) наявність або відсутність міцного кристалічного зростка вогнетривкого компонента. Наприклад, висока температура початку деформації динасових вогнетривких виробів пояснюється міцним вогнетривким зростком кристалів  $\text{SiO}_2$ . У структурі шамотних вогнетривких виробів відсутній вогнетривкий кристалічний зросток, вогнетривкі елементи роз'єднані легкоплавкою фазою, в результаті температура початку їх деформації нижча, ніж у динасових вогнетривких виробів;

б) наявність домішок-плавнів; чим їх більше, тим нижча температура початку деформації під навантаженням;

в) щільність вогнетривкого матеріалу; чим вища щільність, тим більший опір деформації під навантаженням.

*Шлакостійкість* – властивість вогнетривких матеріалів протистояти хімічній і фізичній дії шлаків в умовах плавильних і роздавальних печей. Хімічна дія визначається реакціями, що проходять між вогнетривким матеріалом і шлаком, а фізична – розмиваючою дією шлаків стосовно до вогнетривкого матеріалу. Обидва ці чинники діють одночасно. Вогнетривкі матеріали, так само як і шлаки, мо-

жуть бути кислими, основними і нейтральними. Відповідно підбирають матеріал для футерування: при кислих шлаках – кислі вогнетривкі матеріали; при основних шлаках – основні вогнетривкі матеріали.

На шлакостійкість значно впливає температура печі. Із зростанням температури підвищується швидкість хімічних реакцій взаємодії шлаків з вогнетривкими матеріалами, одночасно збільшується рідкотекучість шлаків, що також збільшує їх руйнівну дію на вогнетривкі матеріали.

Змочуваність вогнетривкого матеріалу шлаком значно впливає на шлакостійкість. Чим менша змочуваність, тим вища шлакостійкість вогнетривкого матеріалу.

Фізичні властивості вогнетривкого матеріалу теж впливають на його шлакостійкість. Чим більша щільність і менша пористість вогнетривкого матеріалу, тим він більш шлакостійкий.

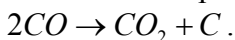
*Термічна стійкість* – властивість вогнетривких матеріалів протистояти різким змінам температури, не руйнуючись і не розтріскуючись. Термічна стійкість визначається числом водяних тепломінів. При цьому вогнетривка цеглина на 50 мм вводиться торцем у піч з температурою 1300°C, а потім занурюють на ту саму глибину в проточну холодну воду (водяна тепломіна). Так повторюють до втрати 20 % маси зразка. Термічна стійкість вогнетривкого матеріалу залежить від багатьох факторів. Вона підвищується при збільшенні теплопровідності і зменшується із зростанням теплового розширення. Форма і розмір вогнетривкого виробу також впливають на його термічну стійкість; вона тим нижча, чим складніша форма виробу і більший його розмір.

*Опір стиранню та удару* має значення для вагранок, тигельних індукційних печей і тому подібне. Міцність вогнетривких матеріалів на стирання встановлюють за допомогою стиральних кругів. При випробуванні визначають,

наскільки менша стає маса зразка. Опір стиранню обумовлений твердістю основного вогнетривкого компонента і матеріалу, що цементує окремі зерна кристалів основного вогнетривкого компонента. При низьких температурах вогнетривкі матеріали мають низький опір удару. При високих температурах ударне навантаження компенсується розм'якшеним шаром, який утворюється на поверхні вогнетривкого матеріалу, оберненій у робочий простір печі.

*Опір дії пічної атмосфери* – важлива властивість вогнетривких матеріалів. Газова атмосфера, що заповнює пічний простір, може бути окислювальною, відновною і нейтральною.

Окислювальній атмосфері добре протистоять всі вогнетривкі матеріали, за винятком вуглецевих. Відновну атмосферу добре витримують вогнетривкі матеріали, що не містять великої кількості оксидів заліза. Оксиди заліза при температурі 450–600°C є каталізаторами реакції



Ця реакція приводить до осадження в порах вогнетривких виробів вуглецю сажі і руйнування кладки.

У печах з контрольованою атмосферою застосовують суміші газів CO, H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, H<sub>2</sub>O, N<sub>2</sub>, що мають в основному відновний характер. Цим газам також добре протистоять вогнетривкі матеріали, що містять мінімальну кількість оксидів заліза.

У сушарках міститься підвищена кількість водяної пари, якій добре чинять опір щільні вогнетривкі вироби. Плавильний пил при високих температурах діє аналогічно шлакам.

Всі вогнетривкі матеріали добре протистоять дії нейтральної атмосфери.

## 14.2. Кремнеземисті вогнетривкі матеріали

Ці матеріали використовують у природному вигляді й у вигляді вогнетривких виробів. Природні кремнеземисті матеріали – жильний кварц, кварцити, пісковики – містять 96-99 %  $\text{SiO}_2$ . Вогнетривкі вироби – кварцове скло і динасові – містять  $\text{SiO}_2$  не менше 93 і 80 % відповідно.

Для розуміння особливостей служби і виготовлення кремнеземних вогнетривких матеріалів розглянемо схему модифікацій  $\text{SiO}_2$  і їх термічні перетворення.

Кремнезем  $\text{SiO}_2$  відомий у восьми модифікаціях: кварц  $\alpha$  і  $\beta$ ; тридиміт  $\alpha$ ,  $\beta$  і  $\gamma$ ; кристобаліт  $\alpha$  і  $\beta$ ; кварцове скло.

Стабільними модифікаціями є кварц  $\alpha$  і  $\beta$ ; тридиміт  $\alpha$  і кристобаліт  $\alpha$ .

На рис. 57 вертикальними стрілками позначені перетворення, що проходять з великою швидкістю, а горизонтальними – перетворення, що проходять з невеликою швидкістю. На схемі наведені також зміни об'єму матеріалу при перетвореннях. Для отримання вогнетривких матеріалів необхідний максимальний перехід модифікацій кварцу в тридиміт, який володіє найменшим тепловим розширенням, найбільшою міцністю зростка кристалів і найбільшою шлакостійкістю. Найбільші об'ємні зміни (16 %) при підвищенні температури спостерігаються під час переходу кварцу  $\alpha$  у тридиміт  $\alpha$ .

Кращі за якістю природні кварцити – цементні і кристалічні кварцити. Цементні кварцити – це тверді породи, що складаються із зерен кварцового піску, зв'язаних кварцовим цементом. Цемент складається із зерен вторинного кварцу розміром 0,001-0,003 мм. Вміст цементу 15–80 %. Кристалічні кварцити – це породи, що складаються з суцільної маси кварцових зерен, що не містять цементу або містять його в дуже невеликих кількостях. З них виготовляють фу-

терування індукційних печей тиглів. За найбільш цінні вважаються кварцити з щільною структурою.

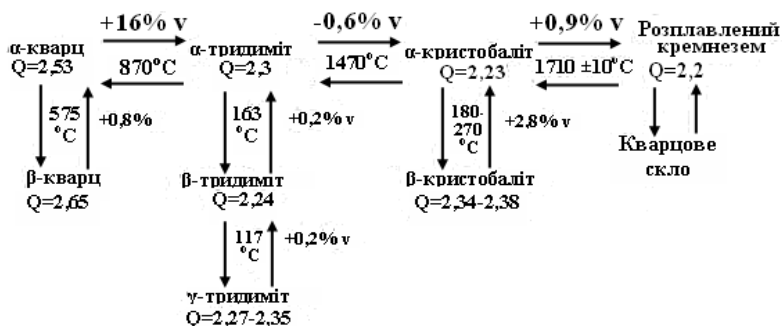


Рисунок 57 – Схема перетворень модифікацій SiO<sub>2</sub>

Основу кварцитів складає кварц. Природними кварцитами після відповідної обробки футерують печі. Так, з меленого кварциту виготовляють тиглі індукційних печей.

У плавильних печах в основному застосовують динасовий вогнетривкий матеріал (динас), що містить не менше 93 % SiO<sub>2</sub> і виготовлений з кремнезему на вапняній зв'язці за допомогою випалення, при якому кремнезем переходить у тридиміт і квистобаліт.

Процес виготовлення динасу складається з таких основних етапів:

1) змішення розмелених кварцитів з вапняним молоком і невеликою кількістю плавня-мінералізатора. Вапняне молоко додають для надання масі пластичності, необхідної при формуванні. Плавень-мінералізатор сприяє переходу однієї кристалічної модифікації SiO<sub>2</sub> в іншу в процесі випалення;

2) формування маси для отримання фасонних виробів;

3) сушіння для видалення фізично зв'язаної вологи і додання певної міцності цеглі-сирцю, що забезпечує можливість їх транспортування і випалення;

4) випалення при температурі 1430°C. У процесі випалення відбувається перетворення вихідних кристалічних модифікацій SiO<sub>2</sub> на тридиміт α. Оскільки внутрішньокристалічні перетворення супроводяться об'ємними змінами обпалювальних виробів, що досягають 3,5–5 %, то нагрівання при випаленні і подальше охолодження проводять поступово за спеціально розробленими графіками. Динас після випалення складається приблизно з 70 % тридиміту α. Кристали SiO<sub>2</sub> складають кристалічний зросток, що пронизує весь виріб. При охолодженні динасу після випалення знову відбуваються внутрішньокристалічні перетворення з різкою зміною об'єму виробу. Особливо небезпечні ці перетворення при температурах нижче 700°C. Основні властивості динасу такі:

Вогнетривкість, °C	1690-1710
Температура початку деформації під навантаженням (не менше), °C	1620-1690
Щільність, т/м <sup>3</sup>	1,8-2
Межа міцності при стискуванні, МПа	17-34
Пористість (не більш), %	21-23

Динас добре протистоїть дії кислих шлаків і має низьку стійкість щодо до основних шлаків. Динас володіє низькою термічною стійкістю - витримує одну-дві водяні теплозміни. Футерування з динасу добре працює при високих температурах, якщо її не охолоджувати нижче 700°C. Вироби з динасу характеризуються великим збільшенням об'єму при нагріванні й охолодженні, пов'язаним з термічним розширенням виробу і модифікаційними змінами SiO<sub>2</sub>.

Розроблена технологія виготовлення високощільного динасу (98 % SiO<sub>2</sub>, пористість 14 %), який відрізняється підвищеною шлакостійкістю. Динасом футерують склепіння мартенівських печей, де він піддається дії високих темпе-



ратур і пилу. Бризки шлаку і плавильний пил взаємодіють з динасом склепіння. При цьому утворюються легкоплавкі силікати, що знижують стійкість склепіння. У цих умовах стійкіша високощільна динасова цегла. Динасом також футерують склепіння дугових сталеплавильних печей. Він знаходиться приблизно в тих самих умовах, що і в склепіннях мартенівських печей, але піддається дії великих температурних перепадів. У дугових печах в період кипіння і рафінування металу температура досягає 1700-1800°C. Температура склепіння біля електродів вища, ніж на периферії. Крім того, дугові печі триваліший час порівняно з мартенівськими працюють при підвищених температурах.

Для склепінь дугових печей застосовують електродинас, що за якістю наближається до високощільного.

Динасові вогнетривкі вироби застосовують також у бе-семерівських конвертерах.

### 14.3. Алюмосилікатні вогнетривкі матеріали

До алюмосилікатних належать вогнетривкі матеріали, що складаються в основному з  $Al_2O_3$  і  $SiO_2$  і невеликої кількості домішок  $FeO$ ,  $CaO$ ,  $Na_2O$  і так далі. Залежно від вмісту  $Al_2O_3$  вони підрозділяються на такі групи:

напівкислі .....	не менше 28 % $Al_2O_3$
шамотні.....	28-45 % $Al_2O_3$
мулітокремнеземисті .....	45-52 % $Al_2O_3$
мулітові .....	72-90 % $Al_2O_3$
корундові .....	понад 90 % $Al_2O_3$

Діаграма стану системи з чистих оксидів  $Al_2O_3-SiO_2$  дає уявлення про фазовий склад і властивості алюмосилікатних вогнетривких матеріалів залежно від співвідношення в них оксидів (рис. 58). Температури плавлення  $Al_2O_3$  2050°C і  $SiO_2$  1710°C. При суміші оксидів, що містять 95 %  $SiO_2$  і 5 %  $Al_2O_3$ , утворюється евтектика з температурою

плавлення 1545°C; при 79 %  $Al_2O_3$  і 21 %  $SiO_2$  утворюється друга евтектика з температурою плавлення 1870°C.

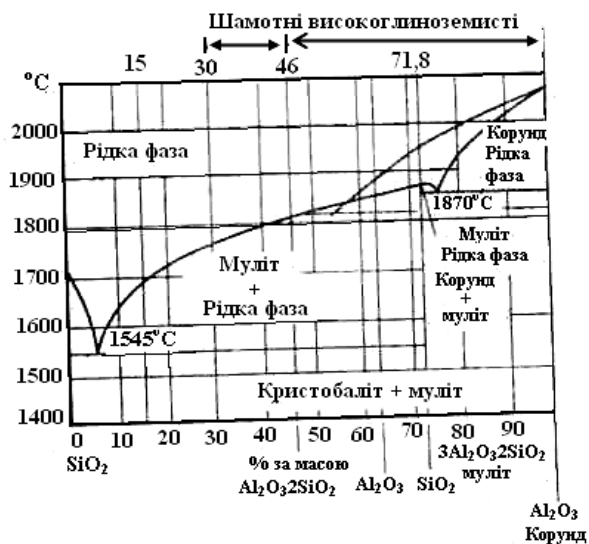


Рисунок 58. – Діаграма стану  $Al_2O_3$ - $SiO_2$

Для всіх складів цієї системи, що містять 5,5-72 %  $Al_2O_3$ , єдиною твердою фазою, стійкою до температури 1910°C, є муліт ( $3Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$ ). При вмісті більше 72 %  $Al_2O_3$  стійкими твердими фазами є муліт і корунд. При вмісті 72–78 %  $Al_2O_3$  і більше муліт утворює з корундом твердий розчин. У міру подальшого збільшення вмісту  $Al_2O_3$  (79-100 %) температура плавлення зростає, досягаючи 2050°C.

*Шамотними* називають вогнетривкі матеріали, що містять 30-45 %  $Al_2O_3$  і виготовлені з вогнетривких глин. Вогнетривкі глини мають вогнетривкість не нижче 1580°C і містять не менше 95 % мінералу каолініту  $Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O$ .

Шамотні вогнетривкі матеріали стандартизовані за основними властивостями, розмірами і зовнішнім виглядом.

Вогнетривкість °C

1580-1750

Температура початку деформації під навантаженням (не менше), °С	1250-1400
Межа міцності при стискуванні, МПа	19-50
Пористість, %	30
Термічна стійкість (число водяних теплозмін)	10-15
Усадка при 1200-1400°С, %	0,7-1

Шамотні вогнетривкі матеріали відрізняються низькою температурою початку деформації під навантаженням, помітною усадкою при високих температурах, значною пористістю і задовільною термостійкістю.

Шамотні вогнетривкі матеріали мають низьку хімічну стійкість щодо основних і задовільну щодо кислих розплавлених шлаків. Застосування їх у високотемпературних плавильних печах обмежене. Проте їх низька вартість і можливість отримання з місцевої сировини сприяють широкому використанню шамотних матеріалів для виготовлення печей, температура в яких не перевищує 1350°С і де вони не контактують з розплавленими шлаками. Шамотними вогнетривкими матеріалами футерують шахти вагранок, повітропідігрівники для вагранок, ковші для металу, нагрівальні і термічні печі, димарі.

*Мулітокремнеземисті, мулітові, мулітокорундові і корундові* вогнетривкі матеріали містять 49-90 %  $Al_2O_3$  і вище. Ці вогнетривкі матеріали називають високоглиноземистими. Із збільшенням вмісту  $Al_2O_3$  підвищується якість вогнетривких матеріалів: вогнетривкість, термічна стійкість, механічна міцність, щільність, шлакостійкість.

Інтенсифікація режимів роботи плавильних печей, печей для витримки і роздачі металу становить все більш високі вимоги до вогнетривких матеріалів стосовно їх стійкості до агресивних розплавів, механічних навантажень, дії газових та іншого середовища при високих температурах. Ці вимоги у багатьох випадках задовольняють високоглиноземисті вогнетривкі матеріали, в основному мулітокору-

ндові і корундові. Основною сировиною для виробництва мулітокорундових і корундових вогнетривких матеріалів служить окисел алюмінію у вигляді технічного глинозему та електрокорунду.

Електрокорунд буває двох видів: білий з 97–99 %  $\text{Al}_2\text{O}_3$  і нормальний з 91–93 %  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . З білого електрокорунду виготовляють корундові вогнетривкі вироби і маси. Для виготовлення високоглиноземистих виробів з меншим вмістом  $\text{Al}_2\text{O}_3$  як сировину використовують бокситові породи і дистен-силіманітовий концентрат. Боксити і бокситові глини, що є породою перехідного типу між бокситами і вогнетривкими глинами, містять більше 45 %  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Дистен-силіманітовий концентрат містить не менше 57 %  $\text{Al}_2\text{O}_3$ .

Для футерування індукційних каналних печей використовують щільні корундові вироби, що виготовляються з електроплавленого білого корунду; технічного глинозему, кварцового піску; дистен-силіманітового концентрату; ортофосфорної кислоти (рис. 59). Глинозем, кварцовий пісок і дистен-силіманітовий концентрат разом тонко розмелюють у співвідношенні: 46 % глинозему, 17 % кварцового піску, 37 % дистен-силіманітового концентрату. Отриману суміш додають до електрокорунду і перемішують з розрахунку 70 % електрокорунду і 30 % суміші. Після цього додають ортофосфорну кислоту в кількості 6 % понад 100 % сухої суміші. Ортофосфорну кислоту вводять як зв'язувальну. Вологість отриманої маси становить 3 %. Пресування сирих виробів здійснюють на гідравлічному пресі під тиском 100 МПа.

Після пресування вироби піддають сушінню при температурі 160–180°C до залишкової вологості не більше 1 %. Висушені вироби обпалюють при температурі 1700°C у тунельних печах. Загальна тривалість випалення 100–130 год. Обпалені вироби після контролю надходять на склад готової продукції.

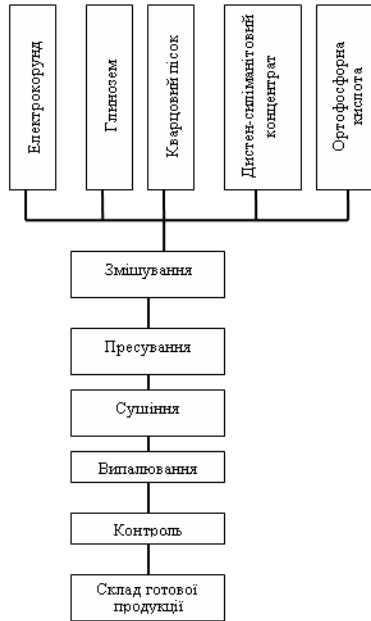


Рисунок 59 - Схема виготовлення корундових виробів

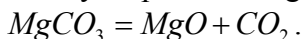
Високоглиноземисті вогнетривкі матеріали широко застосовують в металургії, зокрема для доменних, мартенівських і високотемпературних нагрівальних печей. Корундові вогнетривкі матеріали відрізняються високою стійкістю до рідких металів і шлаків. Вони володіють високою термічною стійкістю і механічною міцністю.

