



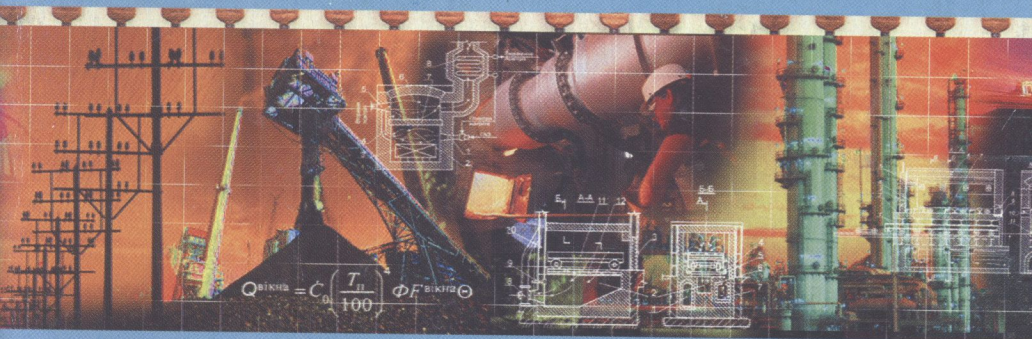
ВИЩА ШКОЛА

О. О. Ткаченко

ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНІ ПРОЦЕСИ ТА УСТАНОВКИ

I Частина

Затверджено Міністерством освіти і науки України



ПІДРУЧНИК

621.1(075)

T48

О. О. Ткаченко

ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНІ ПРОЦЕСИ ТА УСТАНОВКИ У ДВОХ ЧАСТИНАХ

I

ЧАСТИНА

2-ге видання

ПІДРУЧНИК

**Затверджено Міністерством освіти і науки України
як підручник для студентів вищих
навчальних закладів**

НТБ ВНТУ



4093-107

621.1(075)

T48

2008

Ткаченко О.О. Високотемпературні процеси та

**Харків
Видавництво
"Ранок"
2008**

ББК 31.32я73
Т48

**Видано за рахунок державних коштів.
Продаж заборонено**

*Затверджено
Міністерством освіти і науки України
як підручник для студентів вищих навчальних закладів
(Лист № 1.4/18-Г-1471.1 від 06.09.07)*

Рецензенти: **М. К. Безродний**, проф., д-р техн. наук;
О. Ю. Майстренко, чл.-кор. НАН України,
д-р техн. наук.

Ткаченко О. О.

Т48 Високотемпературні процеси та установки: Підруч. —
У двох частинах. Ч. 1. — 2-ге вид. — Х.: Видавництво
«Ранок», 2008. — 336 с. : іл.

ISBN 978-966-672-133-7 (повне зібрання).

ISBN 978-966-672-134-4 (частина 1).

Підручник відповідає програмі з курсу «Високотемпературні процеси та установки». У першій частині розглянуто створення теплотехнічних умов для здійснення високотемпературних процесів різних галузей виробництва: вибір палива, метод його спалювання, забезпечення високої ефективності нагрівання матеріалу, що обробляється. Найважливіші проблеми проілюстровано розв'язанням задач, наведено необхідний довідковий матеріал.

Для студентів вищих навчальних закладів. Буде корисним також для викладачів і фахівців-виробничників.

ББК 31.32я73

ISBN 978-966-672-133-7
ISBN 978-966-672-134-4

© О. О. Ткаченко, 2004
© ТОВ Видавництво «Ранок», 2008



Присвячується
75-річчю Національного університету
харчових технологій

ПЕРЕДМОВА

Вивчення дисципліни “Високотемпературні процеси та установки” допомагає набутти знання з дослідження, проектування та експлуатації високотемпературних теплотехнологічних процесів та установок. Ці установки посідають одне з перших місць за споживанням палива та інших енергоресурсів у перетвореному вигляді; за цим показником їх можна прирівняти до теплових електричних станцій.

Завданням вивчення дисципліни є засвоєння енергетичних та теплотехнічних основ високотемпературних технологій; формування уявлення про взаємозв'язок і взаємообумовленість технологічних, енергетичних та теплотехнічних аспектів теплотехнологій; формування чіткого погляду на проблему економії паливно-енергетичних ресурсів у високотемпературних технологіях; одержання всебічного уявлення про багатогранність високотемпературних процесів та установок.

Надзвичайно важливим є вивчення основ енергоощадних теплотехнологій та перспектив зниження енерговитрат на високотемпературні теплотехнологічні процеси; вивчення теплових, теплотехнічних та конструктив-

них схем високотемпературних установок і за-
своєння їх основних характеристик; набуття
початкових навичок встановлення високотем-
пературних установок та виконання тепло-
технічних випробувань.

Вивченню курсу "Високотемпературні проце-
си та установки" передують такі дисципліни:
"Матеріалознавство і технологія матеріалів",
"Технічна термодинаміка", "Гідрогазодинамі-
ка", "Тепломасообмін", "Основи хімії палива та
води", "Котельні установки", "Теплотехноло-
гічні процеси та установки".

Набуті знання використовуються під час
вивчення дисциплін спеціалізації.

*
* *

Автор вельми вдячний рецензентам —
доктору технічних наук, професору М. К. Без-
родному та доктору технічних наук, члену-
кореспонденту НАН України О. Ю. Майс-
тренку, критичні зауваження яких сприяли
покращенню змісту книги.

Автор з вдячністю сприйме всі зауваження
і побажання щодо удосконалення підручника.

ЧАСТИНА ПЕРША

Розділ перший

ВСТУП У ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНУ ТЕПЛОТЕХНОЛОГІЮ ТА ЕНЕРГЕТИКУ ТЕПЛОТЕХНОЛОГІЇ

Теплотехнологічні процеси у промисловому виробництві посідають одне з провідних місць. Основою таких процесів є регламентований, тобто певний за параметрами тепловий вплив на початковий матеріал щодо зміни його теплового стану, що необхідно для здійснення подальшого технологічного процесу.

Промислові установки та системи, де реалізуються ці процеси, створюють теплотехнологічні комплекси, а ті, в свою чергу, — технічну базу основних виробництв у найголовніших галузях народного господарства, якими є чорна та кольорова металургія, виробництво будівельних матеріалів, хімічна, нафтохімічна, харчова промисловість, машинобудування тощо.

1.1. Початкові поняття та означення

Теплотехнологічний процес (теплотехнологія) — це такий технологічний процес створення продукту чи матеріалу, який здійснюється через регламентовану дію теплотою на початковий матеріал чи сировину.

Примітка. Слово *технологія* складне і походить від грецьких слів *τεχνη* (техно), що означає майстерність, і *λογος* (логос) — слово, вчення. Таким чином, технологія (технологічний процес) означає сукупність і послідовність чітко регламентованих способів і засобів переробки матеріалів, виготовлення виробів та процесів, що супроводжують ці види робіт.

Теплотехнологічна установка — це обладнання, що конструктивно пристосоване для здійснення даного теплотехнологічного процесу або його окремих стадій.

Теплотехнологічна система — це сукупність теплотехнологічної установки та експлуатаційно з нею пов'язаного технологічного, теплотехнічного, енергетичного, транспортного, розподільчо-приймального та іншого обладнання, що безпосередньо забезпечує реалізацію даного теплотехнологічного процесу чи його окремих стадій.

Теплотехнологічний комплекс — це сукупність теплотехнологічних систем та пов'язаних з ним через виробничі зв'язки технологічних, теплотехнічних, енергетичних, транспортних, розподільчо-приймальних та інших систем, агрегатів, обладнання, що забезпечують всю послідовність технологічних стадій перетворення початкових сировинних матеріалів в готову продукцію.

Промисловий теплотехнологічний комплекс — це сукупність окремих теплотехнологічних комплексів, які є технічною базою таких основних виробництв народного господарства, як виробництво чавуну і сталі, кольорових металів, будівельних матеріалів, одержання багатьох продуктів хімії та нафтохімії, харчової, легкої, целюлозно-паперової промисловості.

Комбінована теплотехнологічна система — це система, що органічно зв'язує дві або кілька теплотехнологічних (технологічних) систем з метою забезпечення найвищої економічної ефективності виготовлення заданих видів продукції та високого рівня їх виробництва.

Комбінована енерготехнологічна система — це система, що органічно пов'язує енергетичну та теплотехнологічну (технологічну) системи з метою забезпечення найвищої економічної ефективності вироблення заданих рівнів енергетичної та технологічної продукції.

Комбінований технологічний агрегат — це агрегат дво- чи багатоцільового призначення, який забезпечує конструктивний зв'язок окремих теплотехнологічних (технологічних) систем.

Комбінований енерготехнологічний агрегат — це агрегат дво- чи багатоцільового призначення, який забезпечує конструктивний зв'язок у комбінованій системі енергетичної та теплотехнологічної систем.

Камера (камери) робочого простору — це основна (технологічна) частина високотемпературної теплотехнологічної установки, в межах якої здійснюються стадії технологічно необхідної теплової обробки початкових матеріалів.

Теплотехнічний принцип організації технологічного процесу (або його окремої стадії) — це характерна сукупність аеродинамічних, механічних, теплових та інших особливостей реалізації термічної обробки сировинних матеріалів, напівфабрикатів та виробів у камері (камерах) робочого простору теплотехнологічної установки.

Теплова схема теплотехнологічної установки — це графічна ілюстрація системи джерел енергії та їх розміщення, складу теплоносіїв і послідовності переміщення їх технологічними зонами та іншими тепловикористовуваними елементами установки.

Теплова схема якісно характеризує досконалість загальної організації використання теплоти джерел енергії.

Теплотехнічна схема — це теплова схема, в якій додатково ілюструються теплотехнічні принципи організації технологічного процесу та використання відходів теплоти.

Ступінь теплотехнологічного процесу — це частина технологічного процесу, для реалізації якої потрібні специфічні умови, коли перехід від одного ступеня до іншого потребує змін у відповідній камері або зоні робочого простору теплового режиму, газової атмосфери, теплотехнічного принципу, джерела енергії тощо.

Температурний та тепловий графік технологічного процесу — це графічна ілюстрація зміни температури матеріалу, що обробляється, та його теплопоглинання з часом у камері (камерах) робочого простору.

Інші поняття та визначення розкриватимуться під час викладення відповідних розділів та проблем, що визначені програмою дисципліни.

1.2. Енергетичний баланс та основні напрямки використання енергоресурсів України

Теплотехнологічні процеси потребують для свого здійснення великої кількості енергетичних ресурсів. При цьому виняткове значення має їхня якість.

Енергетичні ресурси, що використовуються в країні, розподіляються між трьома основними типами установок, які виробляють енергію:

- 1) установки, в яких безпосередньо використовується паливо (їх частка становить близько 45%);
- 2) електростанції — приблизно 34%;
- 3) котельні всіх видів (крім квартальних та внутрішньо-будинкових, що умовно віднесені до дрібних комунально-побутових установок) — близько 15%.

Усі ці енергогенеруючі установки передають енергію в перетвореному вигляді енергоспоживаючим процесам: силовим або тепловим.

Теплові процеси залежно від необхідного температурного рівня умовно поділяють на:

- високотемпературні — $t > 400^{\circ}\text{C}$;
- середньотемпературні — $t = 150...400^{\circ}\text{C}$;
- низькотемпературні — $t < 150^{\circ}\text{C}$.

Високотемпературні процеси, як правило, здійснюються в полумених та електричних печах; в середньотемпературних процесах як енергоносії використовуються в основному пара та гарячі гази; а в низькотемпературних — гаряча вода, пара низьких потенціалів та безпосередньо природне паливо.

Частка теплової енергії високого потенціалу в загальних витратах кінцевої енергії становить приблизно 18% від усіх видів використаного палива та близько 14% від усієї виробленої електроенергії.

Майже 90% теплової енергії високого потенціалу витрачається в промисловості, причому 80% цих витрат припадає на п'ять галузей (чорна та кольорова металургія, виробництво будівельних матеріалів, машинобудування та металообробка), а з них 65% — на чорну металургію. Однак використання теплової енергії в цих та інших галузях

народного господарства характеризується відносно низьким коефіцієнтом використання теплоти палива — у межах 15—35 %, тоді як коефіцієнт корисної дії (к.к.д.) сучасних парогенераторів становить 85...90%. Загальний к.к.д. КЕС в цілому досягає 36...40%; для ТЕЦ він значно вищий.

Використання вторинних енергетичних ресурсів (ВЕР) може суттєво підвищити к.к.д. високотемпературних установок (ВУ) та забезпечити певну економію палива. Слід враховувати, що капітальні витрати на видобуток та транспортування 1 т умовного палива (у.п.) в 2—3 рази перевищують капітальні витрати на 1 т у.п., заощадженого за рахунок використання ВЕР. Використання ВЕР для паливних ВУ має виключно важливе значення, але утруднюється через низку нездоланих технічних недоліків більшості існуючих промислових печей, в першу чергу, через їхню малу потужність.

На базі потужних пічних установок (ПУ) може вирішуватись проблема ефективного енерговикористання шляхом створення багатоцільових енерготехнологічних комплексів, у тому числі із застосуванням комбінованих процесів або систем.

На відміну від енергетичної раціоналізації існуючих високотемпературних теплотехнологічних установок (ВТУ) сутність енерготехнологічного тепловикористання полягає передусім у перегляді та докорінній модернізації всієї теплотехнічної схеми агрегату, починаючи з робочої камери та вибору для неї енергоносія. При цьому критерієм економічної ефективності мають бути інтереси народного господарства в цілому. В таких промислових теплотехнологічних комплексах поєднуються як технологічні, так і енергетичні проблеми, що вирішуються сумісно. Паралельно розглядаються питання модернізації всіх трудомістких процесів, автоматизації управління всім комплексом, умов праці й техніки безпеки, тобто соціальні аспекти проблеми. Одночасно при цьому, як правило, виникають і екологічні проблеми, які, до речі, для потужної установки можуть вирішуватись якісніше і з більшою економічною ефективністю, ніж для великої кількості дрібних ВТУ такої самої сумарної потужності.

Під час проектування чи реконструкції ВТУ дуже важливо знати, на який вид палива та які методи його спалювання орієнтуватися для забезпечення необхідного температурного рівня технологічного процесу та ефективного теплообміну між факелом і поверхнею матеріалу, що нагрівається. Відповідь на це запитання в певній мірі дає енергетичний баланс країни та перспектива його розвитку і удосконалення.

Найважливішою проблемою кожного суспільства є забезпечення його енергією. В табл.1.1 наведено дані про забезпеченість України власними енергоресурсами.

Таблиця 1.1

Першоджерела енергії	Перспективні запаси	Видобуток щорічно		Перспектива	
		млн т	млн т у.п.		млн т у.п.
Нафта	125 млн т	5	3,4	5 млн т	3,4
Газ	700 млрд м ³	22 млрд м ³	25,5	30 млрд м ³	34
Вугілля	100 млрд т	100	65	240 млн т	156
Уран	50 тис т				
			Всього -94		

Енергетичне забезпечення України за нормального стану економіки становить ~300 млн т у.п. Власного палива Україна добуває ~94 млн т у.п., а імпорт має становити ~206 млн т у.п., в тому числі газу 120 млрд м³ (138 млн т у.п.), нафти 50 млн т (68 млн т у.п.).

Україні для нормального функціонування економіки необхідно ~10 млн т бензину та ~14 млн т дизельного палива. За нинішніх умов при глибині переробки нафти 50% (у США — 90%, ФРН — 83%) Україні необхідно імпортувати більш як 60 млн т нафти. Переробку повністю можуть забезпечити нафтопереробні заводи України.

Витрати енергоносіїв на виробництво електроенергії в Україні наведено в табл. 1.2.

Україна належить до країн з дефіцитом власних природних вуглеводневих ресурсів.

В Україні структура споживання первинної енергії має вигляд приблизно такий:

природний газ — 43%,

нафта — 18% (газ + нафта — 61%),
 вугілля — 23%,
 атомна енергія — 16%.

Така структура склалася в Європі та й усьому світі.

Таблиця 1.2

Першоджерело енергії	Кількість енергоресурсів		
	млн т	млн т у.п.	%
Вугілля	37	23,8	26,4
Газ	34 млрд м ³	39,4	43,8
Мазут	13	17,7	19,7
Інші види джерел		9,1	10,1
Всього		90,0	100,0

Споживання природного газу забезпечується за рахунок власного видобутку на 24%, поставок з Росії — на 66%, Туркменістану — на 10%. Структура споживання природного газу в Україні має приблизно такий вигляд, %:

побутові потреби населення—40,
 електроенергетика—16,
 металургія—11,
 власні потреби газової промисловості—10,
 хімічна промисловість—9,
 інші споживачі—14.

Глобальною проблемою у використанні енергоносіїв в усьому світі є заміна споживання природного газу та мазуту на електростанціях з метою використання їх на інші потреби людства.

Щоб замінити газ та мазут в енергетиці України, необхідно мати додатково 90 млн т у.п. або в перерахунку на вугілля 140 млн т, тобто збільшити його видобуток на 100 млн т.

Враховуючи реальну ситуацію й можливості країни та досвід передових зарубіжних технологій, для України перспективним є:

- 1) нарощування видобування вугілля (за суттєвої реконструкції вугільної промисловості) для заміщення ним значної частини газу та нафти в паливно-енергетично-

му балансі; при цьому треба спрямувати курс на модернізацію наявних і спорудження нових сучасних чисто вугільних електростанцій;

- 2) інтенсифікація робіт із безпеки діючих атомних блоків, всебічне вивчення проблеми розміщення в Україні нових атомних електростанцій, які зможуть використовувати ядерне паливо, що видобувається в Україні;
- 3) широкі організаційні та інвестиційні заходи зі створення енергоощадних виробництв та технологій;
- 4) налагодження пошуків та виробництво нових для України видів палива із технічних спиртів, з рослинної сировини тощо.

1.3. Енергетика теплотехнологій

Враховуючи значимість для народного господарства країни промислової енергетики, в її структурі виділяються такі окремі напрямки:

- 1) теплоенергетика;
- 2) електроенергетика;
- 3) енергетика теплотехнологій.

Остання є науково-практичною основою технічної реалізації нових теплотехнічних принципів та енергетичної модернізації діючих ВУ та систем. Енергетика теплотехнологій вирішує такі конкретні проблеми:

- 1) вибір раціональних і нових джерел енергії;
- 2) вибір та впровадження ефективних способів та обладнання для генерації теплоти (спалювання палива);
- 3) обґрунтування та опрацювання прогресивних теплотехнічних принципів реалізації процесів та організації технологічного тепломасообміну;
- 4) проектування та впровадження теплових схем, що формують основу економічного та ефективного використання палива та інших енергоресурсів у технологічних установках;
- 5) вибір та опрацювання нових схем комбінування технологічних, а також енерготехнологічних комплексів, що реалізуються на принципах безвідходної технології;

- 6) дослідження радикальних шляхів зниження енергетичних відходів та використання вторинних енергетичних ресурсів;
- 7) проектування та впровадження оптимальних схем конструктивного оформлення та компоновок теплотехнологічних установок і систем та режимів їх експлуатації;
- 8) обґрунтування заходів подальшої енергетичної та загальної модернізації теплотехнологічних установок та систем.

Контрольні запитання

1. Дайте визначення технологічного та теплотехнологічного процесів. Який між ними взаємозв'язок?
2. Дайте визначення теплотехнологічної установки та теплотехнологічної системи.
3. Дайте визначення комбінованої теплотехнологічної та енерготехнологічної системи.
4. Охарактеризуйте місце високотемпературних процесів у балансі енергоспоживання України.
5. За якими ознаками теплові процеси класифікуються на високо-, середньо- та низькотемпературні?
6. В яких галузях народного господарства країни витрачається найбільше теплової енергії високого потенціалу?
7. Коротко охарактеризуйте енергетичне забезпечення України власними та купленими енергоресурсами.
8. Назвіть основні напрямки діяльності керівних органів енергетичного комплексу України, що можуть забезпечити енергоносіями споживачів енергії країни.
9. Перелічіть завдання енергетики теплотехнології щодо вдосконалення високотемпературних теплотехнологічних процесів та установок.