Корундовими вогнетривкими виробами футерують індукційні каналні печі для витримки і перегрівання чавуну. Вони мають такі властивості:

$\text{Al}_2\text{O}_3$ , %	90
$\text{SiO}_2$ (не більше), %	8
Температура початку деформації під навантаженням, °C	1700
Межа міцності при стискуванні, МПа	100
Пористість, %	16

#### 14.4. Магнетитові вогнетривкі матеріали

До них відносять вогнетривкі матеріали: магнетитові (периклазові) із вмістом не менше 90 % MgO і магнетитові (периклазові) на різних зв'язках із вмістом понад 80 %. Магнетитові (периклазові) вогнетривкі матеріали із вмістом не менше 90 % MgO застосовують у вигляді виробів і у вигляді порошку. Сировиною для виробництва магнетитових виробів служить природний магнетит, який майже повністю складається з MgCO<sub>3</sub>. При нагріванні до 600–700°C MgCO<sub>3</sub> розкладається з утворенням MgO:



У результаті виходять дрібні кристали MgO, які при високій температурі спікаються (рекристалізуються) у кристалічні зростки. Властивості магнетитового вогнетривкового матеріалу:

MgO (не менше), % .....	90
Вогнетривкість, °C .....	2000
Температура початку деформації під навантаженням, °C.....	1550-1660
Межа міцності при стискуванні, МПа .....	4-57
Термічна стійкість (число водяних теплзмін).....	1-2

Матеріали мають високу вогнетривкість і температуру початку деформації під навантаженням. Крім того, вони мають хорошу хімічну стійкість щодо основних і залізистих шлаків та розплавлених металів. Якість магнетитових виробів різко погіршується при потраплянні на їх поверхню вологи. При нагріванні магнетитові вироби значно розширюються.

Магнетитовими виробами футерують плавильні печі, ванни, склепіння і випускні отвори. Периклаз (MgO) у вигляді порошку застосовують для футерування індукційних каналних плавильних печей. При зберіганні і транспорту-

ванні вогнетривких матеріалів необхідно виключити потрапляння на них води. Кладку магnezитових вогнетривких виробів бажано проводити досуха або на зневодненій смолі.

### 14.5. Магnezійно-вапняні вогнетривкі матеріали

Найбільшого поширення набули доломітові вогнетривкі матеріали. Доломітовими називаються вогнетривкі матеріали, що складаються з MgO і CaO. Доломітові вогнетривкі матеріали є заміниками магnezитових. Сировиною для виробництва доломітових вогнетривких матеріалів служить природний мінерал доломіт  $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ . У природному доломіті міститься 21,9 % MgO і 30,4 % CaO. Доломітові вогнетривкі матеріали випускають у вигляді порошку (металургійний доломіт) для наварювання і заправки поду сталеплавильних печей і у вигляді формованих виробів. Вони добре протистоять дії основних шлаків, відрізняються хорошою термічною стійкістю. Нижче подані властивості доломітових вогнетривких матеріалів:

MgO, % .....	30-40
CaO, % .....	60-45
Вогнетривкість, °C .....	1800-2000
Температура початку деформації під навантаженням, °C .....	1550-1700
Межа міцності при стискуванні, МПа .....	19-98
Термічна стійкість (число водяних теплзмін) .....	20.

Основний недолік доломітових вогнетривких матеріалів порівняно з магnezитовими – знижена вологошлакостійкість.

## 14.6. Магnezіально-шпінелідні вогнетривкі матеріали

До них належать магnezитохромітові, хромомагnezитові, хромітові і шпінелні вогнетривкі матеріали. *Магnezитохромітові і хромомагnezитові* вогнетривкі матеріали виготовляють з суміші, що складається з 30-70 % магnezитового порошку і 70-30 % хроміту. Як правило, шихта для приготування хромомагnezитових вогнетривких виробів містить 40-50 % магnezитового порошку. В процесі випалення при температурі 1560°C утворюються високотемпературні сполуки типу шпінелей  $MgO-Al_2O_3$  і форстериту  $Mg_2-SiO_4$ .

Магnezитохромітові вогнетривкі вироби підвищеної термічної стійкості із вмістом  $MgO > 60\%$  виготовляють з шихти, що містить до 65 % магnezитового порошку і 35 % хроміту. З такої шихти в результаті випалення при температурі 1650-1700°C отримують магnezитохромітові вогнетривкі вироби, що мають підвищену термічну стійкість. Вони володіють високою вогнетривкістю (2300°C) і температурою початку деформації під навантаженням (до 1670°C) і підвищеною термічною стійкістю. Магnezито-хромітовими виробами успішно футерують склепіння сталеплавильних печей, склепіння і поди нагрівальних печей.

*Хромомагnezитові вогнетривкі вироби* містять 40–60 %  $Cr_2O_3$ ; їх застосовують там само, де і магnezитохромітові з урахуванням їх меншої термічної стійкості.

Хромітові вогнетривкі вироби містять менше 40 %  $MgO$  і понад 25 %  $Cr_2O_3$ . Сировиною для виготовлення служать хроміт і магnezит. Мінерал хроміт  $FeO \cdot Cr_2O_3$  в чистому вигляді містить 32,1 %  $FeO$  і 67,9 %  $Cr_2O_3$ . З хроміту виготовляють невелику кількість вогнетривких виробів і застосовують його порівняно рідко.

Шпінелні вогнетривкі матеріали в основному складаються з мінералу  $MgO \cdot Al_2O_3$ , що називається шпінеллю, і



містить 25–40 % MgO і 55–70 % Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Шпінель MgO·Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> є вогнетривкою сполукою з температурою плавлення 2035°C.

Шпінельні вогнетривкі матеріали мають високу вогнетривкість (1900°C) і температуру початку деформації під навантаженням (до 1800°C), хорошу термічну стійкість і задовільну стійкість до основних шлаків. Застосовують для футерування окремих елементів плавильних печей.

#### **14.7. Вуглецеві вогнетривкі матеріали**

Вуглецеві графітовані матеріали містять понад 98 % C, вуглецеві неграфітовані (вугільні) – понад 85 % C і вуглецевовмісні – 5-70% C. Сировиною для виробництва служать графіт, антрацит, кокс, кам'яновугільна смола, вогнетривка глина і кварцовий пісок. Графіт – природний матеріал, графіт кращих родовищ містить 70-97 % C. Температура плавлення графіту 3800°C, температура початку деформації під навантаженням 2000°C. Графіт характеризується хорошою шлакостійкістю і теплопровідністю, але легкою окиснюваністю. З вуглецевих (вугільних) матеріалів виготовляють електроди дугових печей.

Вуглецевмісні вогнетривкі матеріали виготовляють з суміші: 20–60 % графіту, 40–10 % шамоту або кварцу, 40–30 % вогнетривкої глини. Вироби формують із пластичних або напівсухих мас. Щоб уникнути окислення вуглецю, виріб обпалюють у керамічних капсулах із засипкою коксовим дрібняком. Температура випалення залежить від складу шихти і призначення виробів. Так, тиглі обпалюють при температурі 900-1000°C, а розливні пробки і стакани – при 1300-1350°C. Вироби характеризуються такими властивостями:

Вогнетривкість, °С.....	2000
Температура початку деформації під навантаженням, °С.....	1400-1600
Межа міцності при стискуванні, МПа.....	12-29
Пористість, %.....	28
Термічна стійкість (число водяних теплозмін).....	до 45

Вироби мають задовільну шлакостійкість проти основних і кислих шлаків та підвищену теплопровідність. Вироби широко застосовують у ливарному виробництві при плавці і розливанні металу.

#### **14.8. Карбідокремнієві вогнетривкі матеріали**

Карбідокремнієві матеріали підрозділяють на ті, що містять 70-90% SiC і 20-70 % SiC. Карбід кремнію (карборунд SiC) отримують із чистого кварцового піску і подрібненого коксу в електричних печах опору при температурі 2000-2200°С. Чистий кристалічний карбід кремнію складається з 69,1-69,8 % Si і 27,7-30 % С. Карбід кремнію крихкий і легко роздрібнюється. При нагріванні до температури 2300°С карбід кремнію не розм'якшується і не розплавляючись, розкладається на Si і С. За наявності кисню він інтенсивно окислюється при температурі 1700°С.

Рекристалізовані карбідокремнієві вироби із вмістом SiC > 90 % виготовляють з подрібненого карбиду кремнію і невеликої кількості тимчасової зв'язки, яка вигоряє або розкладається при невисоких температурах. З отриманої зволоженої маси формують вироби під тиском 50-100 МПа. Відформовані вироби сушать і обпалюють при температурі 2300°С у коксовій засипці. Під час випалення карбід кремнію рекристалізується, тобто окремі кристалічні зерна спікаються в суцільний кристалічний моноліт.

Карбідокремнієві вироби на зв'язці виготовляють з подрібненого карбіду кремнію на якій-небудь мінеральній зв'язці (глині, феросиліції, кварциті та ін.). Масу, що складається з подрібненого карбіду кремнію і зв'язки, формують і обпалюють. Якість карбідокремнієвого виробу підвищується при заміні глинистої зв'язки кварцом або феросиліцієм. При вмісті в шихті більше 85 % SiC її обпалюють без доступу повітря в муфелях з кварцовою або коксовою засипкою. Температура випалення залежить від вмісту в шихті SiC: чим більше SiC, тим вища температура випалення. Карбідокремнієві вироби характеризуються високою вогнетривкістю, механічною міцністю, теплопровідністю, електропровідністю, добре протистоять дії металів і шлаків. Рекристалізовані карбідокремнієві вироби мають вищі показники, ніж вироби на зв'язці. Нижче наведені властивості карбідокремнієвих виробів.

SiC, %.....	50–92
Вогнетривкість, °C .....	1820–1860
Температура початку деформації під навантаженням, °C . . . . .	1650–1860
Межа міцності при стискуванні, МПа .....	39–58
Пористість, % .....	11–26
Термічна стійкість (число водяних тепломін).....	50–100
Об'ємна маса, т/м <sup>3</sup> .....	2,1–2,6

З карбіду кремнію виготовляють вироби, які повинні мати високу вогнетривкість у поєднанні з високою механічною міцністю, теплопровідністю, електропровідністю. Карбідокремнієві вогнетривкі вироби випускають у вигляді цегли, плит, труб, електронагрівачів, муфелів і т. д., а також як напрямні, по яких прошттовують піддони в печах для термічної обробки і виготовлення радіаційних труб.

## 14.9. Цирконисті вогнетривкі матеріали

Головна складова цирконієвих матеріалів – двоокис цирконію  $ZrO_2$ . Розрізняють матеріали: цирконієві (баделеїткові) із змістом понад 90 %  $ZrO_2$ , баделеїтокорундові понад 30 %  $ZrO_2$  і до 65 %  $Al_2O_3$  і цирконові на різних зв'язках з різними добавками (понад 35 %  $ZrO_2$  і понад 18 %  $SiO_2$ ). Двоокис циркону в природному стані трапляється рідко. Невелике поширення в природі має мінерал циркон, у якому міститься 67,3 %  $ZrO_2$  і 32,9 %  $SiO_2$ . Циркон хімічно стійкий матеріал. Він розчиняється лише в плавиковій кислоті. Чистий циркон (концентрат) – високоякісна сировина для виробництва вогнетривких матеріалів. Цирконистим вогнетривким матеріалам властиві сталість об'єму при нагріванні, висока температура початку деформації під навантаженням, хороша термічна стійкість і шлакостійкість. Вогнетривкі матеріали, виготовлені з концентрату циркону, мають вогнетривкість до 1800-2300°C. Вони входять до складу мас, що застосовуються для набивання сифонів вагранок. Вироби з цирконових вогнетривів застосовують у лабораторних печах. Сфера їх застосування обмежена у зв'язку з невеликим обсягом виробництва.

## 14.10. Легковагі вогнетривкі матеріали

Легковагі вогнетривкі матеріали характеризуються високими вогнетривкістю і теплоізоляційними властивостями. Теплоізоляційні властивості забезпечуються за рахунок високої пористості: чим менші розміри пор і більше їх число, тим вищі теплоізоляційні властивості. Легковагі вогнетривкі матеріали випускають у вигляді цегли і фасонних виробів. Вони легко піддаються обробці різанням. В той же час унаслідок достатньо високої механічної міцності їх застосовують для кладки стін, футерування заслінок

і так далі. Заміна звичайних вогнетривких матеріалів легковагими зменшує втрати теплоти через стіни печей.

У нашій країні випускають шамотні, динасові, високоглиноземисті та інші легковагі вогнетривкі матеріали. Температура застосування їх до 1500-1550°C.

Застосування легковагих вогнетривких матеріалів підвищує економічність роботи печей за рахунок зменшення втрат теплоти через стіни печей і скорочення часу розігрівання печей до робочої температури з холодного стану.

### **14.11. Вогнетривкі бетони і розчини**

*Вогнетривкі бетони* готують з трьох складових: цементу (портландцементу, глиноземистого), заповнювача і води.

Глиноземистий цемент складається з 45–55 %  $Al_2O_3$ , 48-35 %  $CaO$ , 7-8 %  $SiO_2$  і до 5,5 % решти оксидів. Такий цемент використовують для бетонів, що працюють при температурах 900-1300°C; для вищих температур застосовують високоглиноземистий цемент, що містить до 60-70 %  $Al_2O_3$ . Заповнювачами служать вогнетривкі матеріали. При 900-1300°C використовують шамот, при 1300-1500°C хромомагнезит. Для вогнетривкіших бетонів застосовують високоглиноземисті заповнювачі. Глиноземистий цемент, реагуючи з водою за реакцією

$$2(CaO \cdot Al_2O_3) + 10H_2O = 2CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 7H_2O + Al_2O_3 \cdot 3H_2O,$$

твердне і зв'язує всю масу в єдине ціле. При нагріванні від 400 до 900°C міцність бетону знижується внаслідок процесів дегідратації. При температурі 900-1000°C у бетоні утворюється рідка фаза, що сприяє процесу випалення і підвищенню його міцності. У результаті випалення між зернами вогнетривкого заповнювача утворюються вогнетривкі сполуки  $CaO \cdot SiO_2$ ,  $CaO \cdot Al_2O_3$  та інші, що цементують всю масу бетону. Для футерування індукційних плавильних

печей тиглів і печей з відокремленими індукційними одиницями широко застосовують вогнетривкі набивання – різновид вогнетривкого бетону. Заповнювачами служать різні вогнетривкі матеріали MgO (периклаз), Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (корунд), муліт (3Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>·2SiO<sub>2</sub>), мулітокорунд і тому подібне. Як зв'язувальні служать глиноземистий цемент, вогнетривка глина та ін. Набивних елементів футерування набувають необхідні якості після сушіння і випалення, як правило, безпосередньо в печі.

Для додання вогнетривкій масі необхідної пластичності при набиванні інколи застосовують органічні зв'язувальні або рідке скло. У таблиці 6 наведені вогнетривкі маси для футерування окремих елементів індукційних плавильних печей з відокремленими каналними одиницями. Тиглі індукційних печей набивають кварцитами. Для гарячого ремонту футерувань печей використовують торкретування.

Таблиця 6 – Вогнетривкі маси для футерування індукційних плавильних печей

Місце застосування	Склад маси, %
Індукційна відокремлена одиниця і зливний канал	Порошок з корунду: не менше 95 Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , не більше 0,5 Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , 2,5–3,5 TiO <sub>2</sub>
Індукційна відокремлена одиниця	Порошок з периклазу: 97,6 MgO, 0,2 Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , 0,4 SiO <sub>2</sub> , 0,1 Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , 0,7 Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , 1 CaO
Сифон для заливання металу	Суміш з корунду, шамота і глини: не менше 76,0 Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , не більше 0,8 Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , 2–3 TiO <sub>2</sub>
Мундштук для приєднання відокремленої одиниці	Порошок з корунду з додаванням фосфорнокислого амонію: не менше 89 Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , не більше 0,5 Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , 2,5–3,5 TiO <sub>2</sub> , 2,6–3,3 P <sub>2</sub> O <sub>6</sub>
Сифон для заливання металу	Набивна маса з додаванням ортофосфорної кислоти: не менше 78 Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , не більше 1,2 Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , 2,5–3 P <sub>2</sub> O <sub>6</sub>

Вогнетривкі маси в пластичному стані в суміші з плавнями за допомогою торкретмашин наносять на гарячу поверхню футерування і спікають з нею до утворення моноліту. Таким чином проводять гарячий ремонт мартенівських, дугових, індукційних плавильних та інших печей.

*Вогнетривкими розчинами* заповнюють шви між моделльною цеглою або фасонними виробами. Хімічний склад і властивості розчинів мають бути якомога ближче до складу і властивостей матеріалу цегли. При розігріванні печі масу розчинів сушать і обпалюють до утворення твердого черепка, що спікся з поверхнею цегли. При цьому кладка печі утворює суцільний моноліт, що спікся. Випускають готові склади розчинів, мертелями, що називаються. Мертелі також виготовляють на місці для кожного виду вогнетривів. Мертель готують з порошку відповідного вогнетривкового матеріалу і зв'язки, якою найчастіше буває вогнетривка глина. Наприклад, мертель для шамотної кладки складається з 60 % шамотного порошку і 40 % меленої вогнетривкої глини, розчиненої водою до консистенції густої сметани. Застосовують розчини, що тверднуть при низьких температурах і називаються легкотверднучими розчинами. До їх складу входить рідке скло. Вони підвищують міцність і газощільність кладки.

При футеруванні печі прагнуть до отримання температурних швів між виробами мінімальної товщини. Це особливо важливо для плавильних печей, де товщина шва ретельно контролюється. Такі самі вимоги ставлять і до мертелю. Для кладки корундових вогнетривів у індукційній каналній печі для витримки чавуну застосовують мулітокорундовий тонкого помелу мертель з такими властивостями:

$\text{Al}_2\text{O}_3$ (не менше), % .....	77
$\text{Fe}_2\text{O}_3$ (не більш), % .....	1,6
Втрати під час прожарювання, % .....	1,2-1,9

Вміст у сухому мертелі (понад 100 %), %:	
Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> (рідке скло).....	0,12-0,18
Сульфітно-спиртна барда .....	0,07-0,13
Зерновий склад, %:	
0,09-0,5 мм .....	30-40
менше 0,09 мм.....	60-70

## 14.12. Теплоізоляційні матеріали

Як правило, піч футерують матеріалами двох видів – наполегливими і теплоізоляційними. Вогнетривкі матеріали добре протистоять дії високих температур, металів, шлаків і т. д., але мають високу теплопровідність. Теплоізоляційні матеріали мають низьку теплопровідність, але не витримують дії високих температур, металу, шлаків тощо. Температура застосування теплоізоляційних матеріалів не перевищує 900°C. Футерування печі конструюють так, щоб перший шар – робочий простір – був викладений вогнетривкими матеріалами, а другий – теплоізоляційними матеріалами. Теплоізоляційні матеріали часто наносять і на зовнішні стіни каркасів печей, сушарок, топок і тому подібне. Ці матеріали застосовують у вигляді формованих виробів, сипких матеріалів, мастик. Їх підрозділяють на природні і штучні. До природних відносять діатоміт, перліт, азбест та ін., до штучних – діатомітову цеглу, азбоцемент, совеліт, шлакову і скляну вату, вапняно-кремнеземні плити та ін.

**Діатоміт** – природний матеріал, що є залишками панцирних мікроорганізмів. У природному вигляді застосовують у вигляді сипких матеріалів і обмазок. Діатомітову цеглу виготовляють формуванням діатомітового порошку з глиною з подальшим випаленням. Цеглу випускають трьох марок: 500, 600 і 700 (цифри відповідають щільності) і використовують до температури 900°C для кладки зовніш-



нього шару ізоляції стін і склепінь. Межа його міцності на стискування залежно від щільності становить 0,6-1 МПа. Теплопровідність 0,12-0,6 Вт/(м·К).

**Азбест** – природний мінерал волокнистої будови, що застосовується у вигляді листового картону, шнура і сипкого матеріалу. Азбестовий картон виготовляють з 80 % азбесту і 20 % вогнетривкої глини.

**Совеліт** виготовляється із суміші доломіту й азбесту, застосовують до температури 500°C для зовнішньої ізоляції у вигляді плит сипкого матеріалу і мастик.