ХАРАКТЕРИСТИКА ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНИХ ТЕПЛОТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ ТА УМОВИ ЇХ ОРГАНІЗАЦІЇ

Теплова складова високотемпературного теплотехнологічного процесу невіддільна від технологічного процесу і тому вони мають розглядатися сумісно як єдине ціле у взаємозв'язку та взаємообумовленості. Технологічний процес здійснюється у результаті впливу теплоти на оброблюваний матеріал (нагрівання, плавлення тощо) і визначає призначення високотемпературних теплотехнологічних установок чи просто печей. Тому первинним, головним та визначальним процесом, що протікає в печах, є технологічний процес.

2.1. Короткий аналіз високотемпературних теплотехнологічних процесів

Високотемпературні теплотехнологічні процеси здійснюються в промислових печах внаслідок впливу теплоти на початкові матеріали з метою проведення хімічних чи фізико-хімічних перетворень за оптимальної температури.

Хімічні перетворення початкових матеріалів у печах поділяються на *прості* (описуються одним стехіометричним рівнянням) та *складні* (описуються кількома стехіометричними та кінетичними рівняннями).

Хімічні перетворення або реакції, поділяються на такі:

а) *реакції термічного розкладання*, в результаті яких складні хімічні сполуки за впливу теплоти розпадаються на простіші сполуки або навіть на хімічні елементи. Разом з

тим, вільні елементи в реакторі можуть взаємодіяти з киснем, сіркою, воднем тощо. Термічному розкладанню в печах найчастіше підлягають карбонати, оксиди, гідрати, силікати, фосфорити, антрацити, нафта, мазут тощо;

б) *реакції обмінного розкладання*, в результаті яких з однієї пари речовин утворюється інша, шляхом простого обміну іонами. Такі реакції мають місце під час плавлення на штейн та переробки штейнів у виробництві кольорових металів;

в) *реакції окисно-відновні*. *Окисні реакції*, що відбуваються в печах, здійснюються під час виробництва фосфорного ангідриду шляхом спалювання фосфору, сірчаного ангідриду — спалювання сірки, хлористого водню — спалювання водню в середовищі хлору тощо. Реакції окиснення металів становлять основу вогневого рафінування.

Відновні реакції є основою відновної плавки окисненої рудної сировини та напівфабрикатів кольорових металів (відновлення із руд фосфору, марганцю, сірки з відхідних газів після сорбції, сульфіту натрію та сульфату натрію, боритового концентрату тощо). Основні відновлюючі реагенти — це вуглець та окис вуглецю. Застосовуються як відновники також водень та вуглеводні.

До *фізико-хімічних перетворень* матеріалів, що здійснюються в печах, належать:

а) *зміна агрегатного стану* (плавлення та випаровування). Плавлення є основою процесів у чорній та кольоровій металургії. Процес випаровування металів та різних хімічних сполук є основою під час виробництва ртуті, цинку, магнію, миш'яку та інших металів, а також при виготовленні мінеральних пігментів;

б) *зміна кристалічної структури речовини*. До цих процесів належить термічна обробка металів та матеріалів, наприклад, нагрівання металів та сплавів перед куванням, прокатуванням, для усунення наклепування, гарту тощо.

2.2. Умови проведення високотемпературних теплотехнологічних процесів у промислових печах

Щоб високотемпературні теплотехнологічні процеси проходили нормально в потрібному напрямку і були керовані

та ефективні, необхідно дотримуватись певних умов їх проведення. Ці умови визначаються:

- 1) хімічною кінетикою процесу,
- 2) тепловим ефектом хімічної реакції,
- 3) споживанням та виділенням теплоти,
- 4) тепловим та температурним режимами в печах,
- 5) процесом горіння та вибуху.

2.2.1. Хімічна кінетика процесу. Вчення про швидкість хімічних реакцій, про фактори, що визначають ці швидкості, а також про механізм хімічних реакцій — це і є хімічна кінетика процесу. З'ясувавши фактори, від яких залежать швидкості реакцій, можна знайти способи прискорення корисних реакцій та сповільнення непотрібних та шкідливих процесів.

Усі термохімічні процеси супроводжуються поглинанням чи виділенням теплоти, тому без підведення чи відведення теплоти їх взагалі неможливо здійснити. Для більшості хімічних реакцій швидкість їх перебігу залежить від температури і визначається з рівняння Арреніуса

$$K = Be^{-E/RT}, \quad (2.1)$$

де K — константа швидкості реакції, B — передекспоненціальний множник, E — енергія активації, R — газова стала, T — абсолютна температура.

Ні одна реакція не може бути здійснена, якщо початкові речовини не вступають у контакт, тому здебільшого швидкість хімічних процесів залежить від швидкості доставки речовин, що реагують, в зону реакції, а також площі поверхні контакту цих речовин.

2.2.2. Тепловий ефект хімічної реакції. Це кількість теплоти, яка виділяється чи поглинається за необоротного перебігу реакції. При цьому тепловий ефект ендотермічної реакції (з поглинанням теплоти) вважається додатним, а екзотермічної — від'ємним.

Термохімічні розрахунки (основані на законі Гесса) слід виконувати за допомогою рівнянь, які являють собою стехіометричні рівняння хімічних реакцій, доповнені необхідними характеристиками про стан початкових та утворених речовин, а також значеннями теплових ефектів.

За постійного тиску тепловий ефект хімічної реакції з підвищенням температури посилюється. Це спричинюється зростанням теплоємностей продуктів реакції та початкових речовин з урахуванням стехіометричних коефіцієнтів. Якщо теплоємність під час термохімічної реакції не змінюється, тобто сума теплоємностей продуктів реакції дорівнює сумі теплоємностей початкових речовин, то тепловий ефект не залежить від температури.

2.2.3. Споживання та виділення теплоти. Для проведення в печах ендотермічних реакцій або фізико-хімічних перетворень матеріалів необхідно підводити теплоту. Ця теплота витрачається:

- 1) на нагрівання матеріалів до температури початку реакції або до температури початку фізико-хімічного перетворення (плавлення, випаровування, термообробки);
- 2) на безпосереднє здійснення хімічних реакцій або фізико-хімічного перетворення.

Суму цих двох видів витрат теплоти можна визначити як загальну реакційну теплоту, яка залежить від термодинамічного стану матеріалів і не залежить від теплотехнічних процесів.

Під час перебігу екзотермічних реакцій можливі три випадки :

а) кількість теплоти, що виділяється, недостатня для нагрівання початкових матеріалів до температури початку реакції та компенсації втрат теплоти. У цьому разі для здійснення реакції й безперервного перебігу процесу необхідно підводити теплоту;

б) кількість теплоти, що виділяється, достатня для здійснення всіх термічних процесів. У цьому разі вони здійснюються за рахунок тільки теплоти реакції;

в) кількість теплоти, що виділяється, перевищує всі витрати. Надлишок теплоти необхідно відводити з реактора для правильного ведення теплотехнологічного процесу.

Знання факторів і врахування їх дає змогу правильно організувати високотемпературні процеси і проводити їх найефективніше.

2.2.4. Тепловий і температурний режим у печах. Під тепловим режимом печі розуміють умови теплових навантажень у часі відповідно до вимог теплотехнологічного процесу. Зміна теплових навантажень у печі досягається підведенням теплоти за ендотермічних процесів або відведенням теплоти за екзотермічних процесів.

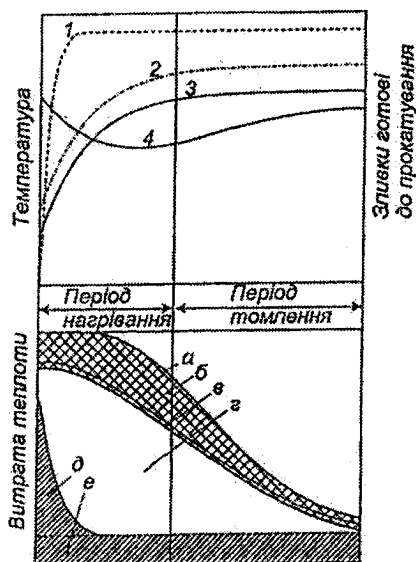


Рис.2.1. Температурний режим та тепловий баланс нагрівального колодязя при нагріванні зливків гарячого посаду:

1 — температура кришки; 2 — температура відхідних газів; 3 — температура поверхні зливка; 4 — температура центру зливка: а — загальна витрата теплоти; б — втрати теплоти з відхідними газами; в — втрати теплоти від неповноти згоряння палива; г — витрата теплоти на нагрівання зливка; д — теплота, що сприймається кладкою, охолодженою при відкриванні колодязя; е — втрати теплоти через кладку

У робочому просторі печі устанавлюється досить складне поле температур у полум'ї, на поверхні кладки, на поверхні матеріалу, що нагрівається. Сукупність температурних полів окремих елементів системи характеризує її температурне поле. Зміна температур того чи іншого поля в часі ($\partial T / \partial \tau$, град/год) характеризує режим цього поля.

Для деякого спрощення розв'язання задач теплообміну в печі допускається сталість температур в межах окремих елементів, що створюють систему (гази, кладка, поверхня нагріву тощо).

Температурний та тепловий режим у печах проілюструємо на прикладі нагрівального колодязя (рис.2.1).

Для нагрівання крупних сталєних зливків (завтовшки більш як 400 мм) застосовують нагрівальні колодязі, що за

своєю суттю є камерними печами, в яких підтримується заданий температурний режим. Так, якщо зливоч завантажується холодним, то його слід садити в піч, нагріту до невисокої температури (600...700°C), а потім поступово підвищувати її до заданого значення (1300...1400°C) з тією чи іншою швидкістю, залежно від товщини зливка та фізичних властивостей сталі. Під час нагрівання гарячих злиwkів, що не охололи після відливання, температуру в печі можна підтримувати більш високою і нагрівати зливоч швидше.

Із рис.2.1 видно, що нагрівання злиwkів має два характерні періоди.

У першому періоді витрата теплоти (палива) підтримується на максимальному рівні. Наприкінці цього періоду температура поверхні зливка доводиться до максимально допустимого значення. Якщо в колодязь завантажують гарячі злиwки (що не встигли охолонути після затвердіння), то в перший період спостерігається зниження температури середини зливка. Перший період називається періодом нагрівання.

У другий період витрату теплоти (палива) поступово зменшують. Причому температура поверхні зливка залишається на рівні 1150...1200°C, а температура середини зливка підвищується. Відбувається вирівнювання температур по перерізу — це і є період витримки (томлення).

На практиці допускається нерівномірність нагрівання не більш як 1...2°C на 10 мм лінійного розміру перерізу зливка. Робоча температура продуктів згоряння в нагрівальних колодязях становить 1300...1400°C.

Кожний теплотехнологічний процес може здійснюватись за певної температури, яку визначають із характеристик початкових матеріалів та процесів. Однак треба намагатись проводити процес за оптимального режиму.

Під оптимальним температурним режимом розуміють такі температурні умови, за яких забезпечується максимальна продуктивність по цільовому продукту в даній печі. Такий оптимум може бути забезпечений як за ізотермічного режиму ($t=\text{const}$), так і за політермічного при зміні тем-

ператури в часі для печей періодичної дії або по довжині камери для печей безперервної дії.

Для необоротних хімічних реакцій, що проходять в ізотермічних умовах, максимально можливий ступінь перетворення не залежить від температури. Однак швидкість реакції, відповідно до рівняння Арреніуса, зростає з підвищенням температури. Тобто максимальна продуктивність досягається за максимально можливою температурою перебігу процесу. При цьому треба враховувати й умови перебігу побічних реакцій, а також втрати теплоти в навколишнє середовище.

Для оборотних ендотермічних реакцій підвищення температури спричинює зростання як ступеня перетворення, так і швидкості реакції. Через це процес необхідно здійснювати за максимально можливою температурою.

Для оборотних екзотермічних реакцій, які здійснюються в печах безперервної дії, з підвищенням температури зростає швидкість прямої реакції, але при цьому знижується максимальний ступінь перетворення, який можливо досягти. У тому місці, де реагенти далекі від стану хімічної рівноваги, тобто на вході в піч, доцільно підтримувати високу температуру, а біля виходу із печі, де реакційна маса наближається за складом до зрівноваженого стану, температура має бути знижена, щоб зсунути процес у бік більш повного перетворення реагентів. Цим власне і обумовлено оптимальний профіль температур у печі, де здійснюється така реакція.

Оптимальний профіль температур у печі та максимальна швидкість утворення цільового продукту визначаються складом суміші на вході в піч та залежністю швидкості реакції від температури.

Реальні робочі температури, як правило, нижчі від оптимальних для екзотермічних процесів і значно нижчі від найбільш можливих для ендотермічних процесів. Це пояснюється тим, що під час нагрівання мас матеріалів, що реагують, зменшується різниця температур між теплоносієм (продуктами згорання) та реагентами, що нагріваються; збільшуються втрати теплоти у навколишнє середовище з

димовими газами, що видаляються з печі, а також через стінки печі. При визначенні робочих температур враховується властивість матеріалів спікатися, плавитися, випаровуватися, стійкість футеровки печі та інші фактори.

Робочі температури для проведення фізико-хімічних перетворень матеріалів визначаються із діаграм стану їх, або встановлюються за експериментальними даними.

2.2.5. Горіння та вибух. Горінням називають хімічні реакції окиснення, що супроводжуються значним виділенням теплоти. Вибухом називають процес дуже швидкого виділення енергії, в результаті чого утворюється ударна або вибухова хвиля.

Під час екзотермічної реакції можливі два випадки:

1) *повільний хід реакції окиснення.* При цьому теплота встигає відводитися в навколишнє середовище і температура в зоні реакції лише не набагато перевищує температуру навколишнього середовища;

2) *швидкий хід реакції окиснення.* Швидкість тепловіддачі у навколишнє середовище з підвищенням температури в зоні реакції зростає пропорційно градієнту температури, а швидкість виділення теплоти з підвищенням температури зростає по експоненті (див. рівняння Арреніуса (2.1)).

У результаті температура в зоні реакції підвищується, а сама реакція може закінчитись займанням та вибухом. Температура, по досягненні якої порушується теплова рівновага, називається *температурою займання*; вона є важливою характеристикою палива. Температуру займання ($T_{\text{займ}}$) визначають із рівняння

$$T_{\text{займ}} = \frac{E}{2R} \left(1 - \sqrt{1 - \frac{4R}{E} T_{\text{н.с}}} \right), \quad (2.2)$$

де E — енергія активації реакції; R — газова стала; $T_{\text{н.с}}$ — температура навколишнього середовища (навколо зони горіння).

Максимальне значення температури займання відповідає умові $T_{\text{н.с}} = E/4R$, тоді

$$T_{\text{займ}} = E/2R. \quad (2.3)$$

Якщо температура навколишнього середовища $T_{\text{н.с}} = E/4R$, то сталий хід реакції неможливий, теплота не встигає відводитись у навколишнє середовище і відбувається займання та вибух. Швидке підвищення температури при займанні та вибухові підвищує тиск газів. Якщо тиск встигає передатися у навколишнє середовище, то сусідні зони нагріваються до температури займання і паливо в них загоряється.

Слід наголосити, що всі перелічені умови перебігу високотемпературних теплотехнологічних процесів в промислових печах необхідно добре знати для врахування їх під час аналізу процесів, проектування та експлуатації установок, в яких здійснюються такі процеси.

2.3. Визначальний температурний параметр процесу

Найоб'єктивнішою температурною характеристикою теплотехнологічного процесу, незалежно від складності та конструктивного оформлення відповідного агрегату, де цей процес здійснюється, є температура технологічного продукту, що видаляється з основної робочої камери — $T_{\text{т.п}}$.

Так, під час нагрівання, плавлення та випаровування необхідно забезпечити задану температуру продукту на виході з печі. Наприклад, сталь перед прокаткою або ковкою нагрівається до $T_{\text{т.п}} = 1200 \dots 1300$ °С, оскільки саме при цих температурах сталь набуває такої пластичності, яка необхідна для її обробки. Для процесів плавлення чи випаровування $T_{\text{т.п}}$ досить точно визначається термодинамічними властивостями продукту, наприклад, температурою плавлення за даного тиску. Так, при $p = 1$ бар температура плавлення заліза становить 1535°С, а міді — 1083°С. Тому, враховуючи необхідність певного перегріву рідкого металу для його розливу, слід приймати для процесу плавлення сталі $T_{\text{т.п}} = 1600 \dots 1650$ °С, а для міді — $T_{\text{т.п}} = 1150 \dots 1200$ °С. Вивести з печі і розлити рідкий метал за нижчих темпера-

тур неможливо, а більший перегрів недоцільний у зв'язку із збільшенням угару та частковим випаровуванням металу, погіршенням теплосприймання металом у робочій камері та підвищеними питомими втратами енергоресурсів.

Первинна рудна плавка ускладнюється відновленням оксидів металів та шлакоутвореннями, що однак позначається на балансі теплоти плавильної печі і не впливає на кінцеву температуру технологічного продукту $T_{т.п}$.

Термохімічні процеси також характеризуються певною температурою $T_{т.п}$, що виявляється найбільш очевидним при видачі з печі твердого чи рідкого продукту, який відповідає заданим вимогам та технічним умовам. Наприклад, безоксидна теплова переробка вугілля хоч і можлива в широкому інтервалі температур, проте:

а) процес напівкоксування розрахований в основному на одержання штучного газу і смол, найбільш ефективний і здійснюється за кінцевої температури цих продуктів $T_{т.п}=650...750^{\circ}\text{C}$;

б) процес коксування на металургійний кокс — при $T_{т.п}=1150...1200^{\circ}\text{C}$.

Менш певною, але лише на перший погляд, є температура продукту $T_{т.п}$ для високотемпературних теплотехнологічних процесів при виробленні того чи іншого газу для наступної технологічної переробки. Так, спалювання сірки колчедану на сірчастий газ для використання його в сірчанокислотному виробництві можливе в дуже широких межах зміни температур, починаючи від вельми тривалого самоокиснення сірки в штабелях колчедану ($\text{FeS}+\text{FeS}_2$) при $T=100...200^{\circ}\text{C}$ і закінчуючи високошвидкісним (за частки секунди) її спалюванням в циклонній камері при $T_{т.п}=1350^{\circ}\text{C}...1400^{\circ}\text{C}$. Проте й тут існують досить певні температурні параметри процесу спалювання колчедану, який може відбуватися в двох істотно різних варіантах:

а) при твердому недогарку — в обпалювальних печах (механічних, киплячого шару та факельних) за температури недогарка в межах $800...850^{\circ}\text{C}$. Вища температура недопустима, тому що це може призвести до шлакування ро-

бочої камери, а нижча температура недопустима через різке зниження питомої продуктивності по кінетичних факторах;

б) при плавленні недогарка, наприклад у циклонній камері за використання високотемпературного та збагаченого киснем дуття.

За температури недогарка 1350...1400°C забезпечується багатократне підвищення питомої продуктивності процесу. За нижчої температури розплаву не забезпечується безперебійна його евакуація з робочої камери, а за вищої температури (1400...1500°C) швидкість процесу практично не підвищується.

Тому є всі підстави розрізняти два окремі варіанти виробництва сірчастого газу: при $T_{т.п.}=800...850^{\circ}\text{C}$ із твердим та при $T_{т.п.}=1350...1400^{\circ}\text{C}$ з розплавленим недогарком. Температурний рівень при цьому позначається на загальній економіці процесу, в тому числі на більш повному використанні пічних газів, які нагріваються за рахунок екзотермічного тепловиділення під час обпалюванні початкового технологічного матеріалу, в даному разі сірчастого колчедану.

Таким чином, *найоб'єктивнішим та цілком певним визначальним параметром усіх високотемпературних теплотехнологічних процесів є температура технологічного продукту $T_{т.п.}$, що видається з печі.* Температури нагрівальних газів та футеровки робочої камери можуть змінюватися в широких межах і тому не мають об'єктивного суттєвого значення.

2.4. Температурний рівень високотемпературного теплотехнологічного процесу

Високотемпературні теплотехнологічні процеси дуже часто здійснюються як вогнетехнічні, тобто з використанням у ролі теплоносія продуктів згоряння, що утворюються від спалювання органічного палива в робочій камері печі або в окремій топці. Конкретний вогнетехнічний процес проходить на певному температурному рівні.