**Шлакова вата** – пористий матеріал з хаотично розміщених ниток металургійного шлаку, отримують роздмухуванням струменя шлаку струменем пари або стисненого повітря. Її застосовують у початковому вигляді, а також у вигляді виробів: повсті, плит тощо до температури 600°C.

**Вапняно-кремнеземні плити** виготовляють з вапняку, кремнеземного матеріалу та азбесту шляхом приготування з цих компонентів тонкодисперсної гідромаси, заливання її у форми, запарення і сушіння в автоклавах. Температура застосування виробів до 600°C.

## РОЗДІЛ 15

### БУДІВЕЛЬНІ ЕЛЕМЕНТИ ПЕЧЕЙ

#### 15.1. Будівельні матеріали, метали і жаростійкі сплави

Окрім вогнетривких і теплоізоляційних матеріалів, у печебудуванні в значних обсягах використовують звичайні будівельні матеріали.

**Будівельну червону цеглу** застосовують для будівництва фундаментів, лежаків, стовбурів димарів. Гранична температура застосування червоної цегли 600°C. Його се-

редня теплопровідність – 0,815 Вт/(м·К). Будівельну цеглу кладуть на розчині. Основна вимога до розчинів – швидке схоплювання і перетворення кладки в моноліт. Розчини виготовляють з піску і зв'язувальних речовин. Залежно від характеру останніх розчини бувають цементні, вапняні, цементно-вапняні.

**Кислототривку цеглу**, що протистоїть дії кислот, застосовують для футерування димарів у тих випадках, якщо в димі містяться сірчисті сполуки.

**Селікатну цеглу** застосовують для димарів температурних печей.

**Бутовий камінь** це є шматки гірських порід неправильної форми масою 15-40 кг. Застосовують пісковикові та вапнякові камені. Пісковикові камені витримують температуру до 600°C, вапнякові тільки до 200°C. Бутову кладку проводять на будівельних розчинах. З бутового каменю зводять фундаменти.

**Звичайні бетони** виготовляють з піску з щебенем або гравієм (наповнювач), цементу (зв'язувальне) і води.

З цементів найбільшого поширення дістав портландцемент. Його усереднений склад (мас. %): 60-67 CaO; 18-24 SiO<sub>2</sub>; 4-8 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; 2-6 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; до 4,5 MgO; до 3 SO<sub>3</sub>. Як швидкотверднучий застосовують глиноземистий цемент. Як цемент інколи застосовують *розчинне (рідке) скло*. Рідке скло складається з силікатів натрію (Na<sub>2</sub>O)<sub>n</sub>·SiO<sub>2</sub> і калію (K<sub>2</sub>O)<sub>n</sub>·SiO<sub>2</sub>. Для рідкого скла модуль SiO<sub>2</sub>/Na<sub>2</sub>O 2-3,5. Рідке скло використовують у вигляді водного розчину, що твердне на повітрі.

**Гідроізоляційні матеріали** застосовують для ізоляції від ґрунтових вод фундаментів печей, лежаків і димарів труб. Найбільш широке застосування отримали толь – покрівельний картон, просочений дьогтем і посипаний піском; руберойд – покрівельний картон, просочений м'якими наф-

товими бітумами, покритий з обох боків тугоплавким нафтовим пеком і тонким шаром тальку та ін.

**Деревину** застосовують для будівництва опалубок, футерування печей і в конструкціях індукційних нагрівачів.

**Метали і сплави** застосовують під час спорудження печей і сушарок. Пічні конструкції, що знаходяться в зоні дії високих температур і агресивних середовищ, виготовляють із спеціальних металів і сплавів. Звичайний сталевий прокат різних марок застосовують до температур 350°C. З нього виготовляють каркаси печей і сушарок, різні механізми, розташовані поза робочим простором печі. Так, каркаси індукційних каналних печей виготовляють з низьковуглецевої сталі (0,12–0,2 % C, 0,05 % Si, 0,4–0,7 % Mn), яка добре зварюється і не втрачає механічних властивостей протягом тривалого часу при дії підвищених температур. Обід, за яким бочкоподібний каркас перекочується по роликах, виготовляють із сталі, що містить 0,02% C; 0,05 % Si; 1-1,6 % Mn. Магнітопроводи індукційні отримують з листової електротехнічної сталі E330, що містить 2,8–3,5 % Si; товщина листа 0,35 мм. При напруженості магнітного поля 10-300 А/см магнітна індукція 1,7-2 Тл, питомі втрати 0,6-1,9 Вт на 1 кг сталі, сталь холоднокатана текстурована. Котушки індукторів індукційних печей набирають з профільованих трубок, виготовлених з міді, усередині яких протікає охолоджувана вода. Пальники і пристрої форсунок, як правило, виготовляють із звичайної сталі і чавуну. При температурі вище 500°C застосовують жаростійкі метали і сплави.

Сталі і сплави, що зберігають достатню механічну міцність і жаростійкість при високих температурах, містять значну кількість хрому і нікелю, а також добавки алюмінію, титану, вольфраму і так далі. Ці сталі промисловість випускає у вигляді прокату (листа, труб, штанг і т. д.), а також литих деталей.

Із жаростійких сплавів виготовляють піддони, напрямні, конвеєрні стрічки, муфелі, деталі завантажувальних, розвантажувальних механізмів і відокремлених індукційних каналних одиниць тощо. Наприклад, водоохолоджувані сорочки відокремлених індукційних каналних одиниць зварюють з гарячекатаного жаростійкого листового матеріалу. Ці метали і сплави повинні добре зварюватися і оброблятися різанням, а також володіти стабільністю структури в процесі експлуатації.

Метали і сплави для нагрівальних елементів опору відрізняються високою температурою плавлення, високим питомим електричним опором, достатньо високою механічною міцністю, що забезпечує відсутність деформації нагрівача при високих температурах. Нагрівальні елементи повинні протистояти дії пічних атмосфер. Вони також мають бути пластичними, добре зварюватися і не втрачати цих властивостей після багатократного нагрівання до робочої температури, щоб їх можна було ремонтувати в процесі експлуатації.

Сплави для виготовлення нагрівальних елементів опору за хімічним складом ділять на ніхроми, ніхроми з алюмінієм, залізохромоалюмінієві і залізохромонікелеві (таблиця 7). Їх застосовують у вигляді дроту і стрічки.

Ніхроми є сплавами нікелю і хрому. Ніхроми найбільш поширені, їх застосовують у печах до температури 1100°C. Вони пластичні, добре зварюються після багатократних нагрівань, протистоять дії енто- і екзогазу, але навуглецьовуються і руйнуються в навуглецьовувальній газовій атмосфері. Залізохромоалюмінієві сплави застосовують при температурах до 1300°C. До їх складу, окрім хрому і нікелю, входить 3,5-5,8 % Al. Нагрівачі з них стійкі при температурі 1200-1300°C, але з часом стають крихкими, внаслідок чого їх ремонт у процесі експлуатації неможливий. Із сплаву, що складається з 20 % Cr і 80 % Ni, відливають

секції жолобчастих нагрівачів, а потім їх зварюють один з одним. У вакуумних печах для нагрівальних елементів опору і теплоізоляційних екранів використовують вольфрам (температура плавлення 3380°C), молібден (2610°C), тантал (2996°C), ніобій (2468°C) та ін.

Таблиця 7 – Сплави для елементів опору

Сплав	Вміст, %					Температура застосування, °С	ρ при 0 °С, Ом·м
	Cr	Ni	Al	Ti	Fe		
Ніхром	19-23	Решта	0,4–1,1	2-2,9	–	1100	$1,27 \cdot 10^{-6}$
	15-18	55–61	0,2	0,4	Решта	1000	$1,11 \cdot 10^{-6}$
Ніхром з алюмінієм	26-29	Решта	2,6–3,5	–	–	1200	$1,34 \cdot 10^{-6}$
	15-18	56–61	3,2–4	–	Решта		$1,21 \cdot 10^{-6}$
Залізо-хром-алюмінієвий	26-28	0,6	5–5,8	–	Решта	1300	$1,42 \cdot 10^{-6}$
	21,5-23,5	0,6	4,5–5,2	–	Решта	1200	$1,35 \cdot 10^{-6}$
Залізо-хромнікелевий	24-27	17-20	–	–	Решта	1000	$0,92 \cdot 10^{-6}$

## 15.2 Конструктивні елементи і футерування печей

Фундаменти печей призначені для рівномірної передачі маси печі на ґрунт. Різні ґрунти можуть витримувати різне навантаження. Тиск, вироблюваний подошвою фундаменту на ґрунт, беруть не більше 2500 кПа. Для забезпечення рівномірного осідання фундаменту навантаження має бути однаковим по всьому периметру подошви.

Геометрична форма фундаменту може бути різною, наприклад такою, як на рис. 60. Фундамент має бути міцним. Частіше за все й будують з бутового каменю, викладеного на розчині, а також з бетону і залізобетону. Щоб уникнути розхитування, глибина заставляння фундаменту

має бути нижчою за глибину промерзання ґрунту. Під час будівництва печі усередині будівлі це правило не має значення.

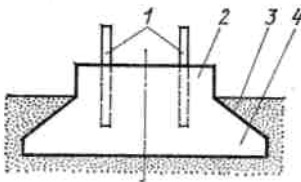


Рисунок 60 - Фундамент печі: 1 – анкерні болти; 2 – опора;  
3 – консоль; 4 – підощва

У вологих ґрунтах фундаменти захищають від дії ґрунтових вод або покриваючи поверхню фундаменту гідроізоляційними матеріалами (наприклад, руберойдом), або огорожуючи фундамент шпунтовими балками, або осушуючи простір навколо фундаменту, для чого дренують ґрунтові води.

Фундаменти захищають від дії високих температур (максимальна температура не вище 200°C).

**Каркас печі** зводять на фундаменті. Призначення каркаса – сприймати зусилля, що виникають від маси металу або іншого матеріалу, що знаходиться в печі, футерування печі та інших елементів, які кріпляться на каркасі.

Каркас печі може бути стаціонарним (наприклад, у вагранки) і нестаціонарним (індукційний міксер барабанного типу). Конструкція каркаса залежить від типу печі. При застосуванні жорсткого каркаса (рис. 61) у кладці печі залишають температурні шви для компенсації температурного розширення кладки. Жорсткий каркас примушує кладку розширюватися у бік температурного шва. Рухомі каркаси, що мають не жорсткі, а регульовані болтові зв'язки, практично не застосовують на печах ливарного виробництва.

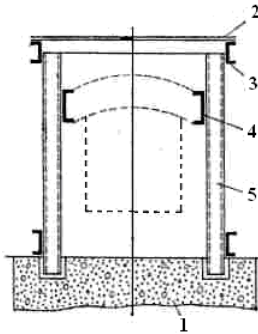


Рисунок 61 – Жорсткий каркас печі: 1 – фундамент; 2 – поперечне стягування; 3 – подовжня балка; 4 – під'яtkова балка; 5 – стійка

Каркаси печей з аroчним склепінням розраховують на зусилля розпорів склепіння. На рис. 62 зображені під'яtkова балка 2 і стійка 1, де сила  $F$ , що виникає від дії склепіння 3, направлена перпендикулярно до площини п'яtkової цегли. Ця сила може бути розкладена на вертикальну силу  $P$ , що діє на кладку стінки 4 печі, і на зусилля розпору  $H$ . При нагріванні цегла розширюється, і внаслідок цього створюються додаткові зусилля. Щоб врахувати цю обставину, величину  $H$  множать на емпіричний коефіцієнт  $k$ . Коефіцієнт  $k$  залежить від середньої температури нагрівання склепіння. При  $t_{\text{скл}} = 900^{\circ}\text{C}$   $k = 2$ ; при  $t_{\text{скл}} = 900\text{--}1200^{\circ}\text{C}$   $k = 2,5$ ; при  $t_{\text{скл}} = 1200^{\circ}\text{C}$   $k = 3$ . Для сприйняття і передачі на каркас зусилля розпору аroчного склепіння служать під'яtkові балки. У високотемпературних (наприклад, мартенівських) печах їх виготовляють водо- або пароохолодженими. Під'яtkову балку розраховують як балку, рівномірно навантажену по довжині на двох опорах по кінцях. Стійки каркаса розраховують на вигин. Поперечні зв'язки розраховують на розрив.

Сучасні плавильні індукційні печі – барабанного або типу тигля. Їх каркаси випробовують складніші навантаження, ніж каркаси стаціонарних печей.

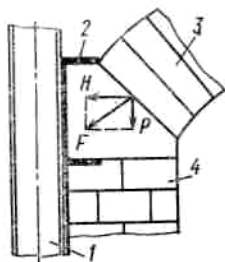


Рисунок 62 - Підп'яткова балка

У печі барабанного типу барабан 5 виготовлений з низьковуглецевої сталі (рис. 63). Фланці 6, 8 призначені для приєднання індукторів. Короби 2, 4 є каркасами зливного і заливного сифонів. Барабан приварений до двох торцевих стінок 9, на кожній з яких розміщене обіддя 1, 10, на яких барабан повертається навколо своєї осі на катках 7. Вікно 3 для скачування шлаку розташовано на барабані. Каркас зазнає складних механічних навантажень. Маса рідкого металу, футерування, сифонів та індукторів діє через обіддя на катки. Температура каркаса місцями досягає 300°C. У всіх положеннях печі каркас повинен зберігати жорсткість і тим самим забезпечувати нормальні умови роботи футерування печі. На рис. 64 показаний каркас печі тигля великої ємності. У каркас вмонтований набивний кварцитовий тигель з індуктором і магнітопроводами. При нахилі печі каркас повертається навколо осі 1 за рахунок зусиль двох гідравлічних циліндрів, шарнірно сполучених з цапфами 5. Зусилля гідравлічних циліндрів направлено вгору. Каркас складається з нижньої опорної рами 4, *верхньої* рами — майданчика 3 і стійки 6. На двох середніх посиленних



стійках укріплені цапфи. До верхньої рами приварений каркас зливного носка 2. Вся конструкція суцільнозварна. У процесі нахилу печі конструкція каркаса зазнає складних механічних навантажень. Маса каркаса досягає 40 т. Загальна маса печі, що нахилиє, включаючи рідкий метал, футерування, індуктор і магнітопроводи, досягає 100 т.

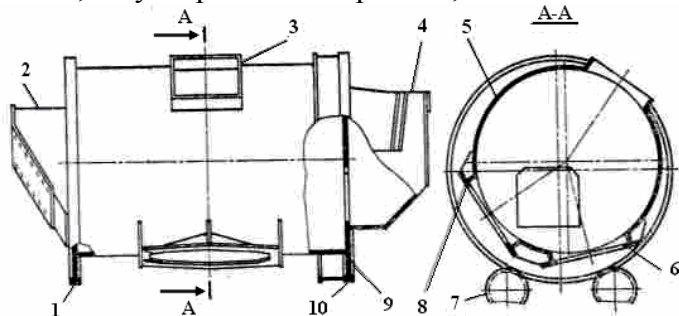


Рисунок 63 - Каркас барабанної печі

Враховуючи важкий режим роботи каркаса, його після виготовлення випробовують на механічну міцність з п'ятикратним навантаженням за масою. Каркас завантажують баластом і на спеціальному стенді повертають у робоче положення навколо осі 1 і повертають у початкове положення. Так повторюють кілька разів.

Футерування будь-якої печі має бути міцним, щільним і довговічним. Ці якості футерування визначаються двома вирішальними чинниками: правильним підбором матеріалів і хорошою якістю виконання робіт.

Під час виконання простої цегляної або фасонної кладки потрібні ретельне виконання робіт, перев'язка швів і відповідна товщина швів між цеглою або фасонними виробами. Залежно від товщини швів кладку розподіляють на декілька категорій. Особливо ретельно викладають ванни плавильних печей з товщиною шва 1 мм. За необхідності

цеглу заздалегідь підганяють. Проте тесаною поверхнею цеглу не можна класти у бік робочого простору печі.

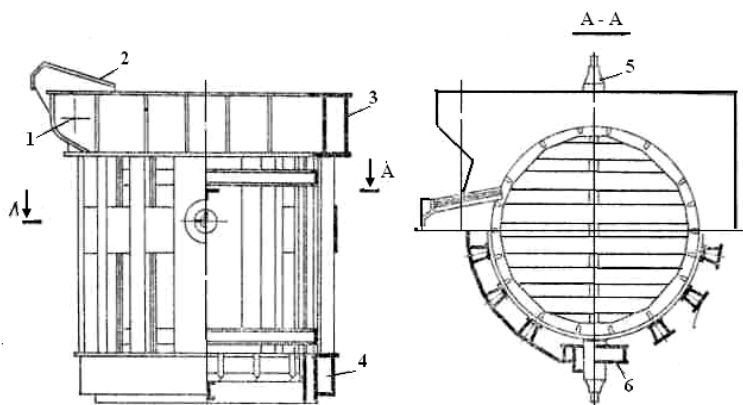


Рисунок 64 - Каркас печі тигля

У більшості випадків цеглу укладають на плашку, але в подах і склепіннях часто кладуть на ребро і на торець (рис. 65). Розрізняють кладку цегли ложкову і поперечикову. Температурні шви між цеглинами, як правило, перев'язують. Перев'язку температурних швів здійснюють, зміщуючи цеглу подальшого ряду стосовно до попереднього на  $1/2$ ,  $1/4$  і  $3/4$  цеглини. Вогнетривкий шар з ізоляційним шаром зазвичай не перев'язують. Як правило, для кріплення ізоляційного шару роблять напуск вогнетривкої цегли через 4-8 рядів.

Футерування печі складається з поду, стін і склепіння.

**Під печі** викладають найчастіше на сталеві листи, що спираються на підповоді балки або прямо на фундамент. Зазор між подом і фундаментом, утворюваний за допомогою підповодих балок залишають для того, щоб забезпечити циркуляцію повітря й уникнути перегрівання низу поду і верху фундаменту. Під завжди роблять багат шаровим. Нижні шари, які називаються вистиланням, викладають з

теплоізоляційної цегли і низьких сортів вогнетривкої цегли, а верхні шари – з вогнетривкої. При кладці поду забезпечують ретельну перев'язку швів. Ряди цегли кладуть упереміж – то на плашку, то на ребро; самий верхній ряд кладуть завжди на ребро. Така кладка краще протистоїть механічним діям, яких зазнає поверхня поду.

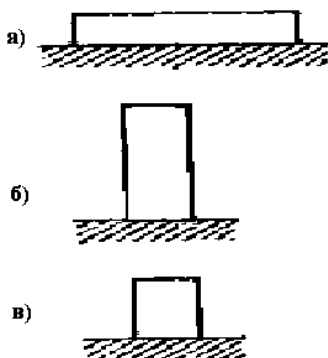


Рисунок 65 – Способи укладання цегли: а – на плашку; б – на торець; в – на ребро

Футерування індукційної каналної печі з відокремленими індукційними одиницями – найбільш складна. На рис. 66 зображено футерування нижньої частини барабанної індукційної печі з відокремленими індукційними одиницями. Піч має металевий циліндровий каркас 4. У нижній частині печі встановлено дві водоохолоджувані рами 2 з фланцями, до яких кріпляться відокремлені індукційні одиниці. Мундштучний отвір 1 з'єднується з внутрішньою порожниною індукційних одиниць. Внутрішню порожнину ванни футерують корундовою цеглою 6, 7. Такі шари 3 і 5 футерують високоглиноземистою цеглою. Потім йде шар шамотової цегли 8 і легковагої цегли 9. Мундштучний отвір футерують заливною або набивною корундовою масою 12. Простір між водоохолоджуваною рамою і каркасом ущільнюють корундовою масою 11. Для утримання

футерування над мундштучними отворами встановлюють «мости» із спеціальної мостової корундової цегли 10. Ці мости, діючи подібно до плоского склепіння, сприймають маси футерування і оберігають мундштуки від руйнування. Між мундштуками встановлюють також міст з корундової цегли 13 для оберігання мундштуків.