Під *температурним рівнем процесу* розуміють середню температуру продуктів згоряння $T_{п.з}$ в робочій камері установки, яка може бути виражена такою залежністю:

$$\bar{T}_{п.з} = \sqrt{\beta T_T T_{т.г}} > T_{т.п}, \quad (2.4)$$

де T_T — теоретична температура горіння, К; $T_{т.г}$ — температура технологічних газів, які виводяться з робочої камери, К; $T_{т.п}$ — температура технологічного продукту, який виводиться з робочої камери, К; β — коефіцієнт сумішоутворення, що залежить від виду палива, та паливо-спалювального обладнання, коливається в межах 0,68...0,96.

Середня величина $\bar{T}_{п.з}$ однозначно впливає на продуктивність печі. Зростання різниці температур продуктів згорання ($\bar{T}_{п.з}$) та поверхні матеріалу (T_M), що нагрівається, ($\Delta T = \bar{T}_{п.з} - T_M$) збільшує кількість теплоти, що передається на поверхню матеріалу, а це і визначає продуктивність печі. Цим пояснюється намагання підвищувати температурний рівень процесу в технологічних печах.

За інших однакових умов $\bar{T}_{п.з}$ можна підвищити за рахунок зростання T_T , тобто застосовуючи висококалорійне паливо та високотемпературний нагрів повітря для дуття (іноді застосовується нагрів палива та кисневе дуття).

За сталих значень β , Q_H^p , підігріву палива та повітря, підвищення $\bar{T}_{п.з}$ можливо досягти лише за рахунок збільшення $T_{т.г}$.

Проте із зростанням $T_{т.г}$ збільшується кількість теплоти, що відводиться із робочої камери з технологічними газами. Тобто, в цьому разі знижується частка використання теплоти, що підводиться в робочу камеру, та зростає доцільність використання теплоти технологічних газів, що виводяться з робочої камери, в інших установках.

2.5. Основні умови розвитку високотемпературних процесів у промислових теплотехнологічних установках

Такими основними умовами є:

- а) досягнення необхідного температурного рівня;
- б) надання факелу (полум'ю) певних радіаційних властивостей;
- в) створення певної газової атмосфери.

Усе це і визначає основні вимоги до організації процесу генерації теплоти в промислових печах та впливу на матеріал теплотою.

Досягнення необхідного температурного рівня в конкретних високотемпературних теплотехнологічних процесах, як вказувалось раніше, потребує сам технологічний процес, інакше здійснити його просто неможливо. Так у мартенівській печі факел має температуру близько 2000°C , розжарений кокс у горні доменної печі — близько 1800°C тощо. Для встановлення високих температур (особливо для плавлення металів та їх нагрівання) потрібна певна техніка спалювання палива в тому чи іншому агрегаті. Для створення високих температур у горні доменної печі спалюють кокс певної якості, а повітря, необхідне для горіння, підігрівають в регенеративних повітропідігрівниках (кауперах) до $t_{\text{пов}}^{\text{гар}}=1000\dots 1200^{\circ}\text{C}$. Часто повітря збагачують киснем — вміст кисню збільшують з 21% за об'ємом (у природному повітрі) до 30 — 35% і більше; вміст баластного азоту в продуктах згоряння при цьому зменшується, а їхня температура відповідно зростає.

Для організації високотемпературних теплотехнологічних процесів *надзвичайно важливо ту теплоту, що виділяється при згорянні палива, максимально передати матеріалу, що нагрівається в робочій камері*. Найкраще це здійснити, використовуючи випромінювальну здатність факела $E_{\text{ф}}$, яка визначається ступенем його чорноти $\varepsilon_{\text{ф}}$ та температурою факела в четвертому степені $T_{\text{ф}}^4$:

$$E_{\text{ф}}=f(C_0, \varepsilon_{\text{ф}}, T_{\text{ф}}^4), \quad (2.5)$$

де C_0 — коефіцієнт випромінювання абсолютно чорного тіла.

Ступінь чорноти факела $\varepsilon_{\text{ф}}$ залежить від концентрації випромінювальних газів — CO_2 , SO_2 , H_2O , товщини випромінювального шару, концентрації сажистого вуглецю у факелі та його температури.

При спалюванні палива, що не дає світного полум'я (природний газ, генераторний газ), щоб надати факелові світності його карбюють, тобто додають смоли чи мазут, які мають у своєму складі великий вміст високомолекулярних вуглеводнів. Останні розпадаються з виділенням дис-

персного вуглецю, який і надає факелу необхідної світності. Іноді застосовують самокарбюрацію природного газу (частину газу спалюють при $\alpha < 1$). Теплота, що виділяється при цьому, спричинює розкладання вуглеводнів з виділенням сажистого вуглецю, який потім спалюється в світному факелі.

Згідно з умовами технологічних процесів у технологічних камерах необхідно підтримувати газову атмосферу з певними властивостями: окисну, нейтральну або відновну.

Окисне газове середовище (наявність в технологічних газах кисню) необхідне в сталеплавильних агрегатах, де з розплавленого чавуну випалюють вуглець.

Нейтральне газове середовище необхідне при нагріванні металу, щоб уникнути окиснення (угару) та видалення вуглецю з поверхневого шару сталі за рахунок взаємодії водяної пари, CO_2 та O_2 з металом. У сучасних печах для термообробки металу робочий простір заповнюється спеціальними захисними газами, які виключають можливість окиснення чи видалення вуглецю з поверхневого шару виробів.

Відновне середовище застосовується в доменному процесі. До складу газової атмосфери домни мають входити в достатній кількості CO та H_2 , які необхідні для відновлення заліза з руди. Як відновник широко використовуються вуглеводневі сполуки. Продукти неповного згоряння в полум'ї створюють відновну атмосферу.

Слід зазначити, що для окремих технологічних процесів потрібні інші умови, пов'язані з їхніми особливостями.

Контрольні запитання

1. Дайте означення хімічних перетворень матеріалів, що відбуваються в печах; наведіть приклади таких перетворень.
2. Дайте означення фізико-хімічних перетворень матеріалів, що відбуваються в пічних установках.
3. Як визначити загальну реакційну теплоту конкретної хімічної реакції, що перебігає у високотемпературній установці?

4. Дайте означення таких понять, як тепловий і температурний режим у печах.
5. Що розуміють під оптимальним температурним режимом процесу?
6. Охарактеризуйте умови, які забезпечують нормальний процес горіння палива чи його вибух у робочій камері печі.
7. Охарактеризуйте зміст визначального температурного параметра теплотехнологічного процесу як його найоб'єктивнішу температурну характеристику.
8. Від яких факторів залежить температурний рівень високотемпературного процесу? На які показники роботи печі він впливає?
9. Назвіть основні умови розвитку (організації) високотемпературного процесу в промислових печах.
10. Яким чином факелу (полум'ю) в робочій камері можна надати необхідних радіаційних властивостей? Яка в цьому потреба?
11. З якою метою в робочих камерах деяких печей створюють необхідну газову атмосферу?

ОРГАНІЗАЦІЯ ПРОЦЕСІВ ГЕНЕРАЦІЇ ТЕПЛОТИ У ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНИХ ТЕПЛОТЕХНОЛОГІЧНИХ УСТАНОВКАХ

3.1. Загальні положення

Визначальним процесом у роботі високотемпературних теплотехнологічних установок (ВТУ) є теплообмін під час нагрівання матеріалу чи виробів, інтенсивність якого, а значить, і продуктивність установок намагаються підтримувати на максимально високому рівні. Це досягається за рахунок максимального розвитку радіаційного теплообміну. В свою чергу, радіаційний теплообмін більше проявляється під час генерації теплоти в робочій камері внаслідок спалювання органічного палива, тому що при цьому можливо забезпечити високу температуру факела та значний ступінь чорноти полум'я. З цієї причини більшість ВТУ (промислових печей) — паливні. Крім цього, коефіцієнт використання теплоти вищий у паливних печах, ніж у електричних. Умови горіння палива в різноманітних ВТУ різні, до того ж різні й самі види палива та способи підготовки його до спалювання.

Спалювання органічного палива в топках парогенераторів та в робочих камерах ВТУ має багато спільного, але є й деякі, досить суттєві, відмінності.

Загальні проблеми теорії горіння та методи спалювання палива викладаються в окремому курсі і нижче згадуються лише у зв'язку з особливостями спалювання палива у ВТУ.

Процес спалювання палива має бути найбільш повним при мінімальних механічному та хімічному недопалах.

Повне згоряння палива є найважливішою умовою економічної роботи паливних ВТУ.

Звертаємо увагу на такі основні особливості спалювання палива у ВТУ.

1. Газифікаційні процеси (в газогенераторах та у напівгазових топках) пов'язані з використанням кисню повітря, водяної пари та вуглекислого газу як окисників. Газоподібні продукти газифікації є або кінцевими, або проміжними продуктами. Останнє має місце при двостадійному спалюванні палива, коли спочатку паливо газифікується, продукти газифікації використовуються в конкретному процесі (наприклад, в безокисному нагріванні матеріалу), після чого в цій же установці або за її межами продукти газифікації повністю допалюються і використовуються як теплоносії чи в технологічному процесі, чи в енергетичній установці.

В окремих випадках треба створювати в робочій камері окиснювальну, нейтральну чи відновну атмосферу, для чого використовуються різні методи спалювання палива.

2. У топках парогенераторів паливо спалюється за тиску, близького до тиску атмосферного повітря, а частіше — у слабкому вакуумі (2—3 мм вод.ст.). Однак у доменних печах кокс згоряє за тиску, значно вищого за атмосферний. У переважній більшості ВТУ паливо спалюється за незначного надлишкового тиску (-2—4 мм вод.ст.). Це виключає підсмоктування повітря, а значить зниження температури продуктів згоряння в робочій камері.

3. У промислових печах зазвичай є потреба створити високу температуру, що досягається за рахунок використання високотемпературного нагріву дуттьового повітря або застосування кисневого дуття. За високої температури (вище ніж 1500°C, а особливо 2000°C і вище) у робочій камері печі відбувається дисоціація молекул діоксиду вуглецю (CO_2) та водяної пари (H_2O), котра супроводжується поглинанням теплоти.

4. Особливості процесу горіння палива виникають також при потребі створити в робочій камері печі умови для певного виду теплообміну, відповідного заданому технологічному процесу.

У цьому разі треба використовувати певні види палива та спеціальні конструкції пальників, створюючи особливі умови сумішоутворення палива та окисника, дотримуватись співвідношення швидкостей їх подачі в пальники та на виході з них для формування довжини та форми факела тощо. Іноді є потреба створити рівномірну температуру в робочій камері, наприклад, під час випалювання керамічних виробів, коли необхідно сформувати розтягнутий факел змішуванням горючих газів із вторинним повітрям (уповільнене змішування).

Не всі види палива рівноцінно можуть застосовуватись у високотемпературних теплотехнологічних процесах. Найширше використовуються рідкі та газоподібні види палива.

3.2. Механізм процесу горіння

Механізм процесу горіння відомий. Нижче наведемо окремі елементи цього механізму, що мають особливе значення для спалювання палива в робочих камерах ВТУ (промислових печей).

Відомо, що процеси згоряння палива поділяються на гомогенні, які здійснюються в об'ємі, коли паливо та окисник знаходяться в однаковому фазовому стані, та гетерогенні, які здійснюються на поверхні твердого вуглецю.

Горіння палива являє собою складний фізико-хімічний процес окиснення горючих елементів палива. Хімічні реакції здійснюються за умови, що молекули, які стикаються між собою, володіють певною енергією активації. Такий запас енергії достатній для зруйнування або послаблення внутрішньомолекулярних зв'язків. Найбільшу енергію активації мають вільні атоми та нестійкі речовини, які являють собою проміжні сполуки, що виникають у процесі хімічних перетворень в ланцюгових реакціях. Такі реакції є характерними для процесу горіння палива. Активізації молекул та атомів сприяє висока температура, електричні розряди та низка інших фізичних явищ.

Деякі речовини слугують каталізаторами, тобто прискорюють ланцюгову реакцію горіння (водяна пара, вуглекислий газ тощо); інші речовини — інгібітори, сповільнюють

її (шматочки твердого палива, частинки попелу та інші тверді речовини). Для підтримання процесу горіння необхідно безперервно підводити компоненти горіння, тобто горючі речовини та окисник, а також забезпечити в робочій камері температуру, не нижчу від температури займання газової суміші.

3.2.1. Кінетична та дифузійна області горіння. Повний період спалювання палива $\tau_{\text{п}}$ складається з часу, необхідно-го для забезпечення безпосереднього контакту горючої речовини та окисника (сумішоутворення) $\tau_{\text{су}}$, та часу на здійснення власне самої хімічної реакції $\tau_{\text{х.р}}$, тобто $\tau_{\text{п}} = \tau_{\text{су}} + \tau_{\text{х.р}}$.

Якщо $\tau_{\text{су}} \gg \tau_{\text{х.р}}$, то процес горіння палива визначається часом сумішоутворення і протікає в дифузійній області горіння (сумішоутворення визначається швидкістю дифузії окисника до горючих речовин палива). Якщо ж $\tau_{\text{су}} \ll \tau_{\text{х.р}}$, то процес протікає в кінетичній області (визначається швидкістю хімічної реакції горючих речовин палива та окисника). У цьому разі $\tau_{\text{п}}$ визначається в основному швидкістю хімічних реакцій. Залежно від способу подачі горючих газів та окисника в робочу камеру печі та умов їх змішування можливі дифузійний, кінетичний та змішаний принципи процесу горіння.

Дифузійний принцип спалювання встановлюється при відокремленій подачі в топку (робочу камеру) горючого газу та окисника. У робочому просторі печі температура, як правило, перевищує 1100—1200°C, тому швидкість хімічної реакції велика. Тут дотримується умова $\tau_{\text{су}} \gg \tau_{\text{х.р}}$. Змішування горючих речовин з окисником відбувається внаслідок турбулентного перемішування та дифузії. Визначальним фактором горіння в таких умовах є швидкість перемішування компонентів горіння. Процес змішування може відбуватися в області ламінарної чи турбулентної течії. В першому випадку змішування визначається молекулярною дифузиею, а в другому — турбулентною дифузиею. Турбулентна дифузія спричиняє глибоке перемішування значних об'ємів компонентів горіння. Тонке перемішування досягається за рахунок молекулярної дифузії. Таким чином і

при ламінарному, і при турбулентному перемішуванні суттєве значення має молекулярна дифузія.

Кінетичний принцип спалювання має місце в тому разі, коли через палик в топкову камеру подається попередньо підготовлена однорідна горюча суміш. Тому $\tau_{\text{п}}$ визначається практично швидкістю здійснення хімічних реакцій. Як правило, факел полум'я за кінетичного спалювання формується як короткий (безполуменеве горіння).

Змішаний принцип спалювання проявляється тоді, коли в робочий простір печі подається горючий газ, попередньо змішаний з частиною повітря, необхідного для горіння (первинне повітря), який змішується з відокремленим підводом у робочий простір іншої частини повітря (вторинне повітря). Повний час спалювання палива визначається швидкістю найбільш повільного етапу горіння — кінетичного чи дифузійного.

3.2.2. Факельний процес спалювання газоподібного палива. У паливних промислових печах використовується факельний спосіб спалювання газоподібного та рідкого палива. При цьому виняткове значення має механіка (характер руху) газів.

Розглянемо витікання струмини газу *A* (рис.3.1) через круглий отвір у великий об'єм газу *B*. Струмина газу на виході з отвору і далі під час свого руху захоплює найближчі до неї шари газу *B*, збільшуючи при цьому кількість рухомого газу в струмені з віддаленням від отвору. А оскільки загальна кількість руху має залишатися сталою, то швидкість руху газу *A* на периферії струмини має зменшу-

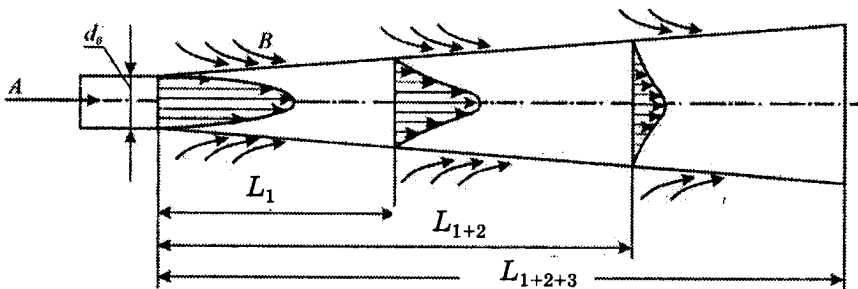


Рис. 3.1. Схема вільної струмини газу

ватись. Тому рух газу в поперечному перетині струмини нерівномірний: на осі струмини швидкість більша, а на периферії менша, де й відбувається захоплення нерухомого газу B .

З віддаленням від вхідного отвору перемішування газів посилюється, поступово досягаючи осі струмини.

Струмина за рахунок захоплювання нових порцій газу B поступово розширюється і набуває форми конуса.

За довжиною струмини можна виділити три характерні ділянки:

1. Початкова ділянка — L_1 : вздовж осі знаходиться лише газ A , газ B (повітря) не досягає осі струмини. Експериментально встановлено, що

$$L_1 = (5,6 \dots 6) d_0. \quad (3.1)$$

2. Друга ділянка — L_{1+2} : тут перемішування газів прогресує. До кінця другої ділянки вміст у струмині газів — компонентів горіння A і B — відповідає стехіометричному співвідношенню. Однак суміш газів неоднорідна: у центральному ядрі наявний надлишок горючого газу, а в периферійній частині — надлишок повітря. Тому повне згоряння тут неможливе.

3. На третій ділянці L_{1+2+3} завершується процес перемішування газів, тобто створюються умови для завершення процесу горіння.

Сумарну довжину першої та другої ділянок факела можна визначити за формулою

$$L_{1+2} = 3,16 \left(1 + \frac{v_{\text{пов}} \cdot \rho_{\text{пов}}}{\rho_{\text{г}}} \right) d_0. \quad (3.2)$$

Сумарна довжина трьох ділянок факела, тобто довжина факела, визначається формулою

$$L_{1+2+3} = 11,0 \left(1 + \frac{v_{\text{пов}} \cdot \rho_{\text{пов}}}{\rho_{\text{г}}} \right) d_0, \quad (3.3)$$

де $v_{\text{пов}}$ — об'єм повітря (м^3), необхідний для спалювання 1 м^3 газу, $\text{м}^3/\text{м}^3$;

$\rho_{\text{пов}}$ — густина повітря, $\text{кг}/\text{м}^3$;

$\rho_{\text{г}}$ — густина газу, $\text{кг}/\text{м}^3$;

d_0 — діаметр вхідного отвору, м .

Довжина факела залежить від низки факторів. Знаючи

ці фактори, можна змінювати довжину і положення факела в робочій камері, що надзвичайно важливо для керування процесом теплообміну в промислових печах.

Довжина факела прямо пропорційна діаметру вхідного отвору d_0 , тобто калібру пальника, та теплотвірній здатності газу Q_H^p (з ростом Q_H^p збільшується $v_{пов}$).

Довжина факела скорочується внаслідок:

1) збагачення дуття киснем (при цьому скорочується довжина зони захвачування необхідної для горіння кількості кисню і перемішування його з горючим газом);

2) підвищення температури горючого газу, що надходить у пальник (це пояснюється збільшенням об'єму газу під час його нагрівання, а значить ростом швидкості витікання газу з устя пальника і відповідно посиленням турбулентного перемішування газу та повітря);

3) збільшення кількості повітря, що подається в робочий простір печі (за рахунок зростання коефіцієнта витрати повітря).

Швидкість виходу газової струмینی з устя пальника також впливає на довжину факела. В ламінарній області течії довжина факела збільшується пропорційно тепловому навантаженню (q_v , МВт/м³) робочої камери (швидкості витікання горючого газу). У турбулентній області течії довжина факела майже не залежить від теплового навантаження. Це пояснюється тим, що із зростанням швидкості витікання газу пропорційно посилюється турбулентне перемішування газу та повітря. Ці фактори в певній мірі зрівноважують один одного.

Якщо витікання газової струмینی відбувається в повітря, що рухається паралельно газовому потоку, то довжина факела різко скорочується (що на практиці завжди має місце) і факел стає більш жорстким. Зростання швидкості повітря в пальникових пристроях є потужним засобом для скорочення довжини факела, а значить підвищення його жорсткості і настильності.

Газодинамічними критеріями пальників є відношення швидкостей повітря та газу $w_{пов}/w_r$ і відношення їх кінетичних енергій $(\rho_{пов}w_{пов}^2/2)/(\rho_r w_r^2/2)$. Ці параметри вплива-

ють на інтенсивність горіння, а значить на довжину факела. На інтенсивність горіння також значно впливають різні завихрювачі в пальникових пристроях, які забезпечують високу рівномірність сумішоутворення.

Залежність довжини факела від кута зустрічі повітряного та газового потоків α за різних відношень швидкостей цих потоків показана на рис. 3.2; де L_0 — довжина факела при $\alpha=0$; L_α — довжина факела при певному значенні кута α . Укорочення факела при зростанні кута зустрічі α пов'язано з посиленням турбулізації струменя, тобто з інтенсифікацією перемішування.

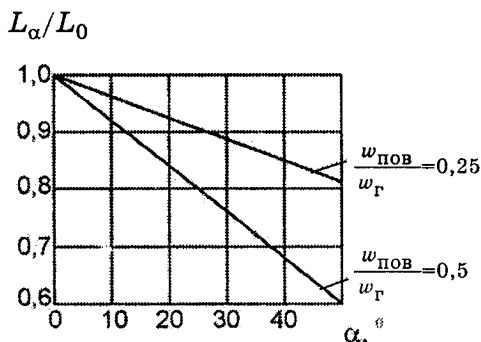


Рис. 3.2. Залежність довжини факела від кута α зустрічі повітряного та газового потоків:

$w_{\text{пов}}$ — швидкість повітряного потоку, м/с; $w_{\text{г}}$ — швидкість газового потоку, м/с

руднений. Тому при розрахунках факела доводиться користуватися експериментальними даними.

Швидкість горіння на практиці визначають за величиною теплової напруги об'єму зони горіння (топкового простору):

$$q_v = \frac{Q}{V_T}, \quad (3.4)$$

де Q — кількість теплоти що виділяється в топковому просторі, МВт; V_T — об'єм топкового простору, м³.

Теоретично теплові напруги можуть бути дуже високими — до 50 МВт/м³. Насправді ці напруги в камерних топках парових котлів становлять $q_v = 0,2 \dots 0,4$ МВт/м³, а в промислових печах — до $0,35 \dots 1,2$ МВт/м³ і тільки в циклонних камерах вони досягають значень $6,5 \dots 12$ МВт/м³. Це вказує на те, що топкові об'єми використовуються в основному для підготовчих процесів, а для власне горіння таких великих об'ємів не потрібно.

3.3. Особливості спалювання газоподібного палива

Спалювання газоподібного палива здійснюється в топкових пристроях. Вони складаються з газових пальників та камери згоряння.

Для забезпечення високої температури в промислових печах робоча камера, як правило, одночасно є і камерою згоряння.

Призначення газових пальників: 1) підготовка змішування газу та повітря (окисника); 2) подача газоповітряної суміші в робочий простір у заданому напрямку; 3) забезпечення займання газоподібної суміші при будь-яких теплових навантаженнях; 4) створення факела необхідної довжини та випромінювальної здатності; 5) створення необхідної інтенсивності горіння; 6) забезпечення повного згоряння газу.

Вибір типу пальника визначається технологічним процесом, який здійснюється в печі, конструкцією печі та властивостями газу, що спалюється.

Пальники класифікуються по способу змішування газу з повітрям, що в свою чергу визначає довжину факела (рис.3.3). За цією ознакою пальники об'єднують у такі групи:

1) *Довгополум'яні пальники* (із зовнішнім змішуванням газу та повітря). У камеру надходять відокремлені потоки газу та повітря. Так працюють дифузійні пальники (рис. 3.4). Горіння тут практично є повністю дифузійним. Такий факел може мати високу випромінювальну здатність.

Застосувати такий пальник доцільно тоді, коли тепловиділення факела має бути розтягнуте по довжині робочого простору печі, наприклад, у мартенівських та методичних нагрівальних печах. Мартенівські печі, що працюють на коксодоменній суміші, облаштовані довгополум'яними пальниками типу Вентурі. Широко застосовуються пальники типу "труба в трубі" або, як їх ще називають — двохпровідні пальники. Їх робота у значній мірі залежить від правильного вибору співвідношення швидкостей газу та повітря у вихідних отворах пальників.

2) *Короткополум'яні пальники* (із частковим внутрішнім змішуванням газу та повітря). У такому пальнику змі-

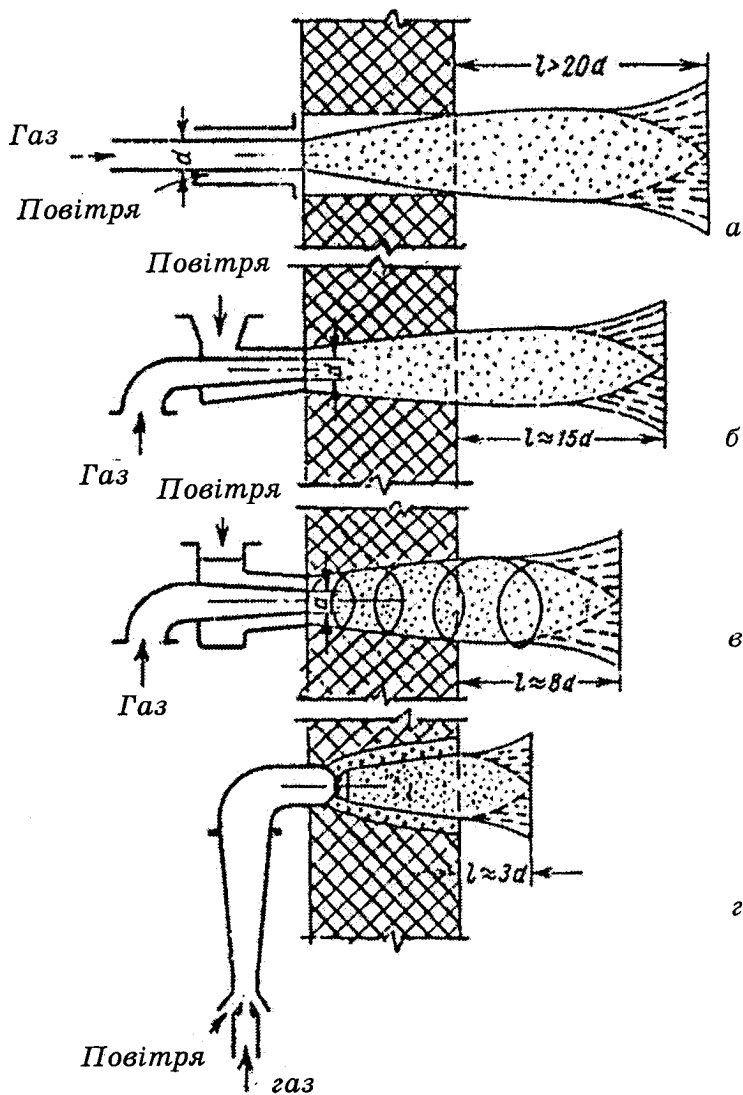


Рис. 3.3. Довжина факела залежно від конструктивної схеми газових пальників:

а — дифузійний пальник; б — довгополум'яний пальник; в — короткополум'яний турбулентний пальник; г — безполум'яний інжекційний пальник

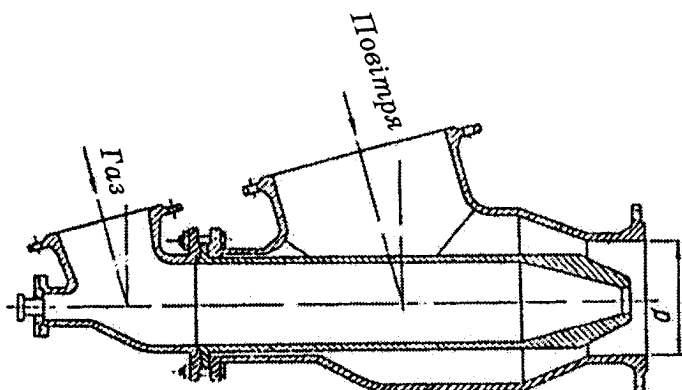


Рис. 3.4. Дифузійний двоохвідний пальник (труба в трубі)

шування не завершується, а продовжується в об'ємі факела. За таким принципом працюють змішувальні пальники (наприклад, турбулентні), в яких довжина факела зменшується і залежить від якості попереднього змішування в

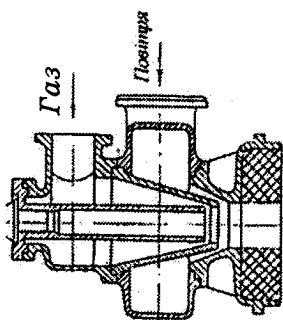


Рис. 3.5. Турбулентний (короткопалум'яний) пальник Стальпроєкту

димого полум'я. Факел у цьому разі має слабку випромінювальну здатність.

Безполум'яні пальники для газоподібного палива забезпечують найвищу температуру горіння, тому що ретельне попереднє змішування палива з повітрям дає змогу забезпечити повне згоряння при мінімальному коефіцієнті витрати повітря. Безполум'яні пальники застосовуються, як правило, для спалювання низькокалорійних газів, які не да-

межах пальників (рис. 3.5).

3) *Безполум'яні пальники* (із повним внутрішнім змішуванням газу та повітря). У піч подається і спалюється попередньо підготовлена горюча суміш. Процес горіння має кінетичний характер і не дає

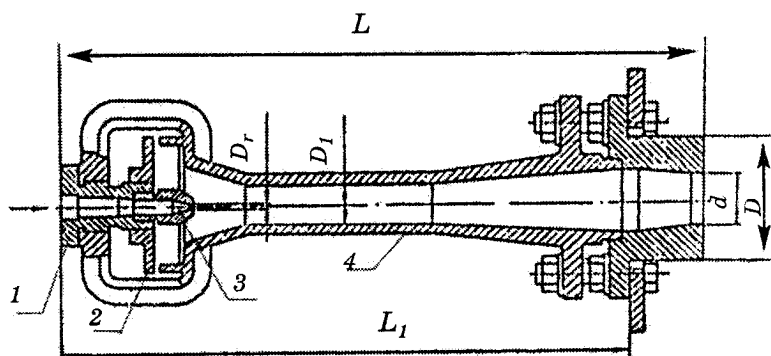


Рис. 3.6. Безполум'яний інжекційний пальник Стальпроєкту:
 1 — вхідний патрубок для подачі газу; 2 — шайба для регулювання підсмоктування повітря; 3 — сопло для виходу газу; 4 — змішувач пальника

ють світного полум'я (рис. 3.6). До того ж і газ, і повітря можуть бути підігрітими. Як правило, температура суміші має не перевищувати 300...400°C. Слід звернути увагу на те, що швидкість горючої суміші на виході з пальника має перевищувати швидкість розповсюдження полум'я в 2—3 рази. Це необхідно для того, щоб не допустити проскакування полум'я в змішувальну трубу, що може призвести до вибуху суміші.

Газові пальники також класифікуються за тиском газу, що надходить у пальники. Розрізняють пальники низького тиску — $p_r \leq 5 \text{ кН/м}^2$ (0,05 бар \approx 500 мм вод. ст.), середнього тиску — $p_r = 5 \dots 300 \text{ кН/м}^2$ (0,05...3,0 бар) та високого тиску

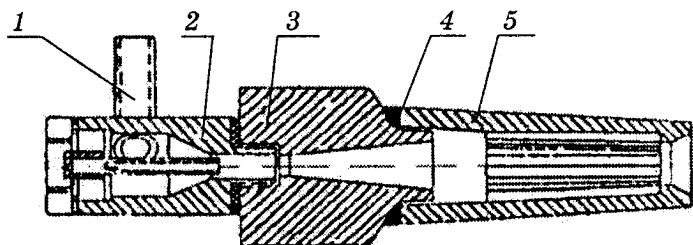


Рис. 3.7. Пальник з високою швидкістю витікання газоповітряної суміші:

1 — тангенціальне введення газоповітряної суміші; 2 — металевий корпус; 3 — сопло з вогнетривкого матеріалу; 4 — вогнетривке ущільнювальне кільце; 5 — камера згоряння з вогнетривкого матеріалу

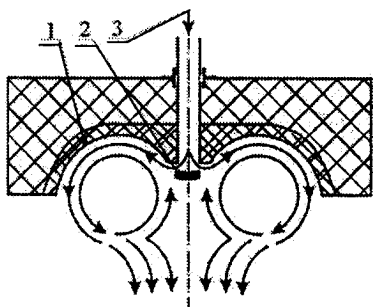


Рис. 3.8. Плоскополум'яний керамічний пальник:

- 1 — керамічна вставка сферичної форми;
 2 — розсікач;
 3 — паливна суміш

— $p_r > 300 \text{ кН/м}^2$ ($> 3 \text{ бар}$). Окремо виділяють пальники для холодних та для нагрітих компонентів згорання. Крім цього, пальники бувають металеві, керамічні або цегляні.

Для промислових печей за певних умов використовують спеціальні типи газових пальників:

а) пальники з високою швидкістю витікання полум'я ($\sim 200 \text{ м/с}$) на виробі, що нагріваються (атакуючі пальники). Вони дають змогу здійснювати швидкісне нагрівання виробів за рахунок конвективної тепловіддачі на поверхню цих виробів (рис. 3.7);

б) плоскополум'яні пальники (рис. 3.8), за допомогою яких можна здійснювати згорання газу в тонкому шарі що безпосередньо прилягає до кладки склепіння печі. Полум'я формується плоским і поширюється по значній площі поверхні кладки. Важливою перевагою такого пальника (безполум'яного спалювання) є своєрідна рециркуляція газів у внутрішній порожнині пальника. Як видно з рис. 3.8, циркуляційні зони досить малі за розмірами і живляться за рахунок газів дуже високої температури, які потрапляють у циркуляційну зону зразу після виходу їх за межі керамічної поверхні пальника.

Такі пальники встановлюються на склепіннях печей при непрямому направленому радіаційному режимі теплообміну, досить ефективному для нагрівальних печей прокатного та ковальського виробництва;

в) рекуперативні пальники для безокисного нагріву (рис. 3.9), в яких повітря нагрівається до 800°C за рахунок відбору розжарених газів із топкової камери за допомогою інжектора. Пальники виготовляються із жаростійких сплавів і мають ребра для збільшення поверхні нагрівання з повітряного боку;

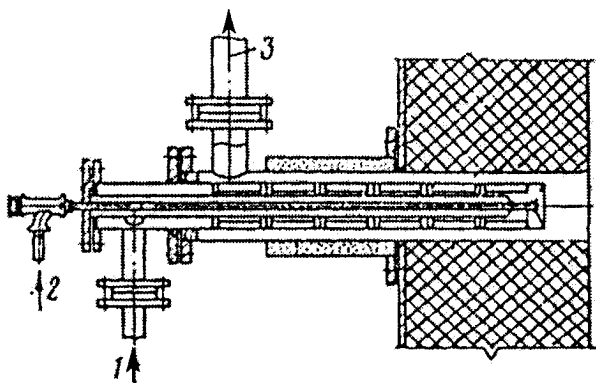


Рис. 3.9. Рекуперативний пальник для безокисного нагрівання:
 1 — подача повітря; 2 — подача газу; 3 — відсмоктування газу
 із зони горіння

г) пальники з електричним нагрівом повітря, в яке вводяться іонізуючі присадки. На рис. 3.10 показано такий пальник, який дає змогу створити в печі температуру до 2750°C.

Ще більш високої температури (3000°C) можна досягти в електрогазовому пальнику накладанням на факел електричного змінного поля (рис. 3.11). За продуктивності пальника 0,3 МВт необхідна електрична потужність всього 100 кВт при напрузі 10 кВ. За високої температури продукти згоряння іонізуються і стають електропровідними.

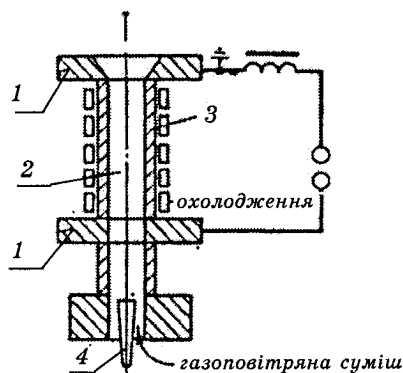


Рис. 3.10. Пальник з електричним нагрівом:
 1 — електрод; 2 — газовий канал;
 3 — керамічна труба; 4 — запальник

Якщо в робочому просторі печі немає умов для правильного спалювання горючих газів (наприклад, у шахтних печах), то вони спалюються у вихрових пальниках з форкамерою (рис. 3.12). Закручування повітряного потоку досягається за допомогою вставки або завитка для підведення повітря та тангенціальної подачі газу в потік повітря, що закручується. В камері створюються

дуже високі температури, тому її вкривають шаром високовольтної обмазки і забезпечують примусове охолодження (водяне чи випарне).

Аналогічний процес відбувається в циклонних камерах, котрі широко застосовуються при використанні повітря, нагрітого до високої температури. У печах безокисного нагріву сталейних заготовок циклонні камери використовуються як топки для реформації природного газу, тобто для отримання захисного газу шляхом спалювання його з коефіцієнтом витрати повітря $\alpha=0,4...0,6$.

Як топки для реформації природного газу використовуються топки з киплячим шаром проміжного інертного теплоносія (шамотний, корундовий, карборундовий дрібняк).

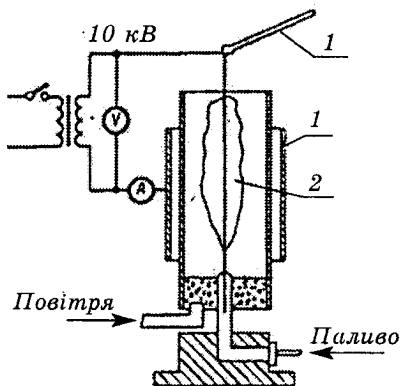


Рис. 3.11. Принцип дії пальника з накладеним на факел електричним полем:
1 — електрод; 2 — факел

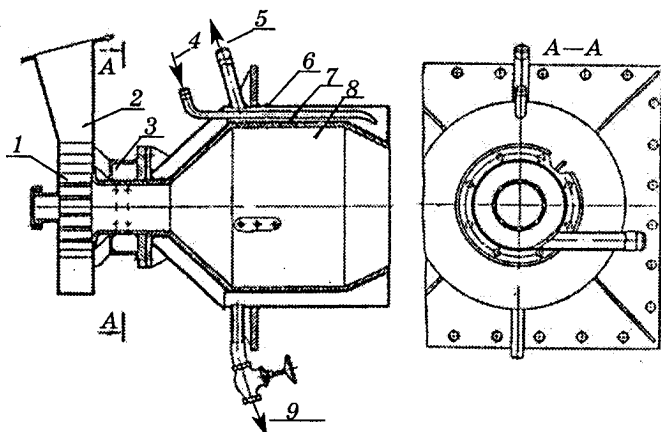


Рис. 3.12. Вихровий газовий пальник для спалювання газу:
1 — корпус повітряного завитка; 2 — завихрювач повітря; 3 — газова коробка з отворами для виходу газу; 4 — підведення води; 5 — відведення води; 6 — сорочка водяного (або випарного) охолодження; 7 — футеровка камери; 8 — камера згоряння; 9 — зливання шламу

У таких топках внаслідок особливостей киплячого шару процес реформації проходить стійко при широкій зміні коефіцієнта витрати повітря — $\alpha=0,1...0,5$.

3.4. Особливості спалювання рідкого палива

Мазут, як правило, використовується у високотемпературних теплотехнологічних установках досить широко в тих випадках, коли необхідно створити світний факел різної потужності та довжини.