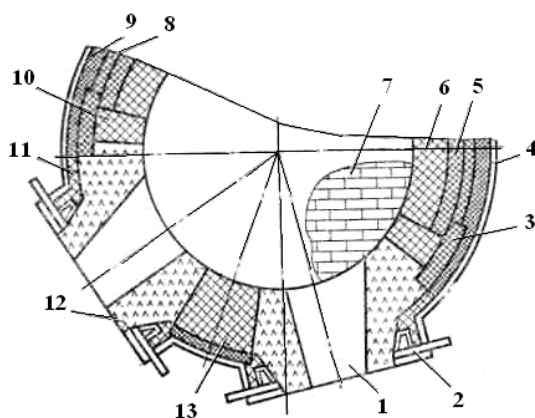


Рисунок 66 – Футерування нижньої частини барабанної індукційної печі

**Стіни** печі викладають із цегли на плашку. Стіни роблять багат шаровими; внутрішній шар – вогнетривкий, а зовнішній – теплоізоляційний. Проміжні шари складаються з легкового вогнеупору або вогнетривкої цегли низьких сортів. У стінах печей є отвори: робочі та оглядові вікна, отвори для пальників і форсунок тощо. Ці отвори не повинні послаблювати кладку. Для цього навколо отворів ізоляційну цеглу не викладають, а напускають до кожуха вогнетривку цеглу. Вікна перекривають арками або спеціальними плитами. Із зовнішнього боку робочі вікна армують рамами (у плавильних печах водоохолоджуваними). Стіни нагрівальних печей роблять вертикальними, а плавильних – похилими до зовнішньої сторони з метою збі-

льшення їх стійкості. Під час кладки стін печей, так само як і під час кладки поду, вертикальні шви перев'язують.

**Склепіння** печей виконують у вигляді арок і плоских перекриттів. Плоскі склепіння роблять підвісними. Склепіння широких печей роблять плоскопідвісними. Арочні склепіння набирають з прямих і клинової цегли, а плоскі – із спеціальної цегли, яку можна підвішувати. Арочні склепіння спираються на п'яткову цеглу, укладену на підп'яткову балку, що сприймає зусилля розпору і передає це зусилля на каркас.

На деяких печах встановлюють знімні склепіння (наприклад, на дугових печах); такі склепіння спираються на металеву раму. Склепіння високотемпературних печей кладуть досуха, і після закінчення кладки шви ущільнюють, підсипаючи порошок, виготовлений зі склепінного матеріалу.

Температурні шви передбачають для компенсації розширення кладки під час нагрівання. При проектуванні футерування печей для різного матеріалу кладки на 1 м кладки залежно від властивостей вогнетривких матеріалів беруть таку товщину температурних швів (мм): шамотної 5-6, динасової 12-16, магнезитохромітової і хромомагнезитової 14-18 і так далі. При багатошаровому футеруванні температурні шви розміщують врозбіг за товщиною кладки. По висоті стіни (по вертикалі) температурні шви можуть бути безперервні і врозбіг.

## РОЗДІЛ 16

### УТИЛІЗАЦІЯ ТЕПЛОТИ ПРОДУКТІВ ГОРІННЯ

#### 16.1. Попереднє підігрівання металу

Під час спалювання в печі твердого, рідкого або газо-подібного палива велика кількість теплоти втрачається з продуктами горіння. Кількість теплоти, що втрачається з продуктами горіння при повному горінні палива (кВт)

$$Q_{п.г} = c_{п.г} t_{п.г} V_{п.г}$$

де  $c_{п.г}$  – питома теплоємність продуктів горіння, кДж/(м<sup>3</sup>·К);  $t_{п.г}$  – температура продуктів горіння, °С;  $V_{п.г}$  – об'єм продуктів горіння, м<sup>3</sup>/с.

З цієї залежності видно, що знизити втрати теплоти з продуктами горіння можна зменшенням їх об'єму і зниженням температури. Об'єм продуктів горіння можна зменшити під час горіння палива з мінімально допустимим надлишком повітря і скороченням надлишкової кількості повітря, що підсмоктується в робочий простір печі через різну нещільність (завантажувальні і розвантажувальні вікна, пальники). Для зменшення підсмоктування повітря в піч її робочий простір повинен знаходитися під невеликим тиском.

Температуру продуктів горіння можна знизити, використовуючи їх теплоту для попереднього підігрівання металу, палива і повітря, що подається для горіння. Попереднє підігрівання металу продуктами горіння проводиться шахтних, багатокамерних та методичних печах. У шахтних печах (наприклад, вагранках) продукти горіння коксу, проходячи через піч, зустрічаються з тими, що опускаються ним назустріч шихтовими матеріалами і підігрівають їх, а самі охолоджуються.

Піч без шахти (рис. 67 а) працює таким чином: через розжарений кокс 1 продувається повітря, і продукти горіння коксу, піднімаючись, проходять через шар шихтових матеріалів висотою  $h_m$ . У міру нагрівання метал розплавляється і стікає в нижню частину печі, звідки видаляється через випускний отвір. За час плавлення шару металу заввишки  $h_m$  рівень коксу в печі знижується на  $\Delta H$  і дорівнює  $H - \Delta H$ . Продукти горіння виходять з печі з високою температурою ( $t_{п.г.} = 1300-1500^\circ\text{C}$ ), оскільки, проходячи через розплавлений метал, нагрітий до  $1200-1250^\circ\text{C}$  (при виплавці чавуну), вони практично не охолоджуються.

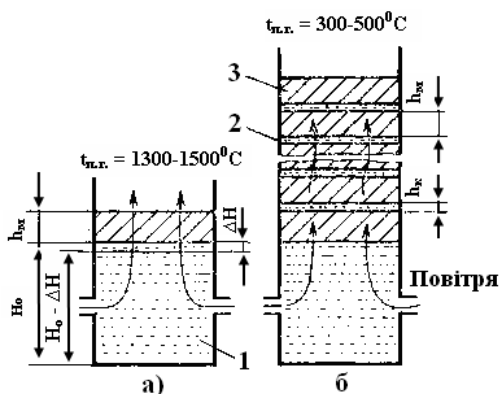


Рисунок 67- Схема роботи плавильної печі

Перед завантаженням чергової порції металу в піч засипають кокс до первинної висоти  $H_0$ . В цьому випадку кожна порція металу плавиться і перегрівається в однакових умовах. Співвідношення між  $h_m$  і  $\Delta H$  визначає питому витрату коксу на плавку. У печі, що має шахту (рис. 67 б), продукти горіння під час руху вгору проходять послідовно через декілька шарів шихтових матеріалів, що розплавляються, 3 і коксу 2. У вагранках може бути до десяти шарів шихтових матеріалів. Продукти горіння в шахтній печі,

піднімаючись, зустрічають на своєму шляху все більш холодні шари шихтових матеріалів і віддають їм теплоту. У шахтних печах температура газів може бути знижена до 300-500°C. Втрати теплоти з газами, що відходять, в шахтній печі значно менші, ніж у печі без шахти. Для розплавлення однієї і тієї самої кількості металу витрата коксу в шахтній печі менша, тобто  $h_k < \Delta H$ .

У багатокамерних печах продукти горіння, що утворюються під час горіння палива, проходять послідовно через дві або три камери, з'єднані між собою димарями. Метал, що нагрівається, завантажують спочатку в камеру з найбільш низькою температурою і після необхідної витримки переносять в камеру з вищою температурою. Такий спосіб нагрівання дає можливість більш повно використовувати теплоту продуктів горіння (рис. 68).

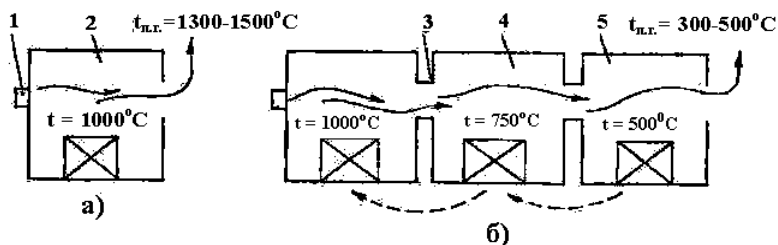


Рисунок 68 – Схеми однокамерної (а) і трикамерної (б) печей

В однокамерній печі (рис. 68 а) горіння палива проводиться за допомогою пальника 1, і продукти горіння, що утворюються, потрапляючи в робочий простір печі 2, розігрівають його до необхідної температури (наприклад, 1000°C). Температура продуктів горіння, що виходять з печі, на 50-100°C вища за температуру робочого простору печі, і тому в однокамерній печі  $t_{п.г.} = 1050-1100^\circ\text{C}$ .

При використанні трикамерної печі (рис. 68 б) продукти горіння з робочого простору печі з температурою



1000°C потрапляють по каналу 3 в проміжну камеру 4, розігрівають її до температури приблизно 750°C і потім ідуть по каналу 3 в камеру 5 попереднього нагрівання. Метал, що нагрівається, спочатку завантажують у камеру 5, потім переносять у камеру 4 і з неї в робочий простір печі. У трикамерній печі досягається значне зниження витрати палива на нагрівання.

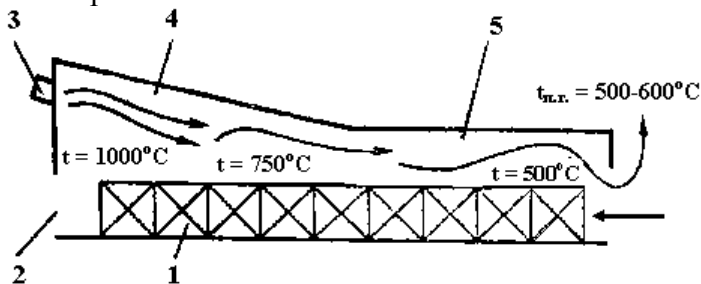


Рисунок 69 - Схема методичної печі

У методичних печах теплота продуктів горіння використовується для попереднього нагрівання металу, причому продукти горіння і метал, що нагрівається, рухаються назустріч один одному. У методичній печі досягається не лише використання теплоти газів, але і механізована передача металу, що нагрівається, в печі. На рис. 69 показана схема методичної печі, що включає камеру нагрівання 4 і камеру підігрівання 5. Паливо згорає за допомогою пальника 3. Продукти горіння спочатку обігрівають камеру 4 і потім надходять у камеру 5. Метал, що нагрівається, 1 потрапляє в камеру 5 і механізмом передається в камеру 4, що має розвантажувальне вікно 2. Переміщаючись по печі, метал стикається зі все більш гарячими газами і поступово нагрівається до необхідної температури, а продукти горіння в процесі переміщення поступово охолоджуються, чим досягається повніше використання теплоти.

При використанні теплоти продуктів горіння для підігрівання повітря поліпшується не лише ефективність спа-

лювання палива, але й умови його горіння. З'являється можливість отримати в печі вищу температуру, що особливо важливо при застосуванні палива з низькою калориметричною температурою горіння.

Повітря підігрівається продуктами горіння в рекуператорах і регенераторах.

## 16.2. Рекуператори

Рекуператором називають теплообмінний апарат, призначений для передачі теплоти від одного газу до іншого через роздільну стінку при стаціонарному тепловому режимі. З погляду взаємного руху газів у рекуператорі (надалі один газ називатимемо повітрям, а інший – продуктами горіння) можливі три основні схеми: прямотечія, коли повітря і продукти горіння переміщуються в одному напрямі; протитечія, коли повітря і продукти горіння переміщуються в протилежному напрямі, і перехресний струм, коли повітря і продукти горіння переміщуються один щодо одного під кутом  $90^\circ$ .

На рис. 70 показана зміна температури повітря, продуктів горіння і стінки, що розділяє їх, по довжині  $L$  рекуператора. При прямотечії повітря ніколи не може бути нагріте вище за кінцеву температуру продуктів горіння. При протитечії повітря може бути нагріте вище за кінцеву температуру продуктів горіння.

При протитечії можна отримати вищий ККД рекуператора. Стінка рекуператора знаходиться в найбільш важких умовах при протитечії і в найбільш сприятливих при прямотечії. Залежно від умов роботи рекуператора і наявних матеріалів для виготовлення рекуператора обирають ту або іншу схему.

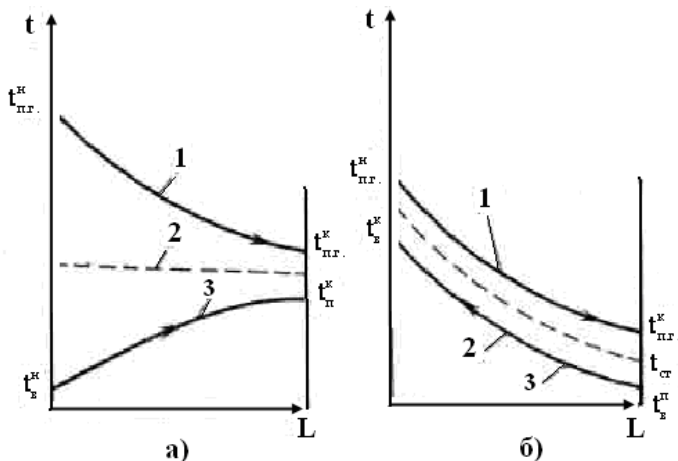


Рисунок 70 – Зміна температури повітря, продуктів горіння і стінки, що розділяє їх, в рекуператорі: а – протитечія; б – протитечія; 1 — продукти горіння; 2 – стінка; 3 – повітря;  $t_{в.}^н$ ,  $t_{в.}^к$  – температура повітря на початку і в кінці рекуператора;  $t_{п.г.}^н$ ,  $t_{п.г.}^к$  – температура продуктів горіння на початку і в кінці рекуператора;  $t_{ст.}^н$  – температура стінки рекуператора

**Тепловий розрахунок рекуператора.** Розрахунок будують на основі розрахунку теплопередачі між продуктами горіння і повітрям. Кількість переданої теплоти від продуктів горіння до повітря в Дж за 1 с

$$Q = kF\Delta t_{\text{сеп}},$$

де  $k$  – коефіцієнт теплопередачі рекуператора,  $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ ;  $F$  – поверхня нагрівання рекуператора,  $\text{м}^2$ ;  $\Delta t_{\text{сеп}}$  – середня логарифмічна різниця температур між продуктами горіння і повітрям у рекуператорі,  $^{\circ}\text{C}$ .

З цього рівняння можуть бути отримані два рівняння для визначення необхідної поверхні рекуператора в  $\text{м}^2$  (що зазвичай і потрібно при розрахунку рекуператора) або коефіцієнта теплопередачі у  $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ :

$$F = Q/k\Delta t_{\text{сеп}}; \quad k = Q/F\Delta t_{\text{сеп}}.$$

При розрахунку рекуператора найбільш складне і трудомістке завдання – визначення коефіцієнта теплопередачі  $k$ .

Теплопередача в рекуператорі визначається трьома процесами: теплопередачею від продуктів горіння до стінки рекуператора; теплопередачею через стінку рекуператора; теплопередачею від стінки до повітря.

Теплопередача від продуктів горіння проходить випромінюванням і конвекцією. Оскільки інтенсивність теплопередачі характеризується коефіцієнтом тепловіддачі, то

$$\alpha_{п.г} = \alpha_{п.г.к} + \alpha_{п.г.випром},$$

де  $\alpha_{п.г}$  – коефіцієнт тепловіддачі від продуктів горіння до стінки рекуператора, Вт/(м<sup>2</sup>·К);  $\alpha_{п.г.к}$  – коефіцієнт тепловіддачі від продуктів горіння до стінки конвекцією і теплопровідністю, Вт/(м<sup>2</sup>·К);  $\alpha_{п.г.випром}$  – коефіцієнт тепловіддачі від продуктів горіння до стінки випромінюванням, Вт/(м<sup>2</sup>·К).

Теплопередача через стінку відбувається тільки за рахунок теплопровідності і залежить від теплового опору стінки

$$R = S/\lambda,$$

де  $S$  – товщина стінки, м.

Теплопередача від стінки до повітря відбувається тільки за рахунок конвекції і теплопровідності, тому  $\alpha_{п} = \alpha_{п.к}$ .

Коефіцієнт теплопередачі

$$k = 1/(1/\alpha_{п.г} + S/\lambda + \alpha_{п}).$$

Для металевих рекуператорів відношення  $S/\lambda$  незначне, і ним можна нехтувати; тоді

$$k = \alpha_{п}\alpha_{п.г}/(\alpha_{п} + \alpha_{п.г}).$$

Поверхню нагрівання  $F$  рекуператора найбільш правильно визначати по лінії, що проходить через середину товщини роздільної стінки.

Середня логарифмічна різниця температур визначається за формулою

$$\Delta t_{\text{сер}} = (\Delta t^n - \Delta t^k) / \ln(\Delta t^n / \Delta t^k),$$

де  $\Delta t^n$  і  $\Delta t^k$  – різниця температур продуктів горіння і повітря на початку і в кінці рекуператора.

При прямотечії

$$\Delta t_n = t_{n,r}^n - t_n^n; \quad \Delta t_k = t_{n,r}^k - t_n^k.$$

При протитечії

$$\Delta t_n = t_{n,r}^n - t_n^k; \quad \Delta t_k = t_{n,r}^k - t_n^n.$$

Необхідно зазначити, що схему руху розглядають по ходу продуктів горіння.

Теплота, необхідна для нагрівання повітря:

$$Q_n = c_n (t_n^n - t_n^k) V_n,$$

де  $V_n$  – об'єм повітря, що нагрівається в рекуператорі,  $\text{м}^3/\text{с}$ ;  $c_n$  – питома теплоємність повітря при температурі  $t_n^k$ ,  $\text{кДж}/(\text{м}^3 \cdot \text{К})$ .

Об'єм повітря визначають при розрахунку горіння палива в печі. З урахуванням втрат повітря через нещільність у трубопроводі та арматурі на шляху від рекуператора до печі розрахунковий об'єм повітря необхідно збільшити на 10-15 %, тобто  $V_n = (1,1 - 1,15) V_{\text{розрах.}}$

Щоб правильно вибрати матеріал для виготовлення рекуператора і тим самим забезпечити надійну роботу установки, необхідно визначити максимальну температуру стінки в місцях можливого перегріву. Для металевих рекуператорів, у яких можна нехтувати тепловим опором стінки

$$t_{\text{ст}} = t_n + (t_{n,r} - t_n) / (1 + \alpha_n / \alpha_{n,r}),$$

де  $t_{\text{ст}}$ ,  $t_n$ ,  $t_{n,r}$  – температура стінки, повітря і продуктів горіння для ділянки, що розраховується,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $\alpha_{n,r}$ ,  $\alpha_n$  – коефіцієнти тепловіддачі від продуктів горіння до стінки і від стінки до повітря для ділянки, що розраховується,  $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ .

**Аеродинамічний розрахунок рекуператора.** Установка на печі рекуператора змінює аеродинамічну характеристику повітровідвідної системи і системи видалення продуктів горіння. Для правильного вибору вентилятора для подачі в піч повітря з необхідними параметрами (кількість і тиск) і димососа для видалення продуктів горіння визначають опір в рекуператорі по повітряному і газовому трактах.

Загальний опір тракту (Па)

$$P_{\text{пот}} = \sum P_{\text{тр}} + \sum P_{\text{мс}} + \sum P_{\text{геом}}$$

де  $\sum P_{\text{тр}}$  – сумарні втрати тиску в результаті опору тертя, Па;  $\sum P_{\text{мс}}$  – сумарні втрати тиску в результаті місцевих опорів, Па.