Калорійність мазуту досить висока ($Q_R \approx 38000$ кДж/кг) і визначається складом його робочої маси ($С^P \approx 85\%$, $Н^P \approx 10\%$, інші речовини $\approx 5\%$). Мазут подається в топку чи робочу камеру в розпиленому стані, де його краплі нагріваються і випаровуються. Інтенсивність випаровування пропорційна загальній поверхні мазутних крапель. Тому тонкість розпилювання мазуту має виняткове значення для повноти його спалювання.

У реальному факелі окремі його ділянки мають різні коефіцієнти витрати повітря (α) та різні температури (t_{ϕ}). За нестачі окисника після випаровування мазуту відбувається термічне розкладання вуглеводнів. За температури до 800°C розкладання відбувається з утворенням найпростіших вуглеводнів, які порівняно легко окиснюються до CO_2 і H_2O . За вищих температур розкладання відбувається з утворенням важких високомолекулярних вуглеводневих комплексів аж до сажистого вуглецю, які спалюються з великими труднощами, а мазутний факел стає світним.

Мазути поділяються на малосірчасті ($S^P \leq 0,5\%$), сірчасті ($S^P = 0,5...2,0\%$) та високосірчасті ($S^P = 2,0...3,5\%$). Утруднюється або навіть виключається застосування високосірчастих мазутів у сталеплавильних печах та при термообробці металів, тому що дифузія сірки в метал в умовах високих температур різко погіршує його якість. На нафтоперегонних заводах можливо понизити вміст сірки до $0,5...1,0\%$. Проте вартість здійснення цього процесу досить висока.

Під час спалювання високосірчастих мазутів до складу продуктів згоряння входить SO_2 та невелика кількість SO_3 . Останнє спричиняє корозійне руйнування металу поверхні

теплообмінників. Найменший вміст SO_3 у продуктах згорання має місце за повного згорання мазуту при мінімальному значенні коефіцієнта витрати повітря α . Якщо спалювання мазуту неповне, то утворюється сажистий (дисперсний) вуглець, який каталітично прискорює реакцію утворення SO_3 за формулою $\text{SO}_2 + 0,5 \text{O}_2 = \text{SO}_3$.

Раціональне використання високосірчастих мазутів може здійснюватись двома шляхами: 1) шляхом повного спалювання мазуту при α , близькому до одиниці, за допомогою найбільш досконалого топкового обладнання; 2) шляхом місцевої газифікації в особливому обладнанні (у передтопках), а також централізованої газифікації. В останньому випадку газ після газогенераторів очищається від сажі та сірководню, після чого спалюється в робочому просторі великих печей, наприклад, в мартенівських печах.

Рідке паливо, як правило, спалюється факельним способом. Розпилювання рідкого палива на дрібні краплини здійснюється в форсунках за рахунок механічної енергії самого струменя рідкого палива або за рахунок енергії повітря чи пари.

У промислових печах застосовують, в основному, форсунки з повітряним чи паровим розпилюванням. Вони поділяються на форсунки низького та високого тиску.

Форсунки низького тиску мають ту особливість, що в них розпилювання здійснюється вентиляторним повітрям порівняно низького тиску — $2,9 \dots 8,8 \text{ кН/м}^2$ (300...900 мм вод. ст.). На розпилювання надходить все повітря, необхідне для горіння. Тиск мазуту перед форсунками $50 \dots 150 \text{ кН/м}^2$ (0,5...1,5 бар), його оптимальна температура $60 \dots 80^\circ\text{C}$.

На рис. 3.13 показано форсунки низького тиску конструкції Стальпроєкту та Карабіна. Вони дають порівняно короткий і широкий факел. Форсунки низького тиску застосовуються за відносно невисокої теплопродуктивності.

У форсунках високого тиску як розпилювач застосовують стиснуте повітря або пару. Рекомендований тиск повітря $600 \dots 800 \text{ кН/м}^2$ (6...8 бар), а витрата на розпилювання 1 кг мазуту становить $0,6 \dots 0,8 \text{ кг/кг}$. Добре зарекомендувала себе форсунка конструкції В. Г. Шухова (рис. 3.14,а). Переріз отвору для мазуту незмінний. Розмір паро-

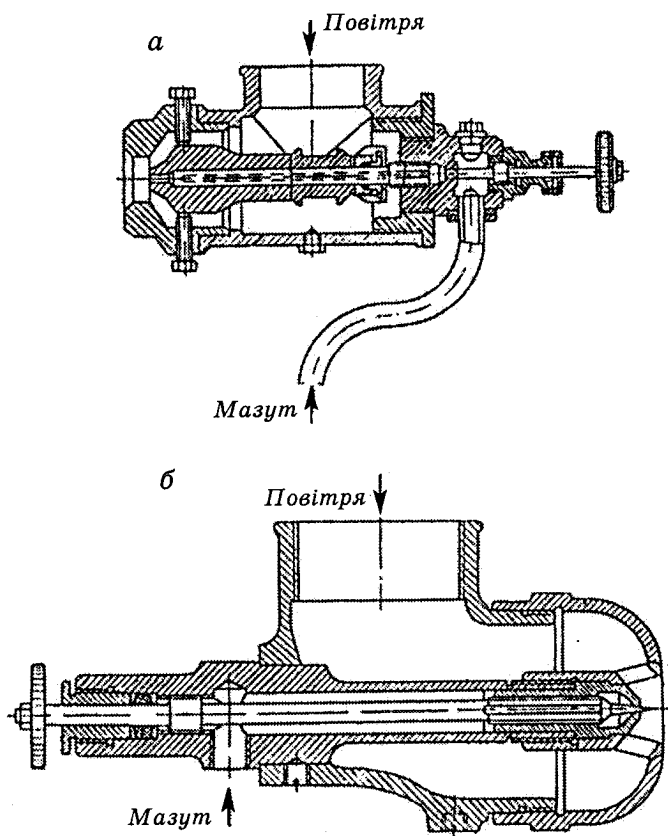


Рис. 3.13. Форсунки низького тиску:
 а — конструкції Стальпроєкту; б — конструкції
 Карабіна

вої (повітряної) щілини регулюється переміщенням мазутної трубки. Факел, який утворюється в таких форсунках, вузький та довгий (від 3 до 7 м). Форсунка пристосована для довгих робочих камер.

Для великих печей, наприклад мартенівських, застосовують форсунки високого тиску, котрі створюють достатньо жорсткий світний факел. Одна з них — форсунка Дніпропетровського металургійного інституту (ДМЕТІ) — показана на рис. 3.14, б.

Мазут і пара (або стиснуте повітря) у цих форсунках над-

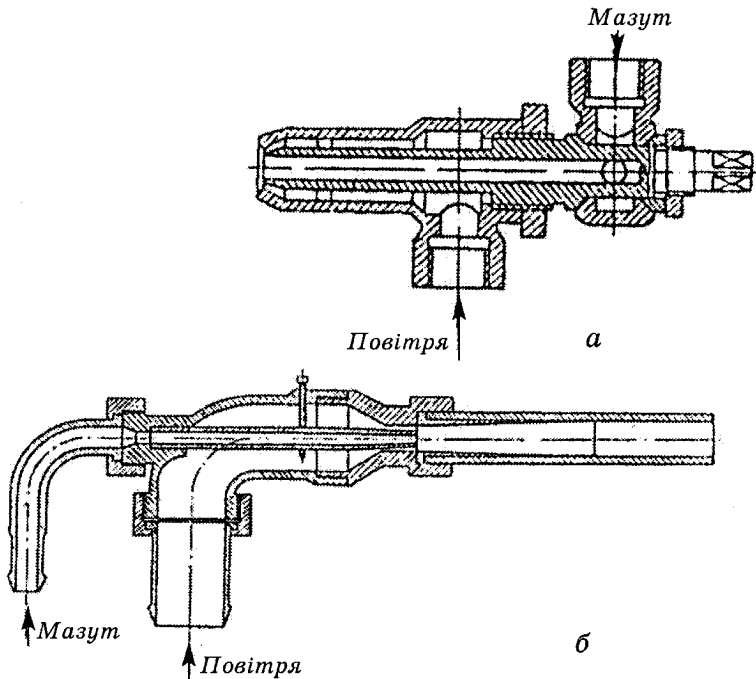


Рис. 3.14. Форсунки високого тиску:

а — конструкції В.Г. Шухова; б — конструкції Дніпропетровського металургійного інституту

ходять у сопло Лаваля, де швидкість двофазної суміші досягає 750 м/с. Мазут добре розпилюється, а форсунка з витрати мазуту має потужність 2,5 т/год.

Механічні форсунки (рис. 3.15) застосовуються в печах невеликої продуктивності. Тиск мазуту перед форсункою 1...2,5 МН/м².

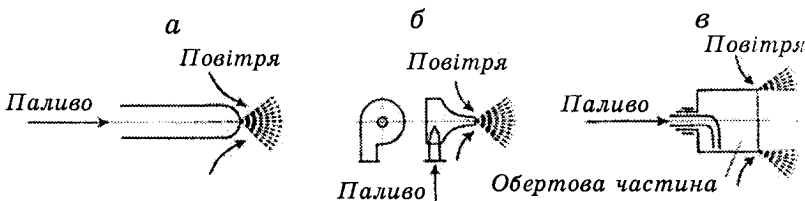


Рис. 3.15. Механічні форсунки:

а — прямоструйні; б — відцентрові; в — обертальні

Найбільш повного спалювання сірчистих мазутів при $\alpha=1,02...1,03$ досягають у циклонних камерах. У них здійснюється попередня газифікація, повнота якої визначається подачею окисника, сумішоутворенням та циркуляцією газів. Звідси й різноманітність конструкцій пальників газифікаторів.

Емульсійні пальники забезпечують спалювання мазуту без сажоутворення. Краплі води, завислі в мазуті при викиді в струмінь (при $t > t_n$), спричиняють вторинне розпилювання. Ультразвукові форсунки забезпечують дуже тонке розпилювання та широкий діапазон регулювання (1...10).

3.5. Особливості спалювання твердого палива

За сучасних умов у промислових печах тверде паливо використовується в значно менших кількостях, ніж рідке чи газоподібне. Тверде паливо з великим виходом летких речовин (торф, буре та кам'яне вугілля) найчастіше використовується для газифікації, щоб одержати штучне газоподібне паливо та кокс, які вже безпосередньо використовуються в паливних печах.

На практиці тверде паливо може спалюватись: у щільному шарі (з різним ступенем механізації); у киплячому шарі; у факелі (для пилоподібного палива); у циклонах та у вихрових топках (для подрібненого палива). Однак найперспективнішим є факельне спалювання та спалювання в киплячому шарі, що дає змогу відносно легко керувати процесом горіння. При цьому слід пам'ятати, що явище шлакування не завжди дає змогу використовувати тверде паливо в промислових печах. Разом з тим факельне спалювання твердого палива має сенс лише для потужних промислових печей (зменшуються витрати на розмелювання палива). Вугільний пил використовується більш тонкого помолу, ніж в енергетиці.

Великі печі зі значними витратами вугілля можуть працювати з установками індивідуального пилоприготування. Якщо в цехах працюють малопотужні печі, то споруджують станцію центрального пилоприготування. При цьому обладнання добирають таким чином, щоб воно забезпечувало приготування добового запасу пилу за 8—16 год роботи.

У печах застосовують пальники типу "труба в трубі". В таких пальниках з вугільним пилом подається 25...35% повітря (первинне повітря) при загальному $\alpha = 1,15...1,20$.

Швидкість пилоповітряної суміші приймається залежно від якості палива та конструкції печі в межах 10...30 м/с. Щоб запобігти відкладанню пилу на горизонтальних ділянках пилопроводів, швидкість пилоповітряної суміші в них підтримується на рівні 18...25 м/с.

Розміщення пальників у печах відповідає загальноприйнятому розміщенню форсунок для рідкого палива.

Контрольні запитання

1. Назвіть основні особливості спалювання палива в робочих камерах високотемпературних теплотехнологічних установок. Чим вони спричинені?
2. Які ви знаєте фактори зростання енергії активації молекул, які вступають у ланцюгову реакцію горіння або сповільнення її?
3. Що впливає на формування довжини факела в промислових печах?
4. Як класифікують газові пальники за довжиною факела?
5. Які спеціальні типи газових пальників і за яких умов застосовуються в паливних печах?
6. В яких умовах використовуються циклонні камери для спалювання палива?
7. Особливості конструкції пальників для спалювання газу в тонкому шарі. За яких умов такі пальники використовуються?
8. За яких умов роботи паливних печей використовують мазутні форсунки низького тиску?
9. За яких умов роботи паливних печей використовують мазутні форсунки високого тиску?
10. Які особливості конструкції мазутних форсунок для мартенівських печей?
11. Назвіть особливості спалювання твердого палива в промислових печах.

Розділ четвертий

РОЗРАХУНКИ ПРОЦЕСУ ГОРІННЯ ПАЛИВА

Процес горіння розраховується на 1кг (1 м³) палива і включає в себе визначення: 1) калорійності палива; 2) об'єму необхідної кількості окисника (повітря чи кисню); 3) об'єму продуктів згоряння; 4) складу продуктів згоряння; 5) температури продуктів згоряння в робочій камері.

Згоряння палива може бути повним ($\alpha > 1$) чи неповним ($\alpha < 1$). Повне згоряння палива свідчить про найбільш економічну роботу теплових установок.

4.1. Розрахунки повного згоряння палива

Ці розрахунки відомі студентам із курсу "Основи хімії палива та води"; тут наводяться лише розрахункові формули та порядок розрахунків для їх практичного використання.

Кількість повітря (окисника), що витрачається на 1кг (1 м³) палива, а також об'єм продуктів згоряння визначаються в кубічних метрах, зведених до нормальних умов ($t=0^{\circ}\text{C}$ та $p=760$ мм рт.ст.). Відношення дійсного об'єму повітря, що витрачається на процес горіння $v_{\text{пов}}$, до теоретично необхідного $v_{\text{пов}}^{\circ}$, тобто $v_{\text{пов}}/v_{\text{пов}}^{\circ} = \alpha$ — це коефіцієнт витрати повітря. Цей коефіцієнт залежить від способу спалювання палива, якості утворення суміші палива з повітрям та інших факторів і визначається експериментально. Визначене таким чином значення використовується при проектних розрахунках.

При випробуваннях печей та на діючих установках α

визначається за даними хімічного аналізу сухих продуктів згоряння за формулою

$$\alpha = \frac{1}{1-3,67 \frac{\text{O}_2 - (0,5 \cdot \text{CO} + 0,5 \cdot \text{H}_2 + 2 \cdot \text{CH}_4)}{\text{N}_2}}, \quad (4.1)$$

де O_2 , CO , H_2 , CH_4 — вміст кисню, оксиду вуглецю, водню і метану відповідно в продуктах неповного згоряння.

4.1.1. Розрахунки повного згоряння твердого та рідкого палива

1) *Калорійність палива* визначають за формулою Менделєєва:

$$Q_{\text{н}}^{\text{p}} = 339 \cdot C^{\text{p}} + 1030 \cdot \text{H}^{\text{p}} - 109 \cdot (\text{O}^{\text{p}} - S^{\text{p}}) - 25 \cdot W^{\text{p}} \quad (\text{кДж/кг}), \quad (4.2)$$

де C^{p} , H^{p} , O^{p} , S^{p} , W^{p} — робочий склад твердого чи рідкого палива, відповідно — вуглець, водень, кисень, сірка, волога.

Більш точно $Q_{\text{н}}^{\text{p}}$ визначається експериментально в калориметричних бомбах.

2) *Теоретичну (мінімальну) кількість повітря*, необхідну для повного спалювання 1 кг палива, знаходять за формулою

$$V_{\text{пов}}^{\text{o}} = 0,0889 \cdot C^{\text{p}} + 0,265 \cdot \text{H}^{\text{p}} - 0,0333 \cdot (\text{O}^{\text{p}} - S^{\text{p}}) \quad (\text{м}^3/\text{кг}). \quad (4.3)$$

В окремих випадках доцільно скористатися формулою для визначення теоретично необхідної кількості кисню для спалювання 1 кг палива:

$$V_{\text{o}_2}^{\text{o}} = 0,01866 \cdot K^{\text{p}} + 0,05565 \cdot \text{H}^{\text{p}} - 0,007 \cdot \text{O}^{\text{p}} \quad (\text{м}^3/\text{кг}), \quad (4.4)$$

де $K^{\text{p}} = C^{\text{p}} + 0,375 \cdot S^{\text{p}}$;

$$v_{\text{пов}}^{\circ} = v_{\text{O}_2}^{\circ} \cdot \frac{100}{21} = \frac{100}{21} \cdot (0,01866 \cdot K^{\text{P}} + 0,05565 \cdot H^{\text{P}} - 0,007 \cdot O^{\text{P}}), \quad (4.5)$$

тобто відповідає формулі (4.3)

Дійсна кількість окисника дорівнює

$$v_{\text{пов}} = v_{\text{пов}}^{\circ} \alpha \quad \text{або} \quad v_{\text{O}_2} = v_{\text{O}_2}^{\circ} \alpha. \quad (4.6)$$

3) Об'єм продуктів згоряння, що утворюються при $\alpha=1$:

$$v_{\text{п.з}}^{\circ} = v_{\text{RO}_2}^{\circ} + v_{\text{N}_2}^{\circ} + v_{\text{H}_2\text{O}}^{\circ} \quad (\text{м}^3/\text{кг}), \quad (4.7)$$

де об'єми компонентів продуктів згоряння такі:

а) об'єм триатомних газів

$$v_{\text{RO}_2} = 0,01866 \cdot (C^{\text{P}} + 0,375 \cdot S^{\text{P}}) \quad (4.8)$$

або $v_{\text{RO}_2} = v_{\text{CO}_2} + v_{\text{SO}_2}$;

б) об'єм диоксида вуглецю

$$v_{\text{CO}_2} = 0,01866 \cdot C^{\text{P}}; \quad (4.9)$$

в) об'єм сірчистого ангідриду

$$v_{\text{SO}_2} = 0,007 \cdot S^{\text{P}}; \quad (4.10)$$

г) об'єм азоту

$$v_{\text{N}_2}^{\circ} = 0,79 \cdot v_{\text{пов}}^{\circ} + 0,008 \cdot N^{\text{P}} \quad (4.11)$$

д) об'єм водяної пари

$$v_{\text{H}_2\text{O}}^{\circ} = 0,111 \cdot H^{\text{P}} + 0,0124 \cdot W^{\text{P}} + 0,0161 \cdot v_{\text{пов}}^{\circ}. \quad (4.12)$$

Повний об'єм продуктів згоряння при $\alpha > 1$

$$v_{\text{п.з}} = v_{\text{п.з}}^{\circ} + (\alpha - 1) \cdot v_{\text{пов}}^{\circ}. \quad (4.13)$$

4) Склад продуктів згоряння визначається з рівняння

$$v_{\text{п.з}} = v_{\text{CO}_2} + v_{\text{SO}_2} + v_{\text{N}_2} + v_{\text{O}_2} + v_{\text{H}_2\text{O}} \quad (\text{м}^3/\text{кг}), \quad (4.14)$$

де $v_{\text{CO}_2} + v_{\text{SO}_2}$ — див. формули (4.9) і (4.10),

$$v_{\text{N}_2} = 0,79 \cdot v_{\text{пов}} + 0,008 \cdot N^{\text{P}} \quad (4.15)$$

$$v_{O_2} = 0,21 \cdot (\alpha - 1) \cdot v_{пов}^0, \quad (4.16)$$

$$v_{H_2O} = 0,111 \cdot H^p + 0,0124 \cdot W^p + 0,0161 \cdot v_{пов}. \quad (4.17)$$

Склад продуктів згоряння виражають також у процентах:

$$100 = CO_2 + SO_2 + N_2 + O_2 + H_2O\%, \quad (4.18)$$

де $CO_2 = \frac{v_{CO_2}}{v_{п.з}} \cdot 100$ тощо.

Процентний склад продуктів згоряння використовується для визначення теплоємності суміші газів, наприклад, продуктів згоряння.

$$c_{п.з} = 0,01 \cdot (CO_2 \cdot c_{CO_2} + SO_2 \cdot c_{SO_2} + N_2 \cdot c_{N_2} + O_2 \cdot c_{O_2} + H_2O \cdot c_{H_2O}), \quad (4.19)$$

де c_{CO_2} , c_{SO_2} , c_{N_2} , c_{O_2} , c_{H_2O} — теплоємності компонентів продуктів згоряння.

5) *Температура продуктів згоряння.* Найважливішим фактором, що впливає на температуру печі (а значить на продуктивність печі) є температура горіння палива.

Під температурою горіння розуміють температуру продуктів згоряння, яка може змінюватись залежно як від теплофізичних властивостей палива (Q_H^p , об'єм та теплоємність продуктів згоряння), так і від умов, за яких здійснюється горіння (підігрів палива і повітря, втрати теплоти під час горіння, теплосприймання в камері, коефіцієнт витрати повітря тощо).

Щоб виявити потенційні можливості палива (досягнення максимальної температури горіння), вводять поняття горіння без підігріву палива та повітря при ідеальному адіабатному процесові, тобто горіння при $\alpha = 1$, без втрат теплоти і без теплообміну в робочій камері та з навколишнім середовищем. Усталена в цих умовах температура продуктів згоряння називається *жаропродуктивною здатністю палива*, або просто *жаропродуктивністю* $t_{ж}$.

Рівняння теплового балансу ідеального адіабатного процесу горіння 1 кг палива має вигляд

$$Q_H^P = v_{п.з}^o \cdot c_{п.з} \cdot t_{ж} . \quad (4.20)$$

Звідси жаропродуктивність палива

$$t_{ж} = \frac{Q_H^P}{v_{п.з}^o \cdot c_{п.з}} = \left(\frac{Q_H^P}{v_{п.з}^o} \right) \frac{1}{c_{п.з}} \text{ } ^\circ\text{C}, \quad (4.21)$$

де $c_{п.з}$ — середня питома теплоємність продуктів згоряння за температури горіння, кДж/(м³·К).

Із рівняння (4.21) видно, що залежність $t_{ж}$ від калорійності палива виражається співвідношенням $\left(\frac{Q_H^P}{v_{п.з}^o} \right)$, тобто теплотою згоряння палива, що припадає на 1 м³ продуктів повного згоряння при стехіометричній витраті окисника. Звідси можна дійти висновку, що високе значення Q_H^P ще не є гарантією досягнення високої температури горіння палива.

Таблиця 4.1

Вид палива	Q_H^P , МДж/м ³	$v_{п.з}^o$, м ³ /м ³	$t_{ж}$, °С
Природний газ, CH ₄	35,65	10,7	2050
Оксид вуглецю, CO	12,65	2,89	2500

Так, для порівняння наведемо дані, що характеризують CH₄ та CO як паливо.

Наведений приклад (табл.4.1) показує, що калорійність CO майже втричі нижча за калорійність CH₄, а жаропродуктивність його вища, ніж для природного газу (CH₄).

Якщо попередньо підігрівати паливо та повітря при оптимальному значенні $\alpha > 1$ і не допускати втрат теплоти під час горіння, то тепловий баланс адіабатного процесу згоряння 1 кг палива виражається рівнянням

$$Q_H^p + Q_{\text{пал}}^{\phi} + Q_{\text{пов}}^{\phi} = v_{\text{п.з}} \cdot c_{\text{п.з}} \cdot t_k \quad (4.22)$$

Температура, визначена з цього рівняння, називається *калориметричною температурою горіння*

$$t_k = \frac{Q_H^p + Q_{\text{пал}}^{\phi} + Q_{\text{пов}}^{\phi}}{v_{\text{п.з}} \cdot c_{\text{п.з}}} \quad (4.23)$$

Калориметрична температура виявляє вплив нагрівання палива і повітря та коефіцієнта витрати повітря α на температуру адіабатного горіння. Підвищення температури підігріву палива та повітря збільшує підведення теплоти в зону горіння, що приводить до підвищення температури горіння, а збільшення α спричиняє зростання $v_{\text{п.з}}$, що знижує температуру горіння. Тому залежно від співвідношення вказаних факторів можливо

$$t_k > t_{\text{ж}} \quad \text{і} \quad t_k < t_{\text{ж}}.$$

Дійсна температура $t_{\text{п.з}}^a$ продуктів згорання в робочому просторі нижча від калориметричної, тому що в робочій камері печі в реальних умовах мають місце втрати теплоти в навколишнє середовище. Вона визначається за формулою

$$t_{\text{п.з}}^a = t_k \cdot \eta_{\text{п}}, \quad (4.24)$$

де $\eta_{\text{п}}$ — пірометричний коефіцієнт, що враховує втрати теплоти, залежить від умов спалювання палива, особливостей конструкції печі і приймається в межах 0,66...0,9 (див. дод. 7).

4.1.2. Розрахунки повного горіння газоподібного палива

1) Калорійність сухого газоподібного палива визначають за формулою

$$\begin{aligned} Q_H^c = & 0,01 \cdot (Q_{\text{CO}} \cdot \text{CO} + Q_{\text{H}_2} \cdot \text{H}_2 + Q_{\text{H}_2\text{S}} \cdot \text{H}_2\text{S} + Q_{\text{CH}_4} \cdot \text{CH}_4 + \\ & + Q_{\text{C}_2\text{H}_2} \cdot \text{C}_2\text{H}_2 + Q_{\text{C}_2\text{H}_4} \cdot \text{C}_2\text{H}_4 + Q_{\text{C}_2\text{H}_6} \cdot \text{C}_2\text{H}_6 + \\ & + Q_{\text{C}_3\text{H}_8} \cdot \text{C}_3\text{H}_8 + Q_{\text{C}_4\text{H}_{10}} \cdot \text{C}_4\text{H}_{10} + Q_{\text{C}_5\text{H}_{12}} \cdot \text{C}_5\text{H}_{12}), \end{aligned} \quad (4.25)$$

де CO, H₂, H₂S, CH₄, C₂H₂, ... — вміст відповідного газу в газовій суміші палива, об'ємна частка, %;

$Q_{CO}, Q_{H_2}, Q_{H_2S}, \dots$ — питома теплота згоряння кожного елементарного газу, що входить до складу палива, кДж/м³ (див. дод. 1).

2) Теоретично необхідна кількість кисню для повного згоряння палива, м³/м³:

$$v_{O_2}^o = 0,01 \cdot (0,5 \cdot CO^{нал} + 0,5 \cdot H_2^{нал} + 1,5 \cdot H_2S^{нал} + \Sigma \left(m + \frac{n}{4} \right) \cdot (C_m H_n)^{нал} - O_2^{нал}). \quad (4.26)$$

де m — число атомів вуглецю в молекулах вуглеводнів, n — число атомів водню в молекулах вуглеводнів, наприклад, для CH_4 маємо $m=1, n=4$.

Теоретично необхідна кількість повітря, м³/м³:

$$v_{пов}^o = v_{O_2}^o \cdot \frac{100}{21} \quad \text{або}$$

$$v_{пов}^o = 0,0476 \cdot (0,5 \cdot CO^{нал} + 0,5 \cdot H_2^{нал} + 1,5 \cdot H_2S^{нал} + \Sigma \left(m + \frac{n}{4} \right) \cdot (C_m H_n)^{нал} - O_2^{нал}). \quad (4.27)$$

Дійсний об'єм повітря, що подається в робочий простір печі:

$$v_{пов} = \alpha \cdot v_{пов}^o.$$

3) Об'єм продуктів згоряння (м³/м³), що утворюються в робочій камері, становить

$$v_{CO_2} = 0,01 \cdot (CO^{нал} + CO_2^{нал} + CH_4^{нал} + \Sigma m \cdot (C_m H_n)^{нал}), \quad (4.28)$$

$$v_{SO_2} = 0,01 \cdot H_2S^{нал}, \quad (4.29)$$

$$v_{H_2O} = 0,01 \cdot (H_2^{нал} + 2CH_4^{нал} + H_2S^{нал} + \frac{n}{2} (C_m H_n)^{нал} + 0,124d_r) + 0,0161 \cdot v_{пов}, \quad (4.30)$$

$$v_{N_2} = 0,01 \cdot (N_2^{нал} + 0,79 \cdot v_{пов}), \quad (4.31)$$

$$v_{O_2} = 0,21 \cdot (\alpha - 1) v_{\text{пов}}^0 ; \quad (4.32)$$

тут d_r — вологовміст газоподібного палива, г/м³.

Об'єм продуктів згоряння окисника, теплоємність та температура продуктів згоряння визначаються за формулами (4.14) ... (4.19), (4.21), (4.23), (4.26), (4.27).

Для досягнення високих температур у робочих камерах ВТУ окрім нагрівання повітря застосовують також збагачення повітря киснем. Наприклад, у доменних печах використовують для дуття повітря, збагачене киснем до 30...35% (проти 21% для атмосферного повітря).

Слід зазначити, що економічно доцільніше застосовувати високотемпературний нагрів повітря (приблизно до 700...1000°C).

Підвищення температури горіння при використанні повітря, збагаченого киснем, досягається за рахунок зменшення об'єму продуктів згоряння при скороченні вмісту в ній азоту (див. формулу 4.23).

Якщо позначити через Z вміст кисню в повітрі, збагаченому киснем (%), то теоретично необхідний об'єм такого повітря визначається за формулою

$$v_{\text{пов.зб}}^0 = v_{O_2}^0 \frac{100}{Z}, \quad (4.33)$$

а дійсний
$$v_{\text{пов.зб}} = v_{\text{пов.зб}}^0 \cdot \alpha, \quad (4.34)$$

де $v_{O_2}^0$ — теоретично необхідний об'єм кисню, визначається за формулою (4.4 та 4.26).

Об'єм азоту та кисню в продуктах згоряння становить

$$v_{N_2} = \frac{100 - Z}{100} \cdot v_{\text{пов.зб}} + 0,008 \cdot N^p, \quad (4.35)$$

та
$$v_{O_2} = v_{O_2}^0 (\alpha - 1). \quad (4.36)$$

Всі інші розрахунки процесу горіння виконуються по відомій методиці при використанні для дуття звичайного атмосферного повітря.

4.2. Розрахунки неповного горіння палива

Неповне горіння палива відбувається за певних умов:

1) при дисоціації диоксиду вуглецю (CO_2), водяної пари (H_2O) та інших газів в умовах високих температур (вище за 1500°C);

2) при недостатчі окисника (повітря) та при недостатньому сумішоутворенні в умовах звичайних температур.

Неповне горіння призводить до втрати теплоти від хімічного недопалу палива і до пов'язаного з цим зниження температури горіння.

У ВТУ умови неповного горіння палива іноді створюються спеціально з метою:

1) реформації (самокарбюрації) природного газу для здійснення термічного розкладу вуглеводнів з виділенням сажистого (дисперсного) вуглецю та подальшого спалювання його, внаслідок чого й утворюється світний факел;

2) створення захисної атмосфери в печах (відсутність у продуктах згоряння вільного кисню) для безокисного нагріву металу з подальшим допалюванням газів у окремих камерах.

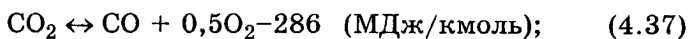
У промислових установках (газогенераторах) спалюється тверде або рідке паливо з метою його газифікації.

Неповне горіння природного газу та рідкого палива здійснюється також у технологічних установках для виробництва сажі тощо.

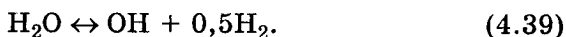
4.2.1. Розрахунок неповного горіння внаслідок дисоціації газів.

У більшості ВТУ температура в зоні горіння, як правило, не перевищує $1400\text{--}1500^\circ\text{C}$ і явище дисоціації продуктів згоряння практично не проявляється, тому можна вважати, що реакції горіння в цьому разі перебігають до кінця. Однак у ВТУ типу плавильних печей та в деяких нагрівальних печах за температури в зоні горіння $1800\text{--}2000^\circ\text{C}$ і вище дисоціація CO_2 та H_2O суттєво впливає на процес горіння і її враховують при розрахунку адиабатної температури горіння (теоретичної температури).

Процес дисоціації (розкладу) CO_2 та H_2O іде до певної межі, яка визначається станом рівноваги оборотних реакцій горіння і супроводжується від'ємним тепловим ефектом:

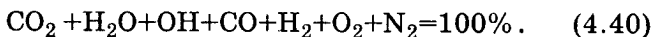


Розклад водяної пари можливий також і з утворенням гідрооксиду згідно з реакцією



Глибину дисоціації прийнято характеризувати ступенем дисоціації (δ), що являє собою частку дисоційованої речовини від початкової кількості цієї речовини на момент рівноваги. Рівновага реакцій горіння, а значить і ступені дисоціацій продуктів згорання в момент рівноваги залежать від температури та парціального тиску складових системи.

Важливо вміти визначити рівноважний склад продуктів згорання при заданій температурі, а за складом газів — втрату теплоти від дисоціації газів. Для визначення складу газів необхідно написати рівняння констант хімічної рівноваги, а також рівняння матеріальних балансів для елементів, що входять до складу газів. За температур до 2000°C можна обмежитись врахуванням дисоціації CO_2 та H_2O , тоді склад продуктів згорання матиме такий вигляд (7 невідомих)



Як правило, у ВТУ горіння палива відбувається при тиску $p \approx 1$ бар. Тоді сумарний тиск можна виразити через суму парціальних тисків

$$\Sigma_p = 1 = p_{\text{CO}_2} + p_{\text{H}_2\text{O}} + p_{\text{OH}} + p_{\text{CO}} + p_{\text{H}_2} + p_{\text{O}_2} + p_{\text{N}_2}. \quad (4.41)$$

Рівняння константи рівноваги реакції $\text{CO}_2 \leftrightarrow \text{CO} + 0,5\text{O}_2$ має вигляд

$$K_p^I = \frac{p_{\text{CO}_2}}{p_{\text{CO}} (p_{\text{O}_2})^{0,5}}. \quad (4.42)$$

Беремо до уваги, що число молекул CO завжди вдвоє перевищує число молекул O_2 , тому $p_{\text{O}_2} = 0,5 p_{\text{CO}}$, тоді

$$K_p^I = \frac{\sqrt{2} \cdot p_{\text{CO}_2}}{(p_{\text{CO}})^{3/2}}. \quad (4.43)$$

Під час реакції $\text{H}_2\text{O} \leftrightarrow \text{H}_2 + 0,5\text{O}_2$ константа рівноваги має вигляд

$$K_p^{\text{II}} = \frac{p_{\text{H}_2\text{O}}}{p_{\text{H}_2} \cdot (p_{\text{O}_2})^{0,5}}, \quad (4.44)$$

а для реакції $\text{H}_2\text{O} \leftrightarrow \text{OH} + 0,5\text{H}_2$ маємо

$$K_p^{\text{III}} = \frac{p_{\text{H}_2\text{O}}}{p_{\text{OH}} \cdot (p_{\text{H}_2})^{0,5}}. \quad (4.45)$$

Константи рівноваги знаходять із таблиці (дод. 8).

Наводимо три рівняння, яких не вистачає в системі, що виражають відношення мас елементів у газах:

1) відношення маси вуглецю m_C до маси кисню m_O

$$\frac{m_C}{m_O} = \frac{12 \cdot p_{\text{CO}_2} + 12 \cdot p_{\text{CO}}}{32 \cdot p_{\text{CO}_2} + 16 \cdot p_{\text{CO}} + 16 \cdot p_{\text{H}_2\text{O}} + 16 \cdot p_{\text{OH}}}; \quad (4.46)$$

2) відношення маси водню m_H до маси кисню m_O

$$\frac{m_H}{m_O} = \frac{2 \cdot p_{\text{H}_2\text{O}} + p_{\text{OH}} + 2 \cdot p_{\text{H}_2}}{32 \cdot p_{\text{CO}_2} + 16 \cdot p_{\text{CO}} + 16 \cdot p_{\text{H}_2\text{O}} + 16 \cdot p_{\text{OH}}}; \quad (4.47)$$

3) відношення маси азоту m_N до маси кисню m_O

$$\frac{m_N}{m_O} = \frac{28 \cdot p_{\text{N}_2}}{32 \cdot p_{\text{CO}_2} + 16 \cdot p_{\text{CO}} + 16 \cdot p_{\text{H}_2\text{O}} + 16 \cdot p_{\text{OH}}}. \quad (4.48)$$

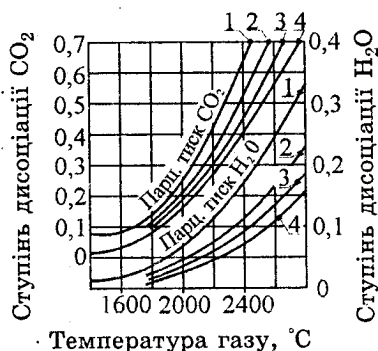


Рис. 4.1. Ступінь дисоціації CO_2 та H_2O залежно від температури та парціального тиску: 1 — 0,001; 2 — 0,01; 3 — 0,02; 4 — 0,03 МПа

Маси m_C , m_O , m_H , m_N визначаються легко з розрахунку показників горіння.

Визначивши склад продуктів горіння, можна визначити втрати теплоти, а потім і температуру згорання.

Однак такий розрахунок потребує виконання громіздких обчислень і його використовують при необхідності більш точного

врахування впливу дисоціації на горіння палива. Менш точно, але досить просто ступінь дисоціації CO_2 та H_2O можна знайти з діаграми (рис. 4.1).

Теплота, втрачена в камері з високотемпературним процесом горіння в результаті дисоціації CO_2 та H_2O , кДж/кг (кДж/м³), визначається за тепловим ефектом реакцій згоряння CO та H_2 , що утворились у результаті дисоціації:

$$Q_{\text{дис}} = \alpha_{\text{CO}_2} \nu_{\text{CO}_2} q_{\text{CO}} + \alpha_{\text{H}_2\text{O}} \nu_{\text{H}_2\text{O}} q_{\text{H}_2} \quad (4.49)$$

де α_{CO_2} та $\alpha_{\text{H}_2\text{O}}$ — ступінь дисоціації CO_2 та H_2O ; ν_{CO_2} та $\nu_{\text{H}_2\text{O}}$ — об'єми CO_2 та H_2O в продуктах згоряння без врахування дисоціації, м³/кг (або м³/м³); $q_{\text{CO}} = 12640$ кДж/м³, $q_{\text{H}_2\text{O}} = 10800$ кДж/м³ — питома теплота згоряння оксиду вуглецю та водню відповідно.

Слід зазначити, що дисоціація продуктів згоряння впливає на втрату теплоти та температури процесу лише в межах високотемпературної частини установки. При охолодженні продуктів згоряння рівновага реакції зміщується в бік кінцевих продуктів, і відбувається горіння горючих газів, які утворилися в зоні високої температури. Теплота дисоціації, втрачена в зоні високої температури, повертається в потік газів під час їх охолодження. Тому при складанні теплового балансу високотемпературної установки в цілому втрати теплоти від дисоціації не враховують.

Однак явище дисоціації газів може суттєво вплинути на температуру газів у камері горіння, тому нарівні з калориметричною температурою горіння та жаропродуктивністю палива в розрахунках користуються поняттям теоретичної температури горіння.

Теоретична температура горіння — це температура, до якої нагрілись би продукти згоряння (з урахуванням явища дисоціації) за умови, що вся теплота використовується на нагрівання продуктів згоряння.