**Конструкції рекуператорів.** Рекуператори виготовляють з металу або керамічних матеріалів. Керамічні рекуператори мають низький коефіцієнт теплопередачі [3-5 Вт/(м·К)], громіздкі і негазощільні. Металеві рекуператори забезпечують кращу теплопередачу в порівнянні з керамічними. Коефіцієнт теплопередачі металевого рекуператора 10-30 Вт/(м·К). Металеві рекуператори виготовляють з чавуну і вуглецевої сталі при підігріванні повітря до температури 300°C і жароміцних сталей і сплавів – при підігріванні до температури 700°C.

На рис. 71 показаний щілинний радіаційний рекуператор однобічного нагрівання, встановлений на вертикальному димарі. Рекуператор працює за схемою проточечі й складається з двох циліндрів (зовнішнього 3 і внутрішнього 2), виготовлених з листової сталі. У нижній частині рекуператора розміщений колектор 1, в який надходить холодне повітря. З нього повітря переміщається в кільцеву щілину 5, де нагрівається до необхідної температури. Гаряче повітря потім надходить у верхній колектор 4 і з нього в трубопроводі, що сполучає рекуператор з піччю.

Продукти горіння в рекуператорі рухаються з невеликою швидкістю так, що теплота від продуктів горіння пе-

редається до стінки, в основному за рахунок випромінювання (радіації). Рекуператори такого типу застосовують при температурі продуктів горіння 1000-1500°C, тобто коли гази інтенсивно випромінюють теплоту. Температура підігрівання повітря 600-700°C.

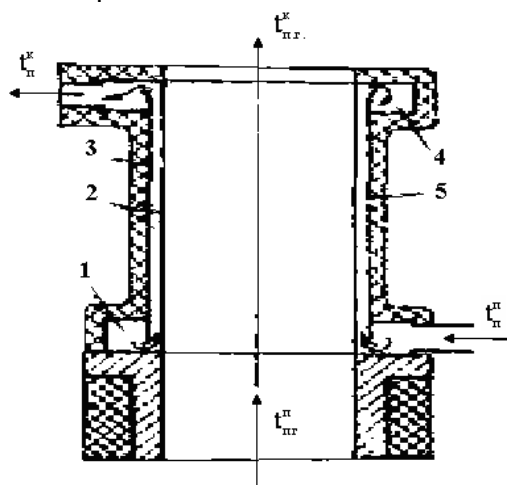


Рисунок 71 - Схема щілинного радіаційного рекуператора

У подібних рекуператорах у теплопередачі беруть участь і внутрішній, і зовнішній циліндри, що необхідно враховувати при визначенні поверхні рекуператора.

На рис. 72 подана схема теплопередачі в щілинному рекуператорі з однобічним обігріванням. Кількість теплоти, яка передається від продуктів горіння до внутрішнього циліндра, позначена  $Q_1$ . Частина цієї теплоти  $Q_3$  передається конвекцією повітрю, що проходить через щілинний простір рекуператора, а решта  $Q_2$  випромінюється на зовнішній циліндр. Температура зовнішнього циліндра, який має хорошу зовнішню теплову ізоляцію, як правило, достатньо висока, і дотичне з нею повітря нагрівається, відбираючи теплоту конвекцією ( $Q_4$ ). Теплові втрати через ізоляційний шар у навколишній простір  $Q_5$ .

Є різні конструкції рекуператорів, виготовлених з гладких сталевих труб: у одних повітря рухається в трубах, а продукти горіння омивають зовнішню поверхню труб, в інших навпаки. На рис. 73 показана схема рекуператора, в трубах якого рухаються продукти горіння, а між трубами – повітря. Рекуператор має по повітряному шляху чотири ходи і працює за схемою перехресної протитечії.

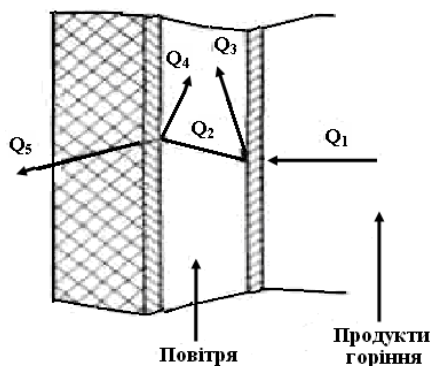


Рисунок 72 - Схема теплопередачі в щільному радіаційному рекуператорі

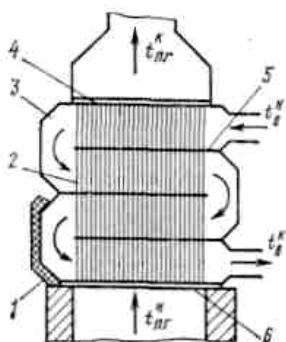


Рисунок 73 - Схема рекуператора з гладких сталевих труб



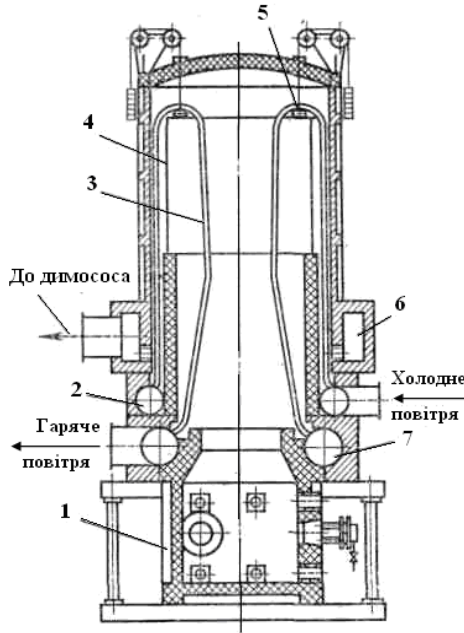


Рисунок 74 – Повітропідігрівник для вагранкового дуття

Труби 2 розміщені вертикально, їх кінці приварені до трубних листів 4 і 6. На однаковій відстані по висоті рекуператора розміщено три листи 5, призначені для розділення потоку повітря. Число ходів у рекуператорі має бути парним, чим забезпечується рівномірне подовження труб у пучку при нагріванні. Передається повітря з одного ходу в інший по повітряних коробках 3. Труби в пучку можуть мати коридорне або шахове розташування.

Подана конструкція рекуператора за необхідності дозволяє проводити очищення внутрішньої поверхні труб від пилу та інших відкладень, що вносяться до рекуператора продуктами горіння. Для зменшення втрат теплоти рекуператором у навколишній простір його зовнішня поверхня покрита шаром ) з теплоізоляційного матеріалу.

Термін служби рекуператорів такого типу значною мірою залежить від того, як компенсується температурне подовження окремих труб. Якщо окремі труби подовжуються на різну величину, то в трубних листах створюється напруження, що перевищує міцність зварних швів, і герметичність рекуператора порушується. У деяких конструкціях ця проблема вирішується установкою на кожній трубі індивідуального компенсатора у вигляді сальника або поршневого кільця.

На рис. 74 показаний повітропідігрівник для вагранки, що обігривається продуктами горіння природного газу. Рекуператор працює за схемою протитечії. Повітря рухається по гладких сталевих трубах 3 (з хромонікелевої сталі) від колектора 2 холодне повітря в колектор 7 гарячого повітря. Гарячі гази з топки 1, піднімаючись, обігривають труби. Пройшовши роздільну стінку 4, гарячі гази повертаються, прямуючи до колектора 6, звідки відсмоктуються димососом. При нагріванні повітропідігрівника труби подовжуються і зволікаються вгору коромислом 5. У повітропідігрівнику теплопередавальні труби розміщені по колу. Теплопередавальна поверхня труб  $200 \text{ м}^2$ , кількість повітря  $12000 \text{ м}^3/\text{год}$ , що нагрівається, температура повітря після підігрівання  $400^\circ\text{C}$ .

## РОЗДІЛ 17

# КЛАСИФІКАЦІЯ І ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА ТЕПЛОВОЇ РОБОТИ ПЕЧЕЙ

### 17.1. Класифікація печей

Різноманітність промислових печей, використовуваних у ливарному виробництві, викликає необхідність розподілу їх на основні групи.

Головними етапами отримання готових виробів у ливарному виробництві є розплавлення металу і його розливання по формах і потім у ряді випадків термічна обробка виливків. Для отримання високоякісних ливарних форм їх обов'язково сушать. Виходячи з цього, розрізняють печі для отримання розплавленого металу (плавильні), нагрівання виливків з метою їх подальшої термічної обробки (термічні) і сушіння ливарних форм (сушарки). У всіх цих печах проходять процеси перетворення якого-небудь виду енергії в теплову і потім передача цієї теплоти до того, що розплавляється, нагрівається або матеріалу, що сушиться.

За способом генерації теплоти всі печі підрозділяють на паливі, де теплота виділяється за рахунок горіння палива, і електричні, де електроенергія перетворюється в теплоту електричною дугою, нагрівальними елементами опору або індукцією.

За умовами теплопередачі печі розподіляють на печі з теплопередачею переважно випромінюванням і конвекцією. До перших відносять високотемпературні печі, в яких частка конвекції невелика. До печей переважно з теплопередачею конвекцією в робочому просторі відносять в основному низькотемпературні печі, в яких випромінювання не відіграє істотної ролі.

Робота печей характеризується тепловою потужністю, тепловим навантаженням, температурним і тепловим режимами.

Теплова потужність виражається в кВт; це найбільша кількість теплоти, яку можна подати в піч. Теплове навантаження – це кількість теплоти, яка фактично подається в піч. Температурний режим – це зміна температури печі в часі. Тепловий режим – це зміна теплового навантаження в часі.

За тепловим режимом печі розподіляють на печі, що працюють за камерним режимом, і печі, що працюють за методичним режимом. У печах, що працюють за камерним режимом, температура робочого простору залишається сталою протягом усього часу роботи печі. У печах, що працюють за методичним режимом, температура в печі змінюється по довжині печі або в часі. Основні характеристики роботи печі – її коефіцієнт корисної дії (ККД), коефіцієнт використання палива (КВП), а також продуктивність.

ККД – це відношення корисно витраченої теплоти до повної кількості теплоти, поданої в піч (включаючи теплоту з підігрітим повітрям і т. д.). КВП – це відношення корисно витраченої теплоти до кількості теплоти, що виділяється паливом під час його горіння.

Продуктивність печі – це кількість виплавленого металу для плавильної печі, перегрітого металу для міксерів і роздавальних печей, обробленого металу для термічних печей і висушеного матеріалу для сушарок за одиницю часу або цикл.

Продуктивність печі пов'язана з тепловою її роботою: чим більша різниця температур між піччю і металом, тим швидше нагрівається метал. Продуктивність печі залежить від її габаритних розмірів і часу технологічного процесу. У нагрівальних печах, в яких метал необхідно нагрівати ли-

ше до заданої температури, продуктивність завжди вища, ніж у печах, в яких після нагрівання потрібна певна витримка металу.

## 17.2. Теплова робота печей

Тепловий баланс печей важлива характеристика їх теплової роботи. Тепловий баланс виражається законом збереження енергії стосовно промислової печі; він дозволяє знайти необхідну витрату палива, електроенергії і провести теплотехнічний аналіз роботи печі. Тепловий баланс складається з двох частин: надходження і витрати теплоти. Його складають або на одиницю часу, що дорівнює секундні (печі безперервної дії), або на період (печі періодичної дії).

Розглянемо тепловий баланс полуменевої печі безперервної дії. Надходження складається з таких етапів.

1 Хімічна теплота згоряння палива (Вт)

$$Q_{\text{хім}} = Q_{\text{н}} B,$$

де  $Q_{\text{н}}$  – нижча теплота згоряння палива, Дж/кг або Дж/м<sup>3</sup>;  
 $B$  – витрата палива, кг/с або м<sup>3</sup>/с.

2 Фізична теплота, що вноситься підігрітим повітрям (Вт):

$$Q_{\text{фіз.п}} = c_{\text{п}} t_{\text{п}} L_{\text{п}} B,$$

де  $c_{\text{п}}$  – середня питома теплоємність повітря, Дж/(м<sup>3</sup>·К) при  $t_{\text{п}}$ ;  $t_{\text{п}}$  – температура повітря, °С;  $L_{\text{п}}$  – кількість повітря, необхідна для горіння палива, м<sup>3</sup>/кг або м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>.

3 Фізична теплота, що вноситься підігрітим паливом (Вт):

$$Q_{\text{фіз.п}} = c_{\text{т}} t_{\text{т}} B,$$

де  $c_{\text{т}}$  – середня питома теплоємність палива при  $t_{\text{т}}$ , (Дж/(м<sup>3</sup>·К) або Дж/(кг·К));  $t_{\text{т}}$  – температура палива, °С.

#### 4 Хімічна теплота окиснення металу (Вт)

$$Q_{\text{хім..м}} = \sum q_{\text{м}} m_{\text{м}},$$

де  $\Sigma$  – знак, що вказує на необхідність обліку всіх окиснених елементів металу;  $q_{\text{м}}$  – тепловий ефект окиснення кожного елемента металу, кДж/кг;  $m_{\text{м}}$  – кількість кожного окисненого елемента металу, кг/с.

Витратна частина складається з таких етапів.

1 Теплота, необхідна для нагрівання і плавлення матеріалів (корисна теплота) (Вт):

$$Q_{\text{кор}} = c_{\text{м}} (t_{\text{м}}^{\text{к}} - t_{\text{м}}^{\text{п}}) \Pi,$$

де  $c_{\text{м}}$  – середня питома теплоємність матеріалу в інтервалі  $t_{\text{м}}^{\text{к}} - t_{\text{м}}^{\text{п}}$  Дж/(кг·К);  $t_{\text{м}}^{\text{к}}$ ,  $t_{\text{м}}^{\text{п}}$  – середні за масою кінцева і початкова температури матеріалу, °С;  $\Pi$  – продуктивність печі, кг/с.

2 Теплота, що виноситься шлаками (Вт):

$$Q_{\text{шл}} = c_{\text{шл}} t_{\text{шл}} m_{\text{шл}},$$

де  $c_{\text{шл}}$  – питома теплоємність шлаку при  $t_{\text{шл}}$ , Дж/(кг·К);  $t_{\text{шл}}$  – температура шлаку, °С;  $m_{\text{шл}}$  — кількість шлаку, кг/с.

3 Теплота, що витрачається на розкладання вапняку (Вт):

$$Q_{\text{із}} = 1620 m_{\text{вапн}},$$

де  $m_{\text{вапн}}$  – кількість розкладеного вапняку, кг/с.

4 Фізична теплота продуктів горіння палива (Вт):

$$Q_{\text{п.г}} = c_{\text{п.г}} t_{\text{п.г}} V_{\text{п.г}}^{\text{пит}} B,$$

де  $c_{п.г}$  – питома теплоємність продуктів горіння при  $t_{п.г}$ ; Дж/(м<sup>3</sup>·К);  $t_{п.г}$  – температура продуктів горіння, °С;  $V_{п.г}^{пит}$  – кількість продуктів горіння, що утворюються при спалюванні одиниці палива, м<sup>3</sup>/кг або м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>.

5 Хімічна теплота продуктів горіння палива (Вт):

$$Q_{хім.г} = (127CO + 108H_2)V_{п.г} B,$$

де CO, H<sub>2</sub> – вміст окислу вуглецю і водню в продуктах горіння.

6 Втрати теплоти теплопровідністю через кладку, Вт

$$Q_{кл} = kF_{кл} (t_{пч} - t_{п}),$$

де  $k$  – коефіцієнт теплопередачі від пічного простору в навколишнє повітря через стінку, Вт/(м<sup>2</sup>·К);  $F_{кл}$  – поверхня кладки, м<sup>2</sup>;  $t_{п}$  – температура навколишнього повітря, °С.

7 Втрати теплоти випромінюванням через відчинені вікна й отвори (Вт)

$$Q_{випром} = C_0 (T_{пч} / 100)^4 F_{відч.в} \Phi \tau,$$

де  $F_{відч.в}$  – площа відчиненого вікна, м<sup>2</sup>;  $\Phi$  – коефіцієнт діафрагмування, залежний від товщини стенів і конфігурації вікна (0,5-0,8);  $\tau$  – частка часу, протягом якого відчинене вікно (при постійно відчиненому вікні  $\tau = 1$ ).

8 Теплота, що витрачається на нагрівання транспортувальних пристроїв (Вт):

$$Q_{тр} = c_{трл} (t_{тр}^к - t_{тр}^н) T_{тр},$$

де  $c_{\text{тр}}$  – середня питома теплоємність транспортувальних пристроїв в інтервалі температур  $t_{\text{тр}}^{\text{к}} - t_{\text{тр}}^{\text{н}}$ , Дж/(кг·К);  $t_{\text{тр}}^{\text{к}}$ ,  $t_{\text{тр}}^{\text{н}}$  – кінцева і початкова температури транспортувальних пристроїв, °С;  $m_{\text{тр}}$  – маса транспортувальних пристроїв, що проходять через пічний простір за одиницю часу, кг/с.

9 Втрати теплоти з охолоджувальною водою (Вт)  $t_{\text{тр}}^{\text{н}}$

$$Q_{\text{вод}} = c_{\text{вод}} (t_{\text{вод}}^{\text{к}} - t_{\text{вод}}^{\text{н}}) m_{\text{вод}},$$

де  $c_{\text{вод}}$  – питома теплоємність води в інтервалі температур  $t_{\text{вод}}^{\text{к}} - t_{\text{вод}}^{\text{н}}$  Дж/(кг·К);  $t_{\text{вод}}^{\text{к}}$ ,  $t_{\text{вод}}^{\text{н}}$  – кінцева і початкова температура води, °С;  $\tau_{\text{вод}}$  – витрата охолоджувальної води, кг/с.

10 Втрати теплоти на нагрівання контрольованої атмосфери (Вт)

$$Q_{\text{а}} = c_{\text{а}} (t_{\text{піч}} - t_{\text{а}}) V_{\text{а}},$$

де  $c_{\text{а}}$  – питома теплоємність контрольованої атмосфери в інтервалі температур  $(t_{\text{піч}} - t_{\text{а}})$ , Дж/(м<sup>3</sup>·К);  $t_{\text{а}}$  – температура контрольованої атмосфери перед піччю °С;  $V_{\text{а}}$  – витрата контрольованої атмосфери, м<sup>3</sup>/с.

11 Невраховані втрати. Їх, як правило, беруть 10–15 % від суми всіх втрат теплоти, за винятком корисної витраченої:  $Q_{\text{неврах}} = 0,1 - 0,15(Q_{\text{витр}} - Q_{\text{корисн}})$ .

Для електричної печі замість теплоти, що вноситься паливом і повітрям, враховують теплоту, що подається з електромережі, і не враховують витрату теплоти з продуктами горіння палива.



## ТЕСТОВИЙ КОНТРОЛЬ ЗАСВОЄННЯ ЛЕКЦІЙНОГО МАТЕРІАЛУ

Контроль складається з 60 питань з курсу, що мають чотири відповіді, одна з яких правильна.

Оцінка ступеня засвоєння матеріалу здійснюється за програмою ПЕОМ на кафедрі ПМ і ТКМ СумДУ.

### Контрольні запитання тестового контролю до СРС

Кожне запитання тестового контролю має чотири варіанти відповідей. Загальна кількість набраних балів і підсумкова оцінка відповіді здійснюються за програмою «Test-отс» в комп'ютерному класі кафедри ПМ і ТКМ СумДУ.

1. Що таке паливо?
2. Види палива і його класифікація.
3. Охарактеризуйте групи палива за хімічним складом.
4. Охарактеризуйте процес поведінки палива під час нагрівання без доступу повітря.
5. Охарактеризуйте вищу і нижчу теплоту згоряння.
6. Наведіть формулу теплоти згоряння Д.І.Менделєєва для всіх видів палива.
7. Види твердих палив. Охарактеризуйте їх.
8. Характеристика рідкого палива.
9. Характеристика газоподібного палива.
10. Дайте характеристику гомогенному процесу горіння.
11. Дайте характеристику гетерогенному процесу горіння.
12. На які підрозділи поділяються пальники. Дайте їм характеристику.
13. Типи електропечей. Охарактеризуйте їх.