Теоретична температура горіння (t_T) визначається з наведеного нижче рівняння теплового балансу процесу горіння 1 кг палива

$$Q_{\text{H}\eta}^{\text{P}} = Q_{\text{H}}^{\text{P}} \left(\frac{100 - q_{\text{дис}}}{100} + \frac{i_{\text{пал}} + i_{\text{пов}}}{Q_{\text{H}}^{\text{P}}} \right) = \nu_{\text{п.з}} \bar{c}_{\text{п.з}} t_T. \quad (4.50)$$

де $q_{\text{дис}}$ — втрати від хімічного недопалу, який виникає під час дисоціації газів, %; $i_{\text{пал}}$, $i_{\text{пов}}$ — ентальпія палива та повітря, що потрапляють у робочу камеру печі, кДж/кг (кДж/м³); $v_{\text{п.з}}$ — об'єм продуктів згоряння, м³/кг (м³/м³); $\bar{c}_{\text{п.з}}$ — усереднена теплоємність продуктів згоряння, кДж/м³; η' — коефіцієнт тепловиділення, що визначається за формулою

$$\eta' = \frac{100 - q_{\text{дис}}}{100} + \frac{i_{\text{пал}} + i_{\text{пов}}}{Q_{\text{II}}^{\text{P}}}, \quad (4.51)$$

$$q_{\text{дис}} = \frac{Q_{\text{дис}}}{Q_{\text{II}}^{\text{P}}} \cdot 100, \quad (4.52)$$

$Q_{\text{дис}}$ визначається за формулою (4.49).

Тоді

$$t_{\text{T}} = \frac{Q_{\text{II}}^{\text{P}} \cdot \eta'}{v_{\text{п.з}} \cdot \bar{c}_{\text{п.з}}}. \quad (4.53)$$

Треба зазначити, що під час спалювання палива з використанням як окисника кисню чи повітря, збагаченого киснем, при температурах продуктів згоряння вище як 2000°C, температуру горіння визначають з урахуванням складної гами продуктів дисоціації. За цих умов різниця між теоретичною температурою горіння та жаропродуктивністю палива дуже значна, як це видно з графіка, наведеного на рис.4.2.

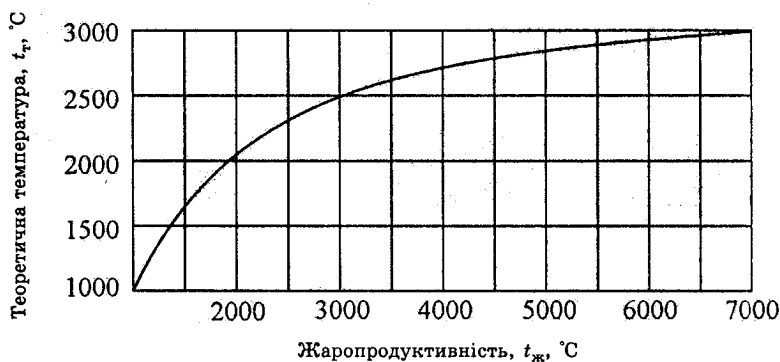


Рис. 4.2. Залежність між теоретичною температурою горіння та жаропродуктивністю палива для умов високих температур

4.2.2. Розрахунок неповного горіння палива з утворенням оксиду вуглецю.

На практиці неповне горіння з утворенням CO має місце в шахтних печах, що використовують як паливо кокс, наприклад, у вагранках для переплавки чавуну на машинобудівних заводах. Частка вуглецю коксу в кількості y_H згоряє в оксид вуглецю CO, а інша частина в кількості $(1-y_H)$ — у двооксид вуглецю CO₂. Величину y_H легко обчислити, знаючи вміст оксиду вуглецю CO у продуктах згорання в % та загальну кількість сухих газів $v_{c,r}$:

$$y_H = \frac{126 \cdot CO \cdot v_{c,r}}{235 \cdot C^p} \quad (4.54)$$

Розрахункові формули за неповного згорання вуглецю при $\alpha < 1$ мають вигляд:

а) витрата повітря на згорання 1 кг коксу

$$v_{\text{пов}} = \underbrace{0,0889[(1-y_H) \cdot C^p + 0,375 \cdot S^p]}_1 + \underbrace{+0,0445 \cdot y_H \cdot C^p + 0,265 \cdot H^p - 0,033 \cdot O^p}_3 \quad (\text{м}^3/\text{кг}); \quad (4.55)$$

тут доданок 1 — об'єм повітря, що відповідає утворенню двооксиду вуглецю та сірки, тобто $v_{CO_2} + v_{SO_2}$; доданок 2 — об'єм повітря, що відповідає утворенню оксиду вуглецю, CO; доданок 3 — об'єм повітря, що відповідає утворенню водяної пари;

б) об'єм триатомних газів

$$v_{RO_2} = 0,01866[(1-y_H) \cdot C^p + 0,375 \cdot S^p] \quad (\text{м}^3/\text{кг}); \quad (4.56)$$

в) об'єм оксиду вуглецю

$$v_{CO} = 0,01866 y_H \cdot C^p \quad (\text{м}^3/\text{кг}); \quad (4.57)$$

г) об'єм азоту

$$v_{N_2} = 0,79 v_{\text{пов}} + 0,8 \cdot \frac{N^p}{100} \quad (\text{м}^3/\text{кг}); \quad (4.58)$$

д) об'єм водяної пари

$$v_{H_2O} = 0,111 \cdot H^p + 0,0124 \cdot W^p + 0,0161 v_{\text{пов}} \quad (\text{м}^3/\text{кг}); \quad (4.59)$$

Коефіцієнт α витрати повітря визначається з рівняння

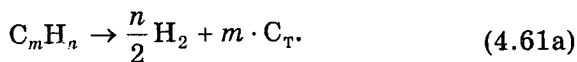
$$CO = 59,4(1-\alpha). \quad (4.60)$$

4.2.3. Розрахунок неповного горіння газоподібного палива при коефіцієнті витрати повітря $\alpha < 1$.

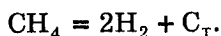
Склад продуктів неповного горіння при заданому коефіцієнті витрати повітря α залежить не тільки від природи газоподібного палива, а й від організації згорання, а також від сумішоутворення. За рахунок спеціальної організації згорання газу, наприклад, здійснюється самокарбюрація природного газу. Частину природного газу спалюють за допомогою допоміжних пальників із подальшим змішуванням цих газів із розжареними продуктами згорання. При цьому відбувається термічне розкладання вуглеводнів та інші реакції. Аналогічно відбувається процес згорання при відокремленій подачі попередньо підігрітих газу та повітря; газ та повітря подаються окремими струменями за допомогою спеціальних пальників. Фактор сумішоутворення використовується, коли в спеціальних пальниках спалюється газ, ретельно перемішаний з повітрям. Вуглеводні мають здатність приєднувати до себе в процесі крекінгу кисень повітря у формі газоподібних сполук — оксиду вуглецю, і в цьому разі утворюється мало сажистого вуглецю. Так спалюють природний газ у печах з безокисною атмосферою.

А. Реформація газу з виділенням сажистого вуглецю.

У разі розрахунку неповного горіння газу з виділенням сажистого вуглецю приймаються певні умови: 1) за рахунок кисню повітря, що подається до пальників, повністю згоряє частина газу, пропорційна коефіцієнту α витрати повітря; 2) вуглеводні, що не згоріли, зазнають термічного розкладу з виділенням сажистого (дисперсного) вуглецю згідно з реакцією



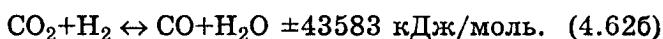
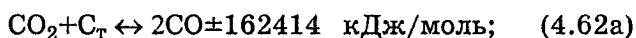
Зокрема, для метану(4.61б)



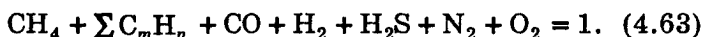
Степінь ψ розкладання вуглеводнів залежить від температури: для CH_4 маємо $\psi = 0,08$ при $800^\circ C$ і $\psi = 0,97$ при

1300°C; для етилену C_2H_4 можна вважати, що при 900°C процес розкладання є повним. Кількість сажистого вуглецю при повному розкладі метану становить 268 г/м³, етилену (C_2H_4) — 553 г/м³ тощо. Враховуючи, що згоряння газу в печах відбувається за відносно високих температур, можна вважати, що незгорілі високомолекулярні вуглеводні C_mH_n розкладаються повністю.

Наявність у газах значної кількості завислого вуглецю C_T спричинює сумісний перебіг реакцій



Кінетика цих реакцій визначається температурою, і тому при розрахунках задаються температурою топкової камери з подальшою її перевіркою. Позначимо через x кількість CO_2 , яка прореагувала з відповідною кількістю вуглецю до $2CO$ за реакцією (4.62a); через y — кількість метану CH_4 , який розпався на $2H_2$ та C_T за реакцією (4.61b). Склад сухого газу в загальному випадку в об'ємних частках такий:



Витрата повітря (м³/м³) при заданому коефіцієнті $\alpha < 1$ дорівнює:

$$v_{\text{пов}} = \alpha \cdot v_{\text{пов}}^0 = 0,0476 \cdot \alpha \times \left[0,5CO + 0,5H_2 + 2CH_4 + \sum \left(m + \frac{n}{4} \right) C_mH_n + 1,5H_2S - O_2 \right], \quad (4.64)$$

де $v_{\text{пов}}^0$ — витрата повітря, теоретично необхідного для повного згоряння палива.

Об'єми продуктів згоряння визначаються з рівнянь матеріального балансу процесу горіння:

об'єм азоту

$$v_{N_2} = 0,79\alpha v_{\text{пов}}^0 + 0,01N_2 \text{ (м}^3/\text{м}^3\text{)}; \quad (4.65)$$

де N_2 — вміст азоту в газоподібному паливі, %;

$$v_{\text{RO}_2} = \alpha(\text{CO} + \text{CH}_4 + \sum m C_m \text{H}_n + \text{H}_2\text{S}) + \text{CO}_2 - x \quad (\text{м}^3/\text{м}^3); \quad (4.66)$$

об'єм оксиду вуглецю

$$v_{\text{CO}} = (1 - \alpha)\text{CO} + 2x \quad (\text{м}^3/\text{м}^3); \quad (4.67)$$

об'єм водяної пари

$$v_{\text{H}_2\text{O}} = \alpha(\text{H}_2 + 2\text{CH}_4 + \sum \frac{n}{2} C_m \text{H}_n + \text{H}_2\text{S} + 0,0161v_{\text{пов}}^0) + 0,124d_r \quad (\text{м}^3/\text{м}^3), \quad (4.68)$$

де d_r — вологовміст газу, $\text{г}/\text{м}^3$;
об'єм метану

$$v_{\text{CH}_4} = (1 - \alpha)\text{CH}_4 - y \quad (\text{м}^3/\text{м}^3); \quad (4.69)$$

об'єм водню

$$v_{\text{H}_2} = (1 - \alpha) \cdot (\text{H}_2 + \sum \frac{n}{2} C_m \text{H}_n) + 2y \quad (\text{м}^3/\text{м}^3). \quad (4.70)$$

Для визначення невідомих x та y напишемо відповідно до додатку 8 два рівняння констант рівноваги реакції (4.616) та (4.626):

$$K_{\text{C}}^{\text{IV}} = \frac{\text{CH}_4}{(\text{H}_2)^2} = \frac{v_{\text{CH}_4}}{(v_{\text{H}_2})^2}; \quad (4.71)$$

$$K_{\text{C}}^{\text{V}} = \frac{\text{CO}_2 \cdot \text{H}_2}{\text{CO} \cdot \text{H}_2\text{O}} = \frac{v_{\text{CO}_2} v_{\text{H}_2}}{v_{\text{CO}} v_{\text{H}_2\text{O}}}. \quad (4.72)$$

Підставляємо в ці рівняння (4.71) та (4.72) обчислені об'єми та прийняті значення констант (дод. 8), визначаємо x та y , а також інші об'єми компонентів згоряння. Загальний об'єм їх:

$$v_{\text{п.з}} = v_{\text{RO}_2} + v_{\text{CO}} + v_{\text{H}_2\text{O}} + v_{\text{CH}_4} + v_{\text{H}_2} + v_{\text{N}_2} \quad (\text{м}^3/\text{м}^3). \quad (4.73)$$

Склад газів у об'ємних процентах такий:

$$\text{RO}_2 + \text{CO} + \text{H}_2\text{O} + \text{CH}_4 + \text{H}_2 + \text{N}_2 = 100\%. \quad (4.74)$$

Кількість сажистого вуглецю у грамах на 1 м^3 газоподібного палива визначається з реакції (4.61а). Знаходимо число молів вуглецю m_{C} на 1 м^3 газоподібного палива і множимо його на масу 1 моля, що дорівнює 12010 г і в результаті в розгорнутому вигляді формула має вигляд:

$$C_T = 120,1 \cdot \left[(1 - \alpha) \sum \frac{mV_{C_mH_n}}{(v_\mu)_{C_mH_n}} + \frac{\Delta V_{CH_4} - 0,5 \Delta V_{CO}}{22,4} \right] (\text{г/м}^3). \quad (4.75)$$

де $(v_\mu)_{C_mH_n}$ — об'єм, який займає 1 моль високомолекулярних вуглеводнів, м³/моль (дод. 1); ΔV_{CH_4} — об'єм метану, що розпався, відповідно до реакції (4.61б); ΔV_{CO} — об'єм оксиду вуглецю, що утворився в результаті реакції (4.62а); в м³/100м³ природного газу.

Б. Реформація газу без сажоутворення. Такий режим згоряння має місце при використанні природного газу в печах для безоxygenного нагріву металу. Він характеризується ретельною підготовкою суміші газу та повітря, а також високою температурою процесу (1200...1400°С). За цих умов, відповідно до рекомендацій проф. В.Ф.Копитова допускається, що в продуктах згоряння відсутні сажистий вуглець та метан.

Для спрощення обчислень розрахунки ведуть на 100 м³ газу.

Загальна кількість продуктів згоряння виражається рівнянням

$$V_{п.з} = V_{CO_2} + V_{CO} + V_{H_2O} + V_{H_2} + V_{N_2} (\text{м}^3). \quad (4.76)$$

Витрату повітря визначаємо за формулою (4.64), а кількість азоту — за формулою (4.65).

Із рівняння (4.76) чотири компоненти продуктів згоряння залишаються невідомими. Позначимо їх так:

$$V_{CO_2} = x; \quad V_{CO} = y; \quad V_{H_2O} = z; \quad V_{H_2} = u.$$

Для їх визначення складаємо три рівняння матеріальних балансів. У лівій частині рівняння — кількість даного елемента в продуктах згоряння, а в правій частині — у початковому газоподібному паливі.

Баланс вуглецю:

$$x + y = 1 \cdot CO_2 + 1 \cdot CH_4 + 2 \cdot C_2H_6 + 3 \cdot C_3H_8 (\text{м}^3). \quad (4.77)$$

Баланс водню:

$$2 \cdot z + 2 \cdot u = 4 \cdot CH_4 + 6 \cdot C_2H_6 + 8 \cdot C_3H_8 (\text{м}^3). \quad (4.78)$$

Баланс кисню:

$$2 \cdot x + y + z = 2 \cdot \text{CO}_2 + 2 \cdot 0,21 \cdot v_{\text{пов}} (\text{м}^3). \quad (4.79)$$

де $0,21v_{\text{пов}}$ — витрата кисню повітря.

Крім того, напишемо ще константу рівноваги реакції (4.626):

$$K_c^v = \frac{\text{CO}_2 \cdot \text{H}_2}{\text{CO} \cdot \text{H}_2\text{O}} = \frac{xu}{yz}. \quad (4.80)$$

Розв'язуючи це рівняння (приймавши K_c^v , дод.8) та підставляючи значення невідомих у відповідні формули, визначаємо об'єми та склад продуктів згоряння.

Приклад 4.1

Розрахувати процес горіння донецького кам'яного вугілля такого складу (%): $C^r=89,0$; $H^r=4,2$; $N^r=1,5$; $O^r=2,1$; $S^r=3,2$; $A^c=18,0$; $W^p=4,5$. Коефіцієнт витрати повітря $\alpha=1,2$. Повітря, що надходить у робочу камеру, нагріте до температури $t_{\text{пов}}^r=300^\circ\text{C}$. Втрати теплоти від хімічного недопалу — $q_{\text{х.н}}=0,5\%$, механічного недопалу — $q_{\text{м.н}}=3,0\%$. Втрати фізичної теплоти з шлаками можна прийняти $q_{\text{шл}}^f=2,5\%$.

Процес горіння розраховуємо згідно з 4.1.1 та 4.2.1.

Розв'язання

1. Виконуємо перерахунок зольності палива з сухої маси на роботу:

$$A^p = A^c \cdot \frac{100 - W^p}{100} = 18 \cdot \frac{100 - 4,5}{100} = 17,2.$$

2. Робочий склад (%) палива розраховуємо за формулою

$$C^p = C^r \cdot \frac{100 - (W^p + A^p)}{100} = C^r \cdot \frac{100 - (4,5 + 17,2)}{100} = C^r \cdot 0,783;$$

$$C^p = C^r \cdot 0,783 = 89,0 \cdot 0,783 = 69,69$$

$$H^p = H^r \cdot 0,783 = 4,2 \cdot 0,783 = 3,29$$

$$N^p = N^r \cdot 0,783 = 1,5 \cdot 0,783 = 1,17$$

$$O^P = O^r \cdot 0,783 = 2,1 \cdot 0,783 = 1,64$$

$$S^P = S^r \cdot 0,783 = 3,2 \cdot 0,783 = 2,51$$

$$A^P = 17,20$$

$$W^P = 4,50$$

Всього 100,00

3. Визначаємо калорійність палива за формулою Менделеева:

$$Q_H^P = 339 \cdot C^P + 1030 \cdot H^P - 109 \cdot (O^P - S^P) - 25 \cdot W^P = \\ = 339 \cdot 69,69 + 1030 \cdot 3,29 - 109 \cdot (1,64 - 2,51) - 25 \cdot 4,5;$$

$$Q_H^P = 26996 \text{ кДж/кг.}$$

4. Визначаємо теоретично необхідний об'єм повітря для згоряння 1 кг палива:

$$v_{\text{пов}}^o = 0,0889 \cdot C^P + 0,265 \cdot H^P - 0,0333 \cdot (O^P - S^P) = \\ = 0,0889 \cdot 69,69 + 0,265 \cdot 3,29 - 0,0333 \cdot (1,64 - 2,51);$$

$$v_{\text{пов}}^o = 7,096 \text{ м}^3/\text{кг.}$$

Дійсний об'єм повітря

$$v_{\text{пов}} = v_{\text{пов}}^o \cdot \alpha = 7,096 \cdot 1,2 = 8,515 \text{ м}^3/\text{кг.}$$

5. Знаходимо об'єми компонентів продуктів згоряння, м³/кг:

вуглекислого газу

$$v_{\text{CO}_2} = 0,01866 \cdot C^P = 0,01866 \cdot 69,69 = 1,300;$$

сірчастого газу

$$v_{\text{SO}_2} = 0,007 \cdot S^P = 0,007 \cdot 2,51 = 0,018;$$

азоту

$$v_{\text{N}_2} = 0,79 \cdot v_{\text{пов}} + 0,008 \cdot N^P = 0,79 \cdot 8,515 + 0,008 \cdot 1,17 = \\ = 6,736;$$

кисню

$$v_{\text{O}_2} = 0,21 \cdot (\alpha - 1) \cdot v_{\text{пов}}^o = 0,21 \cdot (1,2 - 1,0) \cdot 7,096 = 0,298;$$

водяної пари

$$v_{H_2O} = 0,111 \cdot H^P + 0,0124 \cdot W^P + 0,0161 \cdot v_{пов} =$$

$$= 0,111 \cdot 3,29 + 0,0124 \cdot 4,5 + 0,0161 \cdot 8,515 = 0,558.$$

Повний об'єм продуктів згоряння становить

$$v_{п.з} = v_{CO_2} + v_{SO_2} + v_{N_2} + v_{O_2} + v_{H_2O} =$$

$$= 1,300 + 0,018 + 6,736 + 0,298 + 0,558 = 8,910 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

6. Склад (%) продуктів згоряння визначається за формулою

$$CO_2 = (v_{CO_2} / v_{п.з}) \cdot 100 = (1,300 / 8,910) \cdot 100 = 14,59;$$

$$SO_2 = 0,20; N_2 = 75,60; O_2 = 3,35; H_2O = 6,26$$

Перевірка

$$CO_2 + SO_2 + N_2 + O_2 + H_2O = 14,59 + 0,20 + 75,60 + 3,35 + 6,26 = 100\%.$$

7. Температури продуктів згоряння (калориметрична та теоретична) визначаються як адіабатні.