14. Наведіть формулу для розрахунку електричного опору нагрівальних елементів електропечі.
15. Що таке «електронна гармата» та її елементи?
16. Опишіть закон Гей-Люсака.
17. Сформулюйте рівняння Бернуллі.
18. Наведіть формулу втрати тиску на тертя під час руху газів.
19. Наведіть формулу втрати тиску на місцевий опір під час руху газів.
20. Дайте характеристику вільного струменя газу.
21. Дайте характеристику обмеженого струменя газу.
22. Наведіть схему ежектора з дифузором. Охарактеризуйте його.
23. Наведіть схему руху струменя в камері. Охарактеризуйте його.
24. Охарактеризуйте канальний рух газів у робочому просторі печі.
25. Охарактеризуйте струминний рух газів у робочому просторі печі.
26. Дайте визначення природної тяги.
27. Дайте визначення штучної тяги.
28. Що таке теплова подібність?
29. Наведіть формулу критерію Рейнольдса й охарактеризуйте його.
30. Наведіть формулу критерію Ейлера й охарактеризуйте його.
31. Що таке теплопередача?
32. Тепловий потік теплопередачі визначається формулою...
33. Що називають температурним полем?
34. Дайте визначення ізотермічної поверхні.
35. Наведіть формулу температурного градієнта.
36. Що таке теплопровідність?
37. Дайте визначення конвекції.

38. Що називається тепловим випромінюванням?
39. Наведіть схему теплопередачі у печі.
40. Охарактеризуйте основний закон поширення тепла шляхом теплопровідності.
41. Наведіть формулу зміни температури тіла при не-стаціонарному температурному полі.
42. Охарактеризуйте конвекцію при вільному русі.
43. Критерій Нусельта – це ...
44. Критерій Прандтля – це ...
45. Назвіть основні закони теплового випромінювання.
46. Закон Планка характеризується співвідношенням...
47. Охарактеризуйте закон Віна.
48. Наведіть формулу закону Стефана-Больцмана.
49. Охарактеризуйте закон Кірхгофа.
50. Дайте характеристику закону Ламберта.
51. Перелічіть гази, які є окисниками та відновниками в печах.
52. Наведіть рівняння взаємодії пічних газів з залізом.
53. Принцип роботи ендогазової установки.
54. Принцип роботи екзогазової установки.
55. Наведіть формулу критерію Біо.
56. Дайте характеристику нагрівання тонких тіл.
57. Дайте характеристику нагрівання масивних тіл.
58. Охарактеризуйте поняття «захисні атмосфери».
59. За яким принципом розрізняють тіла, що нагріваються.
60. Основи раціональної технології нагрівання металу полягає в...

# **ЛАБОРАТОРНИЙ ПРАКТИКУМ З ПРЕДМЕТА ТА МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ І ПРИКЛАДИ ВИКОНАННЯ САМОСТІЙНИХ РОБІТ З КУРСУ**

## **Лабораторна робота 1**

«Вивчення особливостей конструкції і визначення втрат  
тепла камерних електричних печей типу  
СНО-8,5.14.5/10»

### **1. МЕТА РОБОТИ**

1.1. Ознайомитися з конструкцією печі  
СНО-8,5.14.5/10.

1.2. Вивчити пристрій і склад футерувальних матеріалів стін і склепіння печі СНО.

1.3. Навчитися проводити розрахунки втрат тепла через футерування стін і склепіння печі.

### **2. УСТАТКУВАННЯ, ПРИЛАДИ І МАТЕРІАЛИ**

2.1. Піч електрична, камерна СНО-8,5.14.5/10.

2.2. Футерувальна діатомітова і шамотна цегла.

2.3. Прилади контролю печі.

### **3. ОСНОВНІ ПОЛОЖЕННЯ**

Камерні електричні печі мають ряд переваг перед паливними: відсутність димових газів; не вимагається поглинальної системи; хороша теплоізоляція; полегшене регулювання температури і сигналізації; кращі можливості застосування контрольованої атмосфери; хороші санітарні умови в цеху.

До недоліків електропечей відносять: тривале нагрівання деталей, на відміну від газових і мазутних печей,

унаслідок передачі тепла головним чином випромінюванням (циркуляція гарячого повітря або газу в печі створює конвективний теплообмін і прискорює нагрівання); необхідність заземлення печей тощо; окислення деталей під час нагрівання, якщо не застосовується контрольована атмосфера; великі витрати під час експлуатації.

На машинобудівних заводах широко використовуються камерні електричні печі.

Існує серія камерних електропечей, що позначаються індексом СНО, з металевими нагрівниками. Ці печі компактні, мають велику продуктивність, невелику витрату електроенергії і великий термін служби металевих нагрівників унаслідок застосування високоякісних вогнетривких і теплоізоляційних матеріалів, рівномірний розподіл тепла по довжині робочого простору.

До недоліків печей серії СНО відносять наявність окислювальної атмосфери в робочому просторі, обмеженість використання контрольованих атмосфер і ручне піднімання та опускання дверей печей (за винятком печі СНО-8,5.17.5/10, де піднімання та опускання дверей проводяться за допомогою електромеханічного приводу).

Розроблений типаж камерних електропечей з металевими і карборундовими нагрівниками. Електропечі випускають заводи електротермічного устаткування. Цей типаж складається з великої кількості печей з різними розмірами робочого простору. В основу розробленого типажу печей покладено: збільшення потужності і продуктивності печей, створення спеціалізованих конструкцій для різних технологічних процесів і деталей, упровадження форсованого нагрівання, зменшення габаритів і ваги печей, підвищення робочих температур, розширене використання контрольованих атмосфер, механізація та автоматизація завантажувальних і розвантажувальних операцій.

Електропечі застосовуються для відпалу, нормалізації та гарту сталевих деталей. Перевагою цих печей є можливість застосування контрольованої атмосфери і механізація завантаження і розвантаження. Контрольована атмосфера вводить через задню торцеву стінку. Крім того, в нижній частині кожуха печі кріпиться трубопровід, що складається з двох ліній: по одній подається газ, по іншій - повітря. Газ і повітря, змішуючись у пальнику і згораючи в камері згорання, створюють полуменеву газову завісу, що перекриває отвір при відчинених дверцях. Цей типаж складається з трьох груп камерних печей з металевими нагрівниками, які підбирають залежно від температур нагрівання (700, 1000 і 1250<sup>0</sup>С). Печі з робочою температурою до 700<sup>0</sup>С призначені для відпуску сталевих деталей, а також для обробки деталей з кольорових металів і сплавів. Печі з температурою до 1000<sup>0</sup>С служать для відпалу, нормалізації та гартування сталевих деталей, а печі з робочою температурою до 1250<sup>0</sup>С призначаються для термічної обробки деталей та інструментів із швидкорізальних та інших високолегованих сталей. Ці печі мають індекс СНЗ. На рис.1 показана піч СНЗ-2,5.5.1,7/10, що виготовляється Чадир-Лунзьким заводом електротермічного устаткування. Ця піч має найменші розміри робочого простору - 500x250x170 мм. Кожух печі герметичний, дротяні зигзагоподібні нагрівники розташовані на поді і бічних стінках робочої камери. У інших печах СНЗ нагрівники укладені додатково на склепінні і дверцях. Пристрій для створення полуменевої завіси змонтований під дверцями. Витрата захисного газу на робочу камеру становить 2,5 м<sup>3</sup>/год і на полуменеву завісу 5 м<sup>3</sup>/год (при безперервному горінні). Споживана потужність печі при садінні 50 кг і нагріванні до 850<sup>0</sup>С становить 12 кВт.

Для вищих температур (до 1350<sup>0</sup>С) використовують карборундові нагрівники.

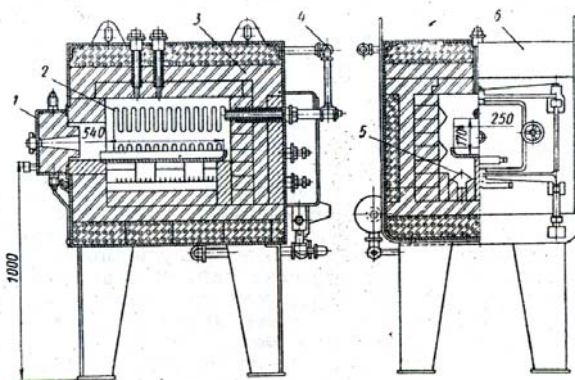


Рисунок 1 - Камерна електрична піч із контрольованою атмосферою СНЗ-2,5.5.1,7/10: 1 - дверці; 2 - бічний нагрівник; 3 - футерівка; 4 - газопровід; 5 - подовий нагрівник; 6 – кожух

Конструкція печі з карборундовими нагрівниками показана на рис.2. По чотири нагрівники у вигляді стрижнів з потовщеними вивідними кінцями поміщають у горизонтальному положенні у склепіння і під подом печі, що складається з карборундових плит. У задній стінці печі є отвір для установки термопари. Ці печі забезпечені трансформаторами з декількома ступенями напруги. У міру збільшення опору карборундових стрижнів (внаслідок старіння) підвищують напругу на затисках трансформатора.

Зараз типаж печей з карборундовими нагрівниками розширений. Розроблено чотири типорозміри зі встановленою потужністю від 10 до 100 кВт. Максимальна робоча температура  $1350^{\circ}\text{C}$ . У нових печах забезпечується висока стійкість нагрівників унаслідок зниження питомої поверхневої потужності. Кожухи печей і виводи виконуються газонепроникними для того, щоб було можна використовувати контрольовану атмосферу. Під час відкриття дверей створюється полуменева завеса.

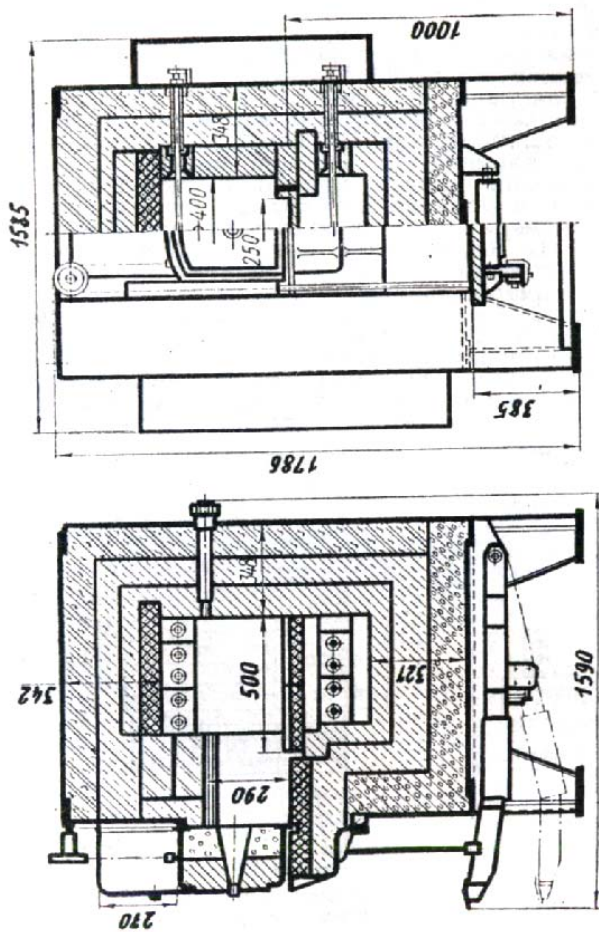


Рисунок 2 – Електропіч із корундовими нагрівниками



Нові печі з карборундовими нагрівниками мають деякі переваги: використовується контрольована атмосфера і деталь під час нагрівання не окислюється, автоматичне регулювання температури не викликає труднощів. До недоліків печей відносять частий вихід з ладу карборундових стрижнів у результаті крихкості, що призводить до поломки, відсутність механізованого завантаження і вивантаження деталей, окислення деталей при виході їх з печі, при перенесенні в гартівний бак.

Печі з карборундовими нагрівниками застосовуються для нагрівання під гарт інструментів із швидкорізальних і хромистих високолегованих сталей.

Як правило, інструменти перед завантаженням у високотемпературну піч підігрівають до  $850^{\circ}\text{C}$  в іншій печі. Для здійснення цих двох операцій в одній печі зручна двокамерна піч, показана на рис.3. Нижня камера служить для підігріву деталей до температури  $850^{\circ}\text{C}$ , верхня – для остаточного нагрівання до температури  $1300^{\circ}\text{C}$ . Обидві камери футеровані вогнетривкою цеглою. Як теплоізоляція нижньої камери використана діатомітова засипка, а верхньої камери – зоноліт. Нагрівники нижньої камери 2 виготовлені із сплаву X20H80 і укладені на бічних стінках печі; у верхній камері встановлюються карборундові нагрівники 3. Нагрівники нижньої камери сполучені безпосередньо з мережею 380 В, а нагрівники верхньої камери під'єднуються через знижувальний трансформатор. Температура регулюється автоматично, для цього в кожній камері встановлені окремі термопари. Розміри підігрівальної камери –  $330 \times 410 \times 180$  мм, потужність – 9 кВт. Розміри камери високого нагрівання –  $250 \times 360 \times 175$  мм, потужність – 9,75 кВт, продуктивність печі – 25-30 кг/год.

У промисловості часто виникає необхідність нагрівати деталі при температурах  $1400-1500^{\circ}\text{C}$  як в окислювальній, так і захисній атмосфері. У цих випадках використовують

електропечі з нагрівниками з дисиліциду молібдену. Найбільш стійкі ці нагрівники в окислювальних середовищах (повітрі, кисні, водяній парі, вуглекислоті). Для таких високих температур потрібні високовогнетривкі матеріали. Для кладки печей у цих випадках застосовують силіманіт, шамот і діатомітову цеглу.

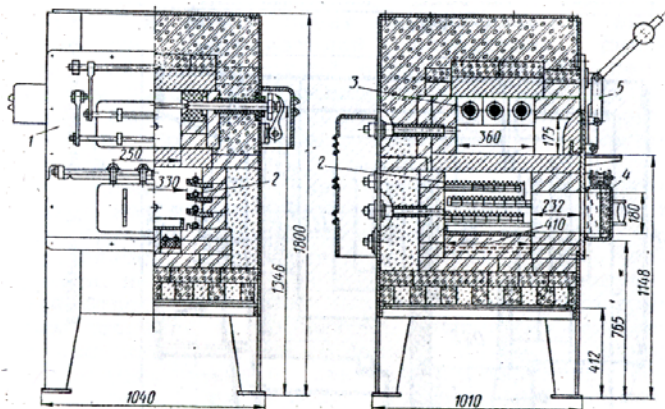


Рисунок 3 - Двокамерна електропеч для обробки швидкорізальної і високохромистої сталі: 1- кожух печі; 2 - нагрівники нижньої камери; 3 - нагрівники верхньої камери; 4 - дверці нижньої камери; 5 - механізм підняття дверця верхньої камери

Камерна електропеч типу СНО-3.4,5.2/16 з нагрівниками з дисиліциду молібдену для обробки різних деталей в окислювальній і захисній атмосферах при температурах 1400-1600<sup>0</sup>С наведена на рис.4. Кожух печі зварний з листової сталі, верхній лист кожуха знімний. Футерування виконане з високоглиноземистої шамотної і легковагої шамотної цегли, а теплоізоляція - з ультралегковагої шамотної цегли. На печі встановлений кінцевий вимикач, який у момент відкриття дверець автоматично вимикає нагрівальні елементи. У печі використовується двопозиційне

регулювання температури за допомогою двох термопар і двох потенціометрів. Термопари встановлені через склепіння печі. Одна з термопар під'єднана до регулювального приладу, а інша - до того, що вимикає. Крім того, проводиться періодичний контроль температури деталей за допомогою радіаційних пірометрів через отвори в бічній стіні печі і дверцях. Ці отвори закриті пробками і відчиняються тільки під час контролю температур. Нагрівальні елементи печі U - подібної форми. Максимальна температура печі –  $1600^{\circ}\text{C}$ , а робоча –  $1500^{\circ}\text{C}$ . Напруга живильної мережі – 380-220 В, а робоча напруга на нагрівачах – 75 В. Їх живлення електроенергією проводиться через знижувальний трансформатор. Розміри робочого простору – 300x450x200 мм, габаритні розміри – 1090x1320x1840 мм. Такі печі виготовляють на Арктиському заводі вакуумних електропечей.

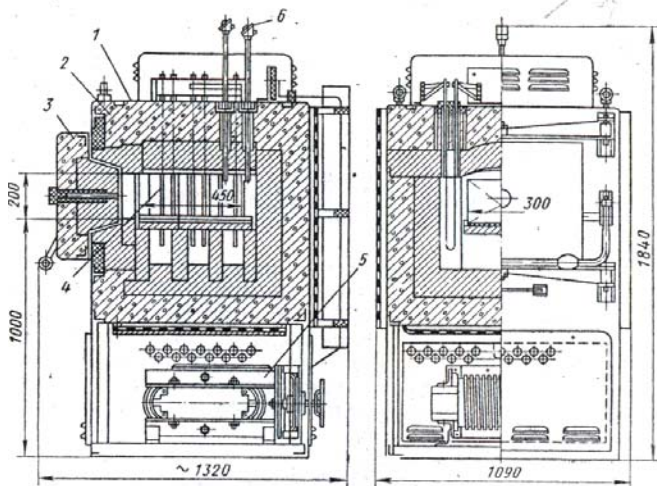


Рисунок 4 - Камерна електропіч типу СНО-3.4,5.2/10 з нагрівниками з дисиліциду молібдену: 1 - кожух; 2 - футерівка; 3 - дверці з механізмами відкриття; 4 - нагрівальні елементи; 5 - трансформатор; 6 - термопара

Камерна електрична піч СНО-8,5.14.5/10 знаходиться у філії кафедри в цеху № 2 Сумського ВАТ СНВО ім. Фрунзе.

Піч, загальний вигляд якої поданий на рис.5, призначена для різних видів термічної обробки деталей та інструментів. Цифрами на рисунку позначені: 1 - механізм піднімання дверець; 2 - нагрівальні елементи; 3 - футерівка; 4 - кожух.

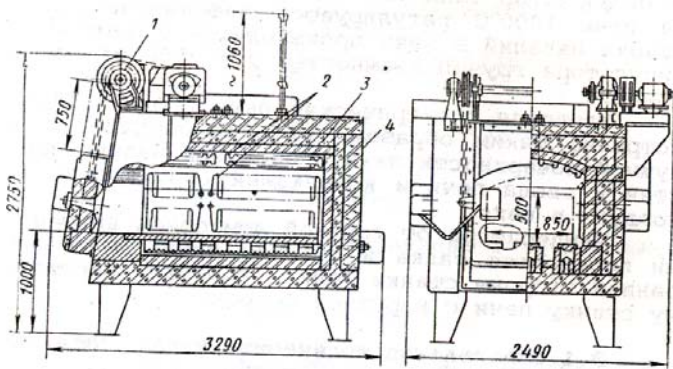


Рисунок 5 - Камерна електрична піч СНО-8,5.14.5/10

Вона має таку технічну характеристику.

Тип печі	Камерна електрична піч опору з окислювальною атмосферою
Максимальна робоча температура, °С	1000
Вид палива	Електроенергія
Розміри робочого простору печі, мм:	
ширина	850
довжина	1400
висота	500
Потужність, кВт	102
Кількість теплових зон	1
Час розігрівання, год.	5
Маса печі, т	8,7

Футерування печі складається з вогнетривкого шару ультралегковагової цегли, шлаку та ізоляції. Нагрівання печі проводиться за допомогою елементів з дроту діаметром 7 мм сплаву марки Х20Н80. Ці елементи розташовані на бічних стінках, склепінні і на поді печі. Живлення елементів здійснюється від трифазної мережі через знижувальний трансформатор типу ТПТ-60ВЧТ. Робоча температура печі  $1000^{\circ}\text{C}$  регулюється автоматично. Завантаження виробів у піч проводиться за допомогою маніпулятора вантажопідйомністю  $Q = 2500$  кг на піддонах.

Камерна електрична піч СНО-8,5.14.5/10 влаштована таким чином, що тепловіддача від зовнішньої поверхні печі відбувається випромінюванням від стін і склепіння печі і конвекцією повітря, що оточує піч в цеху.

Температура від гарячої атмосфери усередині печі передається садці і стінкам печі, а від внутрішньої сторони стінки печі - повітря, що оточує стінку печі із зовнішнього боку.

### **3.1. Визначення кількості тепла, що втрачається піччю**

Сумарний коефіцієнт тепловіддачі на внутрішньому боці печі  $\alpha_1$ , а на зовнішньому  $\alpha_2$ .

Кількість тепла, що передається від атмосфери печі до внутрішньої поверхні стінки або склепіння, буде:

$$q_1 = \alpha_1(t_1 - t_b) \text{ Дж/м}^2\text{с},$$

де  $t_1$  - температура атмосфери печі з внутрішнього боку стінки,  $^{\circ}\text{C}$ ;

$t_b$  - температура внутрішньої поверхні стінки,  $^{\circ}\text{C}$ .

Кількість тепла, що передається теплопровідністю через стінку і склепіння печі:

$$q_2 = \frac{\lambda}{S} (t_b - t_n) \text{ Дж/м}^2\text{с},$$

де  $\lambda$  - коефіцієнт теплопровідності стінки або склепіння (або сумарний) печі;

$t_n$  - температура зовнішньої поверхні стінки печі, °С;

$S$  - товщина стінки або склепіння печі, м.

Кількість тепла, що віддається зовнішньою поверхнею стінки і склепіння печі:

$$q_3 = (2(t_n - t_0)) \text{ Дж/м}^2\text{с,}$$

де  $t_0$  - температура повітря, що оточує стінку із зовнішнього боку, °С.

Загальна кількість тепла, що віддається зовнішньою поверхнею печі, буде дорівнювати

$$q = \frac{1}{1/\alpha_1 + S/\lambda + 1/\alpha_2} (t_1 - t_o) \cdot F \text{ Дж/м}^2\text{с,}$$

або  $q = B \cdot (t_1 - t_o) \cdot F \text{ Дж/м}^2\text{с,}$

де  $B = \frac{1}{1/\alpha_1 + S/\lambda + 1/\alpha_2}$  - коефіцієнт теплопередачі;

$F$  - площа поверхні печі.

### 3.2. Розрахунок втрат тепла склепіння і стінок печі

Шамотне склепіння печі СНО-8,5.14.5/10 має товщину  $S_1 = 0,25$  м. Воно покрите шаром шлаку товщиною  $S_2 = 0,06$  м. Стінки цієї печі складаються з шару шамотної цегли товщиною  $S_3 = 0,15$  м і шару діатомітової цегли марки 600 товщиною  $S_4 = 0,25$  м. Температура атмосфери печі  $t_1 = T_K$ , навколишнього повітря  $t_0 = 20^0\text{С} = 293$  К.

Сумарний коефіцієнт тепловіддачі на внутрішньому боці печі визначається за наближеною формулою

$$\alpha_1 = 0,38 \left( \frac{T}{100} \right)^3 + 41,7 \text{ Дж/м}^2\text{с} \cdot \text{град.}$$

Сумарний коефіцієнт тепловіддачі на зовнішньому боці печі  $\alpha_2$  при температурі в цеху  $20^0\text{С}$  дорівнює [2]:

$$\alpha_2 = 4,08 \text{ Дж/м}^2\text{с} \cdot \text{град.}$$

Середня температура стінок і склепіння печі:

$$t_{cp} = \frac{t_g + t_n}{2}.$$

Залежність коефіцієнта теплопровідності від температури виражається залежністю

$$\lambda_t = \lambda_0 \pm bt_{cp} \text{ Дж/м}\cdot\text{с}\cdot\text{град},$$

де  $\lambda_0$  - коефіцієнт теплопровідності при  $0^0\text{C}$ ;

$b$  - температурна стала, залежна від матеріалу.

Середні значення коефіцієнта теплопровідності [1]:

для шамотної цегли

$$\lambda_1 = 3,0 + 2,1 \cdot 10^{-3} \cdot t_{cp} \text{ Дж/м}\cdot\text{с}\cdot\text{град};$$

для діатомітової цегли

$$\lambda_2 = 0,47 + 0,8 \cdot 10^{-3} \cdot t_{cp} \text{ Дж/м}\cdot\text{с}\cdot\text{град};$$

для шлаку

$$\lambda_3 = 2,9 \text{ Дж/м}\cdot\text{с}\cdot\text{град}.$$

Коефіцієнт теплопередачі  $B$  для склепіння печі

$$B_1 = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{S_1}{\lambda_1} + \frac{S_2}{\lambda_2} + \frac{1}{\alpha_2}}.$$

і, отже, кількість тепла, що віддається  $1 \text{ м}^2$  зовнішньої поверхні склепіння буде дорівнювати

$$q_1 = B_1(t_1 - t_0) \text{ Дж/м}^2 \cdot \text{с}.$$

Коефіцієнт теплопередачі  $B$  для стінок печі

$$B_2 = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{S_3}{\lambda_1} + \frac{S_4}{\lambda_2} + \frac{1}{\alpha_2}},$$

а кількість тепла, що віддається  $1 \text{ м}^2$  зовнішньої поверхні стінок печі, дорівнює

$$q_2 = B_2(t_1 - t_0) \text{ Дж/м}^2 \cdot \text{с}$$

Загальна кількість тепла, що віддається  $1 \text{ м}^2$  зовнішньої поверхні печі, буде дорівнювати

$$Q = q_1 + q_2 \text{ Дж/м}^2 \cdot \text{с}.$$

## 4. ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ РОБОТИ

4.1. Вивчити пристрій печі СНО-8,5.14.5/10 і її конструкційні особливості.

4.2. Вивчити футерувальні матеріали стінок і склепіння печі.

4.3. Вивчити теплофізичні характеристики футерувальних матеріалів, спосіб отримання і сфери застосування.

4.4. Ознайомитися з технічною характеристикою печі, додатковим і допоміжним устаткуванням, що використовується при термообробці.

4.5. Визначити теплофізичні характеристики склепіння печі (п.3.2 даних МВ).

4.6. Визначити теплофізичні характеристики стінок печі (п.3.2 даних МВ).

4.7. Визначити кількість тепла, що віддається 1 м<sup>2</sup> склепіння і стінок печі.

4.8. Визначити загальну кількість тепла, що віддається зовнішньою поверхнею печі.

## 5. ЗМІСТ ЗВІТУ

Звіт повинен містити:

5.1. Мету роботи.

5.2. Короткі теоретичні відомості і технічну характеристику печі СНО-8,5.14.5/10.

5.3. Виконані розрахунки та оцінку отриманих результатів відповідно до п.8 МВ.

5.4. Висновки про виконану роботу.



## 6. ТЕХНІКА БЕЗПЕКИ ПІД ЧАС ВИКОНАННЯ РОБОТИ

Студенти зобов'язані строго виконувати правила техніки безпеки під час роботи з електроустаткуванням, нагрівальними пристроями і печами, підйомно-транспортними механізмами відповідно до проведеного інструктажу.

## 7. КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

1. До якого типу печей належить піч СНО-8,5.14.5/10?
2. Розшифруйте індексацію печі, запропоновану викладачем.
3. Яке устаткування використовується для завантаження і вивантаження деталей у печах типу СНО?
4. Особливості нагрівання садки в печах типу СНО.
5. Нагрівальні елементи печей типу СНО.
6. Перелічіть марки сплавів, використовувани для виготовлення нагрівальних елементів печей типу СНО.
7. Назвіть неметалеві нагрівальні елементи, що застосовуються в печах типу СНО.
8. Дайте визначення критерію БЮ, наведіть формулу для його визначення.
9. «Тонкі» і «масивні» тіла. Особливості їх нагрівання.
10. Наведіть класифікацію вогнетривких матеріалів.
11. Назвіть основні властивості вогнетривких матеріалів.
12. Основні теплоізоляційні матеріали, що застосовуються в техніці пічобудування.

## 8. ЗАВДАННЯ ЗА ВИЗНАЧЕННЯМ ТЕПЛОФІЗИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПЕЧІ

Номер бригади	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Температура газів у печі $t$ , °С	500	600	700	800	900	1000	950	850	750

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Рустем С.Л. Оборудование и проектирование термических цехов. -М.: Машгиз,1962. –С. 103-108.
2. Соколов К.Н. Оборудование термических цехов. - Киев-Донецк: Вища школа, 1984. –С.27-33

**Лабораторна робота 2**  
«Вивчення, аналіз і складання балансу процесу  
горіння в печі ТНО-18.26.13/11»

**1. МЕТА РОБОТИ**

- 1.1. Ознайомитися з конструкцією печі ТНО-18.26.13/11.
- 1.2. Вивчити пристрій пальників печі ТНО-18.26.13/11 і умови спалювання газів у них.
- 1.3. Навчитися проводити аналіз процесу горіння палива в печі і складати його матеріальний баланс.

**2. УСТАТКУВАННЯ, ПРИЛАДИ І МАТЕРІАЛИ**

- 2.1. Піч паливна, камерна ТНО-18.26.13/11.
- 2.2. Прилади контролю.

**3. ОСНОВНІ ПОЛОЖЕННЯ**

Термічна камерна піч періодичної дії ТНО-18.26.13/11 знаходиться у філії кафедри в цеху № 19 Сумського ВАТ СНВО ім. Фрунзе.

Піч, загальний вигляд якої поданий на рисунку 1, призначена для різних видів термічної обробки деталей та інструментів. Вона має таку технічну характеристику.

Тип печі	Термічна камерна з окислювальною атмосферою
Максимальна робоча температура, °С	1100
Вид палива	Газ природний
Розміри робочого простору печі, мм:	
ширина	1900
довжина	2600
висота	1050

Тип печі	Термічна камерна з окислювальною атмосферою
Витрата газу піччю, м <sup>3</sup> /год	60
Кількість пальників, шт.	4
Кількість теплових зон	4
Час розігрівання, год	6
Вага садки, кг	6000
Маса печі, кг	59000

Завантаження виробів у піч проводиться за допомогою маніпулятора вантажопідйомністю  $Q = 2500$  кг на піддонах.

Піч забезпечена полуменевими пальниками ГНП конструкції теплопроекту.

Методика розрахунку горіння палива в печі зводиться до складання матеріального балансу горіння, визначення теплотворної здатності палива і калориметричної температури продуктів горіння.

За реакціями горіння складових палива проводиться розрахунок потрібної теоретичної кількості повітря для спалювання палива, визначається потрібна кількість кисню для спалювання окремих складових палива, а потім за кількістю кисню підраховують теоретичну кількість необхідного повітря. Розрахунок може бути зроблений у вагових або молекулярних кількостях складових палива. Обидва методи розрахунку дають однакові результати.

Потім складається матеріальний баланс горіння, тобто підраховується кількість речовин, що беруть участь у процесі горіння й утворюються в результаті горіння. Отриманий баланс зводиться до таблиці.

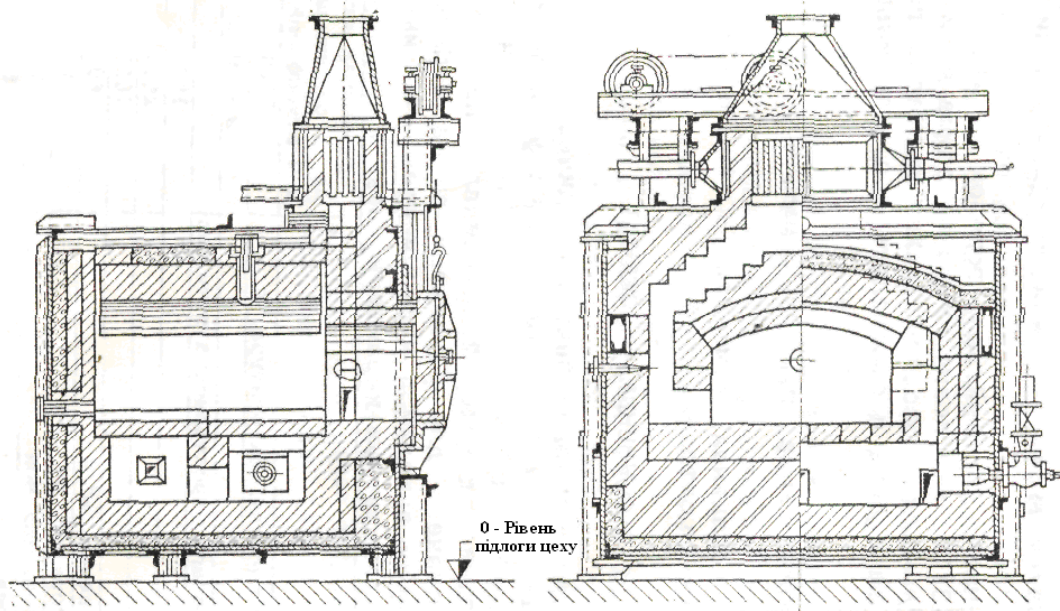


Рисунок 1 – Термічна камерна піч періодичної дії ТНО-18.26.13/11

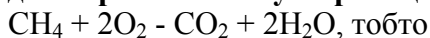
### 3.1. Розрахунок горіння палива печі

У печі ТНО-18.26.13/11 як паливо використовується природний газ. Він має такий хімічний склад: 75%  $\text{CH}_4$ ; 3%  $\text{C}_2\text{H}_6$ ; 1%  $\text{C}_3\text{H}_8$  і 21%  $\text{CO}_2$ .

Значення молярних і об'ємних відсотків для газів однакові. Тому розрахунок горіння природного газу проводиться в молекулярних кількостях.

Для горіння 100 молів ( $\text{м}^3$ ) газу кількість потрібного кисню ( $\text{O}_2$ ) становить:

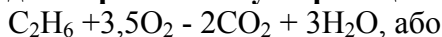
**для горіння метану за реакцією**



на 1 моль метану ( $\text{CH}_4$ ) витрачається 2 моля кисню ( $\text{O}_2$ ).

Тоді на всю кількість метану в природному газі –  
 $\% \text{CH}_4 \cdot 2 = a$  (молів);

**для горіння етану за реакцією**



за аналогією з горінням метану

$\% \text{C}_2\text{H}_6 \cdot 3,5 = b$  (молів);

**для горіння пропану**



$\% \text{C}_3\text{H}_8 \cdot 5 = c$  (молів).

Сумарна кількість кисню для горіння 100 молів природного газу дорівнюватиме сумі складових і дорівнює  
 $A = a + b + c$  (молів).

Сухе повітря за нормальних умов складається з кисню ( $\text{O}_2$ ) в кількості 21% за об'ємом (23,2% за вагою) і азоту ( $\text{N}_2$ ) в кількості 79% за об'ємом (76,8% за вагою) від загального об'єму (ваги) повітря. Таким чином, співвідношення об'ємів азоту і кисню

$\% \text{N}_2 : \% \text{O}_2 = n$ , тобто

в повітрі на 1 об'єм кисню ( $\text{O}_2$ ) доводиться « $n$ » об'ємів азоту ( $\text{N}_2$ ).

Тоді з визначеними раніше необхідними для горіння  $A$  молями кисню вноситься  
 $A \times n = B$  (молів);

азоту (N<sub>2</sub>), а всього повітря

A + B = C (молів).

На 1 моль (м<sup>3</sup>) природного газу потрібно

$$L_m = \frac{C}{100} [\text{моль/моль газу (м}^3/\text{м}^3 \text{ газу)}] \text{ моль повітря.}$$

### 3.1.1. Визначення складу продуктів горіння

До складу продуктів горіння входять:

- продукти окислення горючих речовин;
- вуглекислота з газу;
- азот, внесений повітрям.

Кількість складових продуктів горіння визначимо таким чином:

#### 1 Вуглекислий газ (CO<sub>2</sub>)

Природний газ вносить %CO<sub>2</sub> моля; горіння метану за реакцією



горіння етану за реакцією



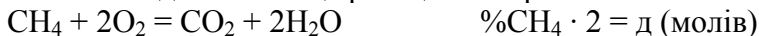
горіння пропану за реакцією



Всього %CO<sub>2</sub> + d + e + f = Д (молів).

#### 2 Вода (H<sub>2</sub>O)

За наведеними вище реакціями горіння:



Всього d + h + до = E (молів).

#### 3 Азот (N<sub>2</sub>)

Повітря вносить B молів.

Таким чином, усього продуктів горіння

$$D + E + B = F \text{ (молів).}$$

На 1 м<sup>3</sup> природного газу буде

$$V = \frac{F}{100} \text{ (м}^3/\text{м}^3)$$

продуктів горіння.

Витрата газу піччю ТНО-18.26.13/11 згідно з технічною характеристикою становить  $60\text{м}^3/\text{год}$ . Тоді за 1 годину роботи печі виділиться продуктів горіння

$$Q = V \cdot 60 \quad (\text{м}^3).$$

Отже, певний склад продуктів горіння буде:

Складові	Моль	%
$\text{CO}_2$	Д	$\alpha$
$\text{H}_2\text{O}$	Е	$\beta$
$\text{N}_2$	В	$\gamma$

### 3.2. Складання матеріального балансу процесу горіння природного газу в печі ТНО-18.26.13/11

Для цього необхідно ввести до таблиці «надходження-витрати» кількості речовин, що беруть участь у процесі горіння й утворюються в результаті горіння.

#### 3.2.1. Матеріальний баланс процесу горіння

Надійшло для горіння:

1. Газу 100 молів, зокрема:

$$\text{CH}_4 \text{ 75 молів, або } 75 \cdot \mu_{\text{CH}_4} = \text{K (кг);}$$

$$\text{C}_2\text{H}_6 \text{ 3 молі, або } 3 \cdot \mu_{\text{C}_2\text{H}_6} = \text{L (кг);}$$

$$\text{C}_3\text{H}_8 \text{ 1 моль, або } 1 \cdot \mu_{\text{C}_3\text{H}_8} = \text{M (кг);}$$

$$\text{CO}_2 \text{ 21 моль, або } 21 \cdot \mu_{\text{CO}_2} = \text{N(кг).}$$

$$\text{Разом } \text{P} = \text{K} + \text{L} + \text{M} + \text{N (кг).}$$

2. Повітря С молів, зокрема:

$$\text{O}_2 \text{ A молів, або } \text{A} \cdot \mu_{\text{O}_2} = \text{S (кг).}$$

$$\text{N}_2 \text{ B молів, або } \text{B} \cdot \mu_{\text{N}_2} = \text{T (кг).}$$

$$\text{Разом } \text{I} = \text{S} + \text{T (кг).}$$

$$\text{Всього } \text{V} = \text{R} + \text{I (кг).}$$

Отримано під час горіння:

Продуктів горіння F молів, зокрема:



$\text{CO}_2$  Д молів, або  $D \cdot \mu_{\text{CO}_2} = I$  (кг);

$\text{H}_2\text{O}$  Е молів, або  $E \cdot \mu_{\text{H}_2\text{O}} = \varphi$  (кг);

$\text{N}_2$  В молів, або  $B \cdot \mu_{\text{N}_2} = H$  (кг).

Разом  $W = I + \varphi + H$  (кг)

Об'ємну вагу продуктів горіння  $\varphi_0$ ,  $\text{кг/м}^3$ , обчислюють за формулою

$$\varphi_0 = \frac{W}{F \cdot 22,4},$$

де  $W$  - вага продуктів горіння, кг;  $F$  - молярне число продуктів горіння, моль.

### **3.2.2. Визначення теплотворної здатності природного газу**

Нижчу теплотворну здатність природного газу, що використовується як паливо в печі ТНО-18.26.13/11, визначимо за такою формулою:

$$Q = 127,2\text{CO} + 107,6\text{H}_2 + 358,2 \text{CH}_4 + 596,3\text{C}_2\text{H}_6 + 220,4\text{H}_2\text{S} \text{ (кДж/кг)}.$$

Для складу газу, що використовується в печі ТНО-18.26.13/11, формула набере вигляду

$$Q_{\text{н}} = 358,2 \cdot \% \text{CH}_4 + 596,3 \cdot \% \text{C}_2\text{H}_6 \text{ (кДж/кг)}.$$

## **4. ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ РОБОТИ**

1. Вивчити пристрій печі ТНО-18.26.13/11 і її конструкційні особливості.

2. Вивчити конструкцію пальників печі ТНО-18.26.13/11, їх кількість, розташування, підведення газу і повітря.

3. Ознайомитися з технічною характеристикою печі, додатковим і допоміжним устаткуванням, що використовується при термообробці.

4. Провести розрахунок горіння палива печі (п.3.1 даних МВ).

5. Визначити склад продуктів горіння (.п.3.1.1 даних МВ).

6. Скласти матеріальний баланс печі ТНО-18.26.13/11 (п.3.2 даних МВ).

7. Визначити теплотворну здатність природного газу (п.3.2.2 даних МВ).

## **5. ЗМІСТ ЗВІТУ**

Звіт повинен містити:

1. Мету роботи.
2. Короткі теоретичні відомості й технічну характеристику печі ТНО-18.26.13/11.
3. Виконані розрахунки та оцінку отриманих результатів.
4. Висновки про виконану роботу.

## **6. ТЕХНІКА БЕЗПЕКИ ПІД ЧАС ВИКОНАННЯ РОБОТИ**

Студенти зобов'язані строго виконувати правила техніки безпеки при роботі з електроустаткуванням, нагрівальними пристроями і печами, підйомно-транспортними механізмами відповідно до проведеного інструктажу.

## **7. КОНТРОЛЬНІ ПИТАННЯ**

1. До якого типу печей належить піч ТНО-18. 26.13/11?
2. Розшифруйте індексацію печі, запропоновану викладачем.
3. Яке устаткування використовується для завантаження і вивантаження деталей у печах типу ТНО?
4. Особливості спалювання газу в печах ТНО.
5. Пальники, що застосовуються для спалювання газу в печах ТНО.

6. Особливості конструкцій пальників термічних полумєневих печей.

7. Яка максимальна температура в печі ТНО під час роботи із звичайною пічною атмосферою?

8. Яка гранична температура нагрівання в печах з контрольованою атмосферою?

9. Дайте визначення теплотворної здатності палива.

10. Як визначається теплотворна здатність газоподібного палива?

11. Яким чином проводять аналіз процесу горіння палива в печі?

12. Як знайти потрібну кількість повітря для спалювання палива в печі і яке практичне застосування цих розрахунків?

13. Що таке теоретична кількість повітря для спалювання палива?

14. Що називається коефіцієнтом надлишку повітря?

15. Як складається матеріальний баланс процесу горіння?

16. Час розігрівання печі ТНО-18.26.13/11 становить 6 годин. Витрата природного газу піччю – 6 м<sup>3</sup>/год. Визначте кількість продуктів горіння природного газу в печі за цей час.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Рустем С.Л. Оборудование и проектирование термических цехов. -М.: Машгиз,1962. С. 187-190.

2. Соколов К.Н. Оборудование термических цехов. – Киев-Донецк: Вища школа, 1984. С.34-40, 50-54.

### **Лабораторна робота 3**

«Визначення теплотворної здатності газоподібного палива термічних печей»

## **1. МЕТА РОБОТИ**

1.1. Ознайомитися з видами і складом газового палива полуменевих термічних печей ТНО і ТДО.

1.2. Вивчити методику визначення теплотворної здатності газоподібного палива полуменевих термічних печей типу ТНО і ТДО.

## **2. УСТАТКУВАННЯ, ПРИЛАДИ ТА МАТЕРІАЛИ**

2.1. Піч паливна, камерна ТНО-26.31.18/11.

2.2. Піч паливна, з висувним подом ТДО 30.53.19/11.

2.3. ГОСТ 147-74. Паливо. Метод визначення вищої теплоти згоряння і обчислення нижчої теплоти згоряння (дійсний до 07.1998 р.).

## **3. ОСНОВНІ ПОЛОЖЕННЯ**

У полуменевих печах використовується газове і рідке паливо. Споживання рідкого палива при термообробці ні ні значно скорочено, оскільки нафтопродукти доцільніше використовувати як сировина в хімічній промисловості.

На термічній дільниці цеху № 19 ВАТ СНВО ім. Фрунзе, віднесеному до філії кафедри СумДУ, встановлені паливні печі ТНО-26.31.18/11 і ТДО 30.53.19/11. У цих полуменевих печах використовується газове паливо. Газове паливо дозволяє дотримувати точність температурного режиму і рівномірність розподілу тепла по печі. У газових печах з трубчастими нагрівальними елементами можна застосовувати контрольовані атмосфери, грами. У печах термічної обробки використовуються:

- природний газ із нижчою теплотворною здатністю  $Q_n \approx 34-36 \text{ Мдж/м}^3$ )?

- коксувальний газ ( $Q_n \approx 16-17 \text{ Мдж/м}^3$ );

- генераторний газ ( $Q_n \approx 5-6 \text{ Мдж/м}^3$ );

- водяний газ ( $Q_n \approx$  до  $10,5 \text{ Мдж/м}^3$ ).

Під час горіння палива горючі речовини, що містяться в ньому, з'єднуються з киснем і утворюють продукти горіння. Цей процес супроводжується виділенням тепла. Кількість тепла, що виділяється при спалюванні палива і віднесене до одиниці палива, називається **теплотворною здатністю палива**, або теплотворністю. Величиною, яка характеризує паливо, є вища теплотворна здатність палива  $Q_v$ . Введено також поняття нижчої теплотворної здатності палива  $Q_n$ , що містить умову охолодження водяної пари від  $100^\circ\text{C}$  до  $20^\circ\text{C}$ .

Калориметричною температурою ( $t_{\text{кал}}$  або  $t_{\text{max}}$ ) називається температура продуктів горіння, яка виходить під час згорання палива без яких-небудь втрат, тобто коли все тепло від згорання горючих речовин палива йде на нагрівання продуктів горіння. Це можливо за таких умов:

а) горіння відбувається при теоретичній кількості повітря;

б) горіння відбувається миттєво до повного окиснення;

в) все тепло йде на нагрівання продуктів горіння.

Калориметрична температура деяких видів палива подана в табл. 1.

На практиці при спалюванні палива жодну із зазначених умов для отримання калориметричної температури виконати не можна. При високих температурах ( $\sim 1500^\circ\text{C}$ ) відбувається дисоціація оксидів з поглинанням тепла. Температура продуктів горіння з урахуванням втрат тепла на реакції дисоціації оксидів називається теоретичною температурою ( $t_{\text{теор}}$ ). Окрім реакцій дисоціації, продукти горіння передають тепло навколишньому середовищу, стінкам

печі, предметам, що знаходяться в печі, і тому подібне. У реальних умовах горіння є надлишок повітря, а в продуктах горіння - продукти неповного окислення. Температура продуктів горіння за цих умов називається дійсною (або робочою) ( $t_{\text{дійсн}}$ ) Вона буде нижча за теоретичну температуру, тобто  $t_{\text{max}} > t_{\text{теор}} > t_{\text{дійсн}}$ .

Таблиця 1 - Теплотворна здатність і калориметрична температура деяких видів палива

Паливо	Нижча теплотворна здатність, Q, кДж/кг	Калориметрична температура, °С
Чистий вуглець	33931	2000
Дерево (бук)	18265	1720
Кам'яне вугілля	30424	2010
Кокс	27856	2008
Мазут	41074	2030
Бензин	43577	1865
<b>Гази:</b>		
природний	34924	1830
світільний	21517	1870
консольний	17656	1838
генераторний	6672	1710
Доменний	4587	1235

### 3.1. Визначення теплотворної здатності газоподібного палива

Визначення теплотворної здатності необхідне для характеристики палива і може здійснюватись експериментальним шляхом або розрахунком за хімічним складом палива. Для експериментального визначення теплотворної здатності палива розроблений ГОСТ 174-74.

Теплотворну здатність палива визначають також розрахунковим шляхом за елементарним аналізом. Для цієї мети існує ряд формул, які ґрунтуються на законі Гесса. За цим законом теплота горіння палива дорівнює сумі теплот горіння атомів вуглецю, водню, сірки мінус теплота утворення молекули речовини, з якої складається дане паливо. Для визначення розрахунковим шляхом теплотворної здатності мають бути відомі кількості різних складових палива, тобто його хімічний склад, і теплота їх горіння (табл.2).

Таблиця 2 - Теплові ефекти реакцій

Реакції	Окиснюваної речовини		Кисню	
	кДж/кг·моль	кДж/кг	кДж/кг·моль	кДж/кг
$C + O_2 = CO_2$	+407200	+33931	+407200	+12723
$C_{аморф} + 1/2O_2 = C$	+122720	+10268,6	+245440	+7669
$C + 1/2O_2 = CO_2$	+284480	-	+568955	+17781
$CO_2 + C_{аморф} = 2 C$	-161750	-13480	-	-
$C_{аморф} + H_2O = C + H_2$	-118350	-9862	-	-
$C + H_2O_{пар} = CO_2 + H_2$	+43410	-	-	-
$H_2 + 1/2O_2 = H_2O_{пар}$	+241070	+120534	+482135	+15066
$H_2 + 1/2O_2 = H_2O_{рід}$	+285060	+142530	+571022	+17814
$S + O_2 = SO_2$	+291070	+9095	+291070	+9095

Загальна формула для визначення теплотворної здатності палива за елементарним аналізом має такий вигляд:

$$Q = \frac{q_c C + q_k H + q_s S}{100} \text{ кДж / кг ,}$$

де C, H, S - вміст цих елементів %;  $q_c$ ,  $q_k$ ,  $q_s$  - теплота горіння цих елементів у вільному стані. Для підрахунку теплотворної здатності газоподібного палива застосовуються формули, отримані підсумовуванням твірних теплових ефектів складових на їх процентний вміст. Вища теплотворна здатність визначається за формулою

$$Q_v = 30,5CO + 30,5H_2 + 95,3CH_4 + 152,5C_2H_6 + 60H_2S \text{ кДж/м}^3.$$

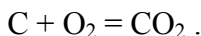
Нижча:

$$Q_n = 30,5CO + 25,8H_2 + 85,9CH_4 + 143C_2H_6 + 55H_2S \text{ кДж/м}^3.$$

### 3.2. Визначення витрати повітря під час спалювання палива

Під час спалювання палива, необхідного для окиснення його паливних, кисень вноситься повітрям. Для визначення кількості повітря потрібно врахувати вміст у ньому азоту ( $N_2$ ), що не бере участь в горінні. Сухе повітря, якщо нехтувати незначною кількістю тих, що містяться в ньому благородних газів і вуглекислоти, за нормальних умов складається з кисню ( $O_2$ ) - 21% за об'ємом або 23,2% за вагою і азоту ( $N_2$ ) - 79% за об'ємом або 76,8% за вагою. Як приклад визначимо втрату повітря при спалюванні палива, що складається з чистого вуглецю.

Для цього запишемо рівняння згоряння вуглецю у вуглекислоту



Визначимо кількість кисню, яка необхідна для згоряння вуглецю в  $CO_2$ :

$$O_2 = \frac{M_{oc}}{M_c} = a(\text{кг}),$$

де  $M_{oc} = 32$  кг;  $M_c = 12$  кг - молекулярна вага кисню ( $O_2$ ) і вуглецю (C).

Кількість азоту, що вноситься з цією кількістю кисню повітря:

$$N_2 = \frac{a \cdot 76,8}{23,2} = v(\text{кг}).$$

Повітря при цьому потрібно

$$L_m = a + v = C \text{ кг/кг пального.}$$



Ця кількість повітря називається теоретичною для спалювання палива, тобто це мінімальна кількість повітря, необхідна для окислення 1 кг пального. Така кількість повітря за нормальних умов займає об'єм

$$\frac{C}{1,293} = d \text{ м}^3/\text{кг пального},$$

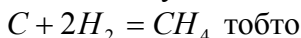
де 1,293 - об'ємна вага повітря за н.у.

Таким чином, теоретична витрата повітря може бути виражена у вагових або об'ємних кількостях.

### 3.3. Розрахунок теплотворної здатності газового палива

Розрахуємо теплотворну здатність метану (CH<sub>4</sub>).

Рівняння отримання метану має вигляд



метан (CH<sub>4</sub>) містить за вагою 75% вуглецю (C) і 25% водню (H<sub>2</sub>), оскільки 12 кг + 4 кг = 16 кг, або 75% + 25% = 100%.

Теплоту горіння вуглецю знайдемо за формулою

$$Q_c = q_c \cdot 0,75 \text{ кДж/кг},$$

а водню – за формулою

$$Q_h = q_h \cdot 0,25 \text{ кДж/кг},$$

де  $q_c$  і  $q_h$  - теплові ефекти реакцій знаходимо за табл.2.

Сума теплоти горіння C і H<sub>2</sub> становить

$$Q = Q_c + Q_h.$$

Дійсна теплота горіння метану

$$Q_b = 56643,44 \text{ кДж/кг}.$$

Теплоту утворення метану знаходимо за формулою

$$Q_{CH_4} = Q - Q_b.$$

## **4. ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ РОБОТИ**

4.1. Вивчити тип пальників і спосіб утворення суміші газу і повітря в печах ТНО-26.31.18/11 і ТДО-30.53.19/11.

4.2. Під керівництвом викладача кафедри або філії кафедри на підприємстві оглянути і вивчити розводку труб подачі газу і палива до пальників печей ТНО і ТДО.

4.3. Під керівництвом оператора газового обладнання термічної печі за присутності викладача вивчити послідовність операцій з підготовки печі до пуску (запаленню).

4.4. Простежити за процесом розпалювання печі оператором газового устаткування печі.

4.5. Розрахувати необхідну витрату повітря під час спалювання палива (п.3.2 даних МВ).

4.6. Визначити теплотворну здатність газового палива (п.3.3 даних МВ).

## **5. ЗМІСТ ЗВІТУ**

Звіт повинен містити:

- 1) мету роботи;
- 2) короткі теоретичні відомості;
- 3) виконані розрахунки та оцінку отриманих результатів;
- 4) висновки про виконану роботу.

## **6. ТЕХНІКА БЕЗПЕКИ ПІД ЧАС ВИКОНАННЯ РОБОТИ**

Студент зобов'язаний строго виконувати правила техніки безпеки під час роботи з електрообладнанням, нагрівальними пристроями і печами, підйомно-транспортними механізмами відповідно до проведеного інструктажу.

## 7. КОНТРОЛЬНІ ПИТАННЯ

1. Дайте визначення палива, його основні і додаткові ознаки.
2. Види палива. Паливо, що використовується в термічних печах.
3. Наведіть формулу для визначення складу палива. Поясніть її.
4. Дайте визначення вологи палива та абсолютно сухого палива.
5. Що таке баласт палива?
6. Яким чином визначають склад і якість палива?
7. Технічний і повний аналіз палива.
8. Як розрізняють паливо за складом?
9. Що є процесом горіння палива?
10. Теплотворна здатність палива.
11. Методи визначення теплотворення палива.
12. Що таке теплова потужність печі?
13. Як називаються пристрої для спалювання газоподібного палива в термічних печах? Їх види.
14. Наведіть класифікацію пристроїв для спалювання газоподібного палива за місцем змішування газу і повітря.
15. Що таке калориметрична, теоретична і дійсна температура продуктів горіння?

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Рустем С.Л. Оборудование и проектирование термических цехов. -М.: Машгиз,1962. – С. 5-34.
2. Соколов К.Н. Оборудование термических цехов. – Киев-Донецк: Вища школа, 1984. – С. 8-12.
3. Інструкція оператора газового устаткування паливної печі.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Долотов Г.П., Кондаков Е.А. Печи и сушилка литейного производства. – М.: Машиностроение, 1984. – 232 с.
2. Соколов К.Н. Оборудование термических цехов. – К.: Донецк: Вища школа, 1984. – 328 с.
3. Расчет нагревательных и термических печей: Справочник /под ред. В.М. Тымчака и В.Л. Гусовского. – М.: Металлургия, 1983. – 482 с.
4. Соколов К.Н., Коротич И.К. Технология термической обработки и проектирование термических цехов. – М.: Металлургия, 1988. – 384 с.
5. Шохорі А.В., Чумак М.Г. Термічна обробка металів: навчальний посібник. –К.: Либідь, 2002. -511 с.
6. Металлургическая теплотехника: учебник для вузов /В.А.Кривандин, Б.С.Мастрюков, В.А.Арутюнов и др. –М.: Металлургия, 1986. -426 с.
7. Соколов К.Н. Оборудование термических цехов. – К.: Донецк: Вища школа, 1984. – 328 с.
8. Аверин Р.И., Тальдфарб Э.М., Кравцов А.Ф. и др. Расчеты нагревательных печей. –Киев: Техніка, 1969. – 539 с.
9. Юдаев Б.М. Теплопередача. – М.: Высшая школа, 1981.-319с.
10. Ключников А.Д., Кузьмин В.Н., Попов С.К. Теплообмен и тепловые режимы в промышленных печах. – М.: Энергоиздат, 1990. – 175с.
11. Телегин А.С., Швидкий В.С., Ярошенко Ю.Г. Тепломасоперенос. – М.: Металлургия, 1995.
12. Лабій В. Й. Тепломасообмін. – Львів: Тріада Плюс, 1998. - 280 с.
13. Константинов С.М. Теплообмін. – Київ: Політехніка іпрес, 2005. - 305 с.
14. Драганов Б.Х., Долінський А.А., Міщенко А.В. та ін. Теплотехніка. – Київ: Либідь, 2005. - 360 с.
15. Беляев Н. М. Основы теплопередачи. – К.: Высш. шк., 1989. – 342 с.

16. Кутателадзе С.С. Основы теории теплообмена. – Новосибирск: Наука, 1970. – 660 с.
17. Луцик Р.В. Теплообмін. – К.: КНУТД, 2004. – 126 с.
18. Лыков А.А. Тепломасообмен: справочник. – М.: Энергия, 1978. – 480 с.
19. Юдаев Б.Н. Теплопередача. – М.: Высш. шк., 1981. – 320 с.
20. Линчевский В.П. Топливо и его сжигание. Металлургиздат, 1959.
21. Жуковский В.С. Основы теории теплопередачи. – М.: Госэнергоиздат, 1960. – 190 с.
22. Крейт Ф., Блэк У. Основы теплопередачи. – М.: Мир, 1983. – 512 с.
23. Немцов З.Ф., Арсеньев Г.В. Теплоэнергетические установки и теплоснабжение. – М.: Энергоиздат, 1982. – 400 с.

Навчальне видання

**Будник** Анатолій Федорович  
**Юскаєв** Володимир Борисович

**Енергетика обладнання  
термічних цехів і дільниць**

Навчальний посібник

Художнє оформлення обкладинки А.Ф.Будника  
Редактор Н.А.Гавриленко  
Комп'ютерне верстання А.С.Кравченко, В.Д.Вінницької

Формат 60x84/16. Ум. друк. арк. 14,18. Обл.-вид.арк. 10,38.  
Тираж 300 пр. Зам. № .

Видавець і виготовлювач  
Сумський державний університет,  
вул. Римського-Корсакова,2, м. Суми, 40007  
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 3062 від 17.12.2007.