7.1. Визначаємо калориметричну температуру t_K (без врахування дисоціації продуктів згоряння, зокрема CO_2 та H_2O).

Корисне тепловиділення в камері

$$Q_T = Q_H^P \cdot \frac{100 - (q_{х.м} + q_{м.н} + q_{шл}^\phi + q_{дис})}{100 - q_{м.н}} + I_{пов},$$

$$\text{тут } q_{х.м} = 0,5\%; q_{м.н} = 3,0\%; q_{шл}^\phi = 2,5\%; q_{дис} = 0.$$

Ентальпія повітря (на 1 кг палива) становить

$$I_{пов} = v_{пов} \cdot c_{пов} \cdot t_{пов};$$

$$c_{пов} = 1,3172 \text{ кДж}/(\text{м}^3 \cdot \text{К}) \text{ при } t_{пов}^r = 300^\circ\text{C} \text{ (див. дод. 4);}$$

$$I_{пов} = 8,515 \cdot 1,3172 \cdot 300 = 3365 \text{ кДж}/\text{кг};$$

$$Q_T = 26996 \cdot \frac{100 - (0,5 + 3,0 + 2,5 + 0)}{100 - 3,0} + 3365 = 29526 \text{ кДж}/\text{кг}.$$

При визначенні калориметричної (адіабатичної) температури горіння застосовують метод лінійної інтерполяції. По-

передньо беремо значення температур, у межах яких має знаходитись температура, що розраховується, наприклад 1800, 2000, 2200°C. За цих температур визначаємо ентальпії продуктів згоряння (див. дод.4).

Результати розрахунку зводимо в табл. 4.1.

Таблиця 4.1. Розрахунок ентальпій продуктів згоряння

Величина, що визначається, та розрахункова формула	Значення I , кДж/м ³ , при температурі, °C		
	1800	2000	2200
i_{CO_2}	4304,7	4844,2	5386,5
$I_{CO_2} = v_{CO_2} i_{CO_2} =$ $= 1,300 i_{CO_2}$	5596	6297	7002
i_{SO_2}	4320,0	4860,0	5390,0
$I_{SO_2} = v_{SO_2} i_{SO_2} =$ $= 0,018 i_{SO_2}$	78	87	97
i_{N_2}	2638,3	2965,0	3289,2
$I_{N_2} = v_{N_2} i_{N_2} =$ $= 6,736 i_{N_2}$	17772	19972	22156
i_{O_2}	2797,4	3138,4	3482,6
$I_{O_2} = v_{O_2} i_{O_2} =$ $= 0,298 i_{O_2}$	834	935	1038
i_{H_2O}	3458,3	3925,6	4402,0
$I_{H_2O} = v_{H_2O} i_{H_2O} =$ $= 0,558 i_{H_2O}$	1930	2190	2456
$I_{п.з} = I_{CO_2} + I_{SO_2} +$ $+ I_{N_2} + I_{O_2} + I_{H_2O}$	26210	29481	32749

Лінійною інтерполяцією даних розрахунку (нижній рядок табл. 4.1) знаходимо адіабатну калориметричну температуру горіння:

$$t_k = t_a = 2000 + \frac{2200-2000}{32749-29481} \cdot (29526 - 29481).$$

$$t_k = 2003^\circ\text{C}$$

7.2. Визначаємо теоретичну температуру горіння, тобто температуру з урахуванням втрат теплоти від дисоціації продуктів згорання (CO_2 та H_2O) згідно з формулою (4.49)

$$Q_{\text{дис}} = \alpha_{\text{CO}_2} \cdot \nu_{\text{CO}_2} \cdot q_{\text{CO}} + \alpha_{\text{H}_2\text{O}} \cdot \nu_{\text{H}_2\text{O}} \cdot q_{\text{H}_2\text{O}}.$$

Для визначення ступеня дисоціації CO_2 та H_2O , тобто α_{CO_2} та $\alpha_{\text{H}_2\text{O}}$, використовуємо діаграму (див. рис. 4.1).

Для цього розраховуємо парціальний тиск CO_2 та H_2O у суміші газів, тобто в продуктах згорання.

Попередньо визначаємо об'ємні частки складових продуктів згорання за формулою

$$r_i = \nu_i / \nu_{\text{п.з}};$$

$$r_{\text{CO}_2} = \nu_{\text{CO}_2} / \nu_{\text{п.з}} = 1,300 / 8,910 = 0,146;$$

$$r_{\text{SO}_2} = 0,002; r_{\text{N}_2} = 0,756; r_{\text{O}_2} = 0,033; r_{\text{H}_2\text{O}} = 0,063.$$

Перевірка:

$$\begin{aligned} \Sigma r_i &= r_{\text{CO}_2} + r_{\text{SO}_2} + r_{\text{N}_2} + r_{\text{O}_2} + r_{\text{H}_2\text{O}} = \\ &= 0,146 + 0,002 + 0,756 + 0,033 + 0,063 = 1,000. \end{aligned}$$

Парціальний тиск газів (МПа) визначається за формулою

$$p_i = r_i \cdot p_{\text{сум}}$$

$$\text{де } p_{\text{сум}} = 0,1;$$

$$p_{\text{CO}_2} = r_{\text{CO}_2} \cdot 0,1 = 0,146 \cdot 0,1 \approx 0,015;$$

$$p_{\text{H}_2\text{O}} = r_{\text{H}_2\text{O}} \cdot 0,1 = 0,063 \cdot 0,1 \approx 0,006.$$

Користуючись діаграмою (див.рис. 4.1) і попередньо прийнявши $t_{\text{пов}}^i = 1900^\circ\text{C}$, знаходимо $\alpha_{\text{CO}_2} = 0,1$; $\alpha_{\text{H}_2\text{O}} = 0,04$

Визначаємо .

$$Q_{\text{дис}} = 0,1 \cdot 1,300 \cdot 12640 + 0,04 \cdot 0,558 \cdot 10800 = 1884 \text{ кДж/кг};$$

$$q_{\text{дис}} = \frac{Q_{\text{дис}}}{Q_{\text{H}}^{\text{P}}} \cdot 100 = \frac{1884}{26996} \cdot 100 = 7,0\%$$

Корисне тепл овиділення в камері з урахуванням дисоціації CO_2 та H_2O в продуктах згоряння становитиме

$$Q_{\text{T}}^1 = Q_{\text{H}}^{\text{P}} \cdot \frac{100 - (q_{\text{x.н}} + q_{\text{м.н}} + q_{\text{шл}}^{\Phi} + q_{\text{дис}})}{100 - q_{\text{м.н}}} + I_{\text{пов}} =$$

$$= 26996 \cdot \frac{100 - (0,5 + 3,0 + 2,5 + 7,0)}{100 - 3} + 3365 = 27578 \text{ кДж/кг.}$$

Користуючись таблицею розрахунку ентальпій продуктів згоряння (табл.4.1), знаходимо теоретичну температуру згоряння палива

$$t'_{\text{T}} = 1800 + \frac{2000 - 1800}{29481 - 26210} \cdot (27578 - 26210) = 1884^{\circ}\text{C.}$$

Відхилення розрахованої температури від попередньо прийнятої становить $\Delta t'_{\text{T}} = 1900 - 1884 = 16^{\circ}\text{C}$, або 0,84%, що цілком допустимо.

Приймаємо $t'_{\text{T}} = 1884^{\circ}\text{C}$.

Висновок: Дисоціація CO_2 та H_2O у продуктах згоряння приводить до зниження теоретичної температури горіння на 119°C ($2003 - 1884 = 119^{\circ}\text{C}$).

Приклад 4.2

Для умов прикладу 4.1 розрахувати процес згоряння палива, якщо для дугтя замість нагрітого повітря $t'_{\text{пов}} = 300^{\circ}\text{C}$ використовувати повітря, збагачене киснем. Вміст кисню в такому повітрі становить $Z = 30\%$.

Розв'язання

1. Калорійність палива $Q_{\text{H}}^{\text{P}} = 26996 \text{ кДж/кг}$.

Склад палива: $\text{C}^{\text{P}} = 69,69$; $\text{H}^{\text{P}} = 3,29$; $\text{N}^{\text{P}} = 1,17$; $\text{O}^{\text{P}} = 1,64$; $\text{S}^{\text{P}} = 2,51$; $\text{A}^{\text{P}} = 17,20$; $\text{W}^{\text{P}} = 4,5\%$.

$q_{\text{x.н}} = 0,5$; $q_{\text{м.н}} = 3,0\%$; $q_{\text{шл}}^{\Phi} = 2,5\%$.

2. Теоретично необхідний об'єм кисню ($\text{м}^3/\text{кг}$) визначаємо за формулами (4.4), (4.5):

$$v_{\text{O}_2}^0 = 0,01866 \cdot K^p + 0,05565 \cdot H^p - 0,007 \cdot O^p,$$

$$\text{де } K^p = C^p + 0,375 \cdot S^p = 69,69 + 0,375 \cdot 2,51 = 70,63;$$

$$v_{\text{O}_2}^0 = 0,01866 \cdot 70,63 + 0,05565 \cdot 3,29 - 0,007 \cdot 1,64 = 1,49.$$

Теоретично необхідний об'єм повітря, збагаченого киснем, дорівнює

$$v_{\text{пов.зб}}^0 = v_{\text{O}_2}^0 \cdot \frac{100}{Z} = 1,490 \cdot \frac{100}{30} = 4,967.$$

Повний об'єм повітря, збагаченого киснем (необхідний для згорання 1 кг палива), дорівнює

$$v_{\text{пов.зб}} = v_{\text{пов.зб}}^0 \cdot \alpha = 4,967 \cdot 1,2 = 5,960 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

3. Визначаємо об'єми ($\text{м}^3/\text{кг}$) продуктів згорання палива:

$$v_{\text{CO}_2} = 1,300, v_{\text{SO}_2} = 0,018 \text{ (див. розв'язання прикладу 4.1).}$$

$$v_{\text{N}_2} = \frac{100 - Z}{100} \cdot v_{\text{пов.зб}} + 0,008 \cdot N^p = \frac{100 - 30}{100} \cdot 5,960 + 0,008 \cdot 1,17;$$

$$v_{\text{N}_2} = 4,181;$$

$$v_{\text{O}_2} = v_{\text{O}_2}^0 \cdot (\alpha - 1) = 1,490 \cdot (1,2 - 1,0) \cdot 7,096 = 0,298;$$

$$\begin{aligned} v_{\text{H}_2\text{O}} &= 0,111 \cdot H^p + 0,0124 \cdot W^p + 0,0161 \cdot v_{\text{пов.зб}} = \\ &= 0,111 \cdot 3,29 + 0,0124 \cdot 4,5 + 0,0161 \cdot 5,960 = 0,518; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} v_{\text{п.з}} &= v_{\text{CO}_2} + v_{\text{SO}_2} + v_{\text{N}_2} + v_{\text{O}_2} + v_{\text{H}_2\text{O}} = \\ &= 1,300 + 0,018 + 4,181 + 0,298 + 0,518 = 6,315. \end{aligned}$$

4. Склад (%) продуктів згорання визначається так:

$$\text{CO}_2 = \frac{v_{\text{CO}_2}}{v_{\text{п.з}}} \cdot 100 = \frac{1,300}{6,315} \cdot 100 = 20,59;$$

$$\text{SO}_2 = 0,28; \text{N}_2 = 66,21; \text{O}_2 = 4,72; \text{H}_2\text{O} = 8,20.$$

Перевірка:

$$\begin{aligned} & \text{CO}_2 + \text{SO}_2 + \text{N}_2 + \text{O}_2 + \text{H}_2\text{O} = \\ & = 20,59 + 0,28 + 66,21 + 4,72 + 8,20 = 100\%. \end{aligned}$$

5. Температури продуктів згорання.

5.1. Адіабатна калориметрична температура (без врахування дисоціації CO_2 та H_2O).

Визначаємо корисне тепловиділення в камері (див. розв'язання прикладу 4.1).

Тут $I_{\text{пов}} = 0$;

$$Q_T = 26996 \cdot \frac{100 - (0,5 + 3,0 + 2,5 + 0)}{100 - 3,0} + 0;$$

$$Q_T = 26161 \text{ кДж/кг.}$$

Розраховуємо ентальпії продуктів згорання, попередньо прийнявши температури 2000, 2200, 2400°C.

Результати розрахунку зводимо в таблицю 4.2.

Лінійною інтерполяцією даних розрахунку (нижній рядок табл. 4.2) знаходимо калориметричну температуру горіння

$$t_k = 2200 + \frac{2400 - 2200}{26607 - 24169} \cdot (26161 - 24169);$$

$$t_k = 2363 \text{ }^\circ\text{C.}$$

5.2. Визначаємо теоретичну температуру горіння (з урахуванням втрат теплоти від дисоціації CO_2 та H_2O).

Методика розрахунку наведена при розв'язанні прикладу 4.1.

Визначаємо об'ємні частки складових продуктів згорання за формулою

$$r_i = v_i / v_{\text{п.з}};$$

$$r_{\text{CO}_2} = v_{\text{CO}_2} / v_{\text{п.з}} = 1,300 / 6,315 = 0,206';$$

$$r_{\text{SO}_2} = 0,003; r_{\text{N}_2} = 0,662; r_{\text{O}_2} = 0,047; r_{\text{H}_2\text{O}} = 0,082.$$

Таблиця 4.2. Розрахунок ентальпій продуктів згоряння

Величина, що визначається, та розрахункова формула	Значення I , кДж/м ³ , при температурі, °С		
	2000	2200	2400
i_{CO_2}	4844,2	5386,5	5930,4
$I_{\text{CO}_2} = v_{\text{CO}_2} i_{\text{CO}_2} =$ $= 1,300 i_{\text{CO}_2}$	6297	7002	7710
i_{SO_2}	4860,0	5396,0	5950,0
$I_{\text{SO}_2} = v_{\text{SO}_2} i_{\text{SO}_2} =$ $= 0,018 i_{\text{SO}_2}$	87	97	107
i_{N_2}	2965,0	3289,2	3615,4
$I_{\text{N}_2} = v_{\text{N}_2} i_{\text{N}_2} =$ $= 4,181 i_{\text{N}_2}$	12397	13752	15116
i_{O_2}	3138,4	3482,6	3831,4
$I_{\text{O}_2} = v_{\text{O}_2} i_{\text{O}_2} =$ $= 0,298 i_{\text{O}_2}$	935	1038	1142
$i_{\text{H}_2\text{O}}$	3925,6	4402,0	4887,6
$I_{\text{H}_2\text{O}} = v_{\text{H}_2\text{O}} i_{\text{H}_2\text{O}} =$ $= 0,518 i_{\text{H}_2\text{O}}$	2033	2280	2532
$I_{\text{п.з}} = I_{\text{CO}_2} + I_{\text{SO}_2} +$ $+ I_{\text{N}_2} + I_{\text{O}_2} + I_{\text{H}_2\text{O}}$	21749	24169	26607

Перевірка:

$$\begin{aligned} \Sigma r_i &= r_{\text{CO}_2} + r_{\text{SO}_2} + r_{\text{N}_2} + r_{\text{O}_2} + r_{\text{H}_2\text{O}} = \\ &= 0,206 + 0,003 + 0,662 + 0,047 + 0,082 = 1,000. \end{aligned}$$

Визначаємо парціальний тиск (МПа) CO_2 та H_2O в

суміші продуктів згоряння за формулою

$$p_i = r_i \cdot 0,1;$$

$$p_{\text{CO}_2} = 0,206 \cdot 0,1 = 0,021;$$

$$p_{\text{H}_2\text{O}} = 0,082 \cdot 0,1 = 0,008.$$

Користуючись діаграмою (див. рис. 4.1) і попередньо прийнявши $t'_r = 2050^\circ\text{C}$, знаходимо: $\alpha_{\text{CO}_2} = 0,19$; $\alpha_{\text{H}_2\text{O}} = 0,06$.

Визначаємо

$$Q_{\text{дис}} = \alpha_{\text{CO}_2} \cdot \nu_{\text{CO}_2} \cdot q_{\text{CO}} + \alpha_{\text{H}_2\text{O}} \cdot \nu_{\text{H}_2\text{O}} \cdot q_{\text{H}_2} =$$
$$= 0,19 \cdot 1,300 \cdot 12640 + 0,06 \cdot 0,518 \cdot 10800 = 3458 \text{ кДж/кг}$$

$$q_{\text{дис}} = \frac{Q_{\text{дис}}}{Q_{\text{H}}^p} \cdot 100 = \frac{3458}{26996} \cdot 100 = 12,8\%.$$

Корисне тепловиділення в камері з урахуванням втрат теплоти від дисоціації CO_2 та H_2O в продуктах згоряння становитиме

$$Q_{\text{T}}^1 = Q_{\text{H}}^p \cdot \frac{100 - (q_{\text{x,n}} + q_{\text{м,n}} + q_{\text{шл}}^{\Phi} + q_{\text{дис}})}{100 - q_{\text{м,n}}} + I_{\text{пов}};$$

$$I_{\text{пов}} = 0;$$

$$Q_{\text{T}}^1 = 26996 \cdot \frac{100 - (0,5 + 3,0 + 2,5 + 12,8)}{100 - 3} + 0 = 22599 \text{ кДж/кг.}$$

Користуючись таблицею, знаходимо теоретичну температуру згоряння палива

$$t'_r = 2000 + \frac{2200 - 2000}{24169 - 21749} \cdot (22599 - 21749) = 2070^\circ\text{C}.$$

Відхилення розрахункової температури від попередньо прийнятої становить $\Delta t = 2070 - 2050 = 20^\circ\text{C}$, або 0,9%, що цілком можливо.

Приймаємо $t'_r = 2070^\circ\text{C}$.

Висновок. Заміна дуттьового повітря, нагрітого до 300°C , на повітря збагачене киснем до $Z=30\%$, приводить до підвищення теоретичної температури на $2070 - 1884 = 186^\circ\text{C}$ або ~ на 10%.

Приклад 4.3

Розрахувати процес згоряння коксу у вагранці, якщо частка вуглецю, що перетворюється на оксид вуглецю (CO), становить $y_H = 0,28$. Склад коксу, %: $C^P=82,0$; $H^P=0,3$; $S_L^P=1,2$; $N^P=1,0$; $O^P=0,5$; $W^P=2,0$; $A^P=13,0$.

Для розв'язання цього прикладу рекомендується використати методику, викладену в п.4.2.2.

Розв'язання

1. Питому витрату повітря можемо визначати за формулою (4.55):

$$v_{\text{пов}} = 0,0889 \cdot [(1 - y_H) \cdot C^P + 0,375 \cdot S_L^P] + 0,0445 \cdot y_H \cdot C^P + 0,265 \cdot H^P - 0,0333 \cdot O^P = 0,0889 \cdot [(1 - 0,28) \cdot 82,0 + 0,375 \cdot 1,2] + 0,0445 \cdot 0,28 \cdot 82,0 + 0,265 \cdot 0,3 - 0,0333 \cdot 0,5;$$

$$v_{\text{пов}} = 6,373 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

2. Визначаємо об'єми ($\text{м}^3/\text{кг}$) компонентів продуктів згоряння коксу:

вуглекислого газу

$$v_{\text{CO}_2} = 0,01866 \cdot (1 - y_H) \cdot C^P = 0,01866 \cdot (1 - 0,28) \cdot 82,0 = 1,102;$$

сірчистого газу

$$v_{\text{SO}_2} = 0,007 \cdot S_L^P = 0,007 \cdot 1,2 = 0,008;$$

оксиду вуглецю (за формулою (4.57))

$$v_{\text{CO}} = 0,01866 \cdot y_H \cdot C^P = 0,01866 \cdot 0,28 \cdot 82,0 = 0,429;$$

азоту

$$v_{\text{N}_2} = 0,79 \cdot v_{\text{пов}} + 0,008 \cdot N^P = 0,79 \cdot 6,373 + 0,008 \cdot 1,0 = 5,043;$$

водяної пари

$$v_{\text{H}_2\text{O}} = 0,111 \cdot H^P + 0,0124 \cdot W^P + 0,0161 \cdot v_{\text{пов}};$$

$$v_{\text{H}_2\text{O}} = 0,111 \cdot 0,3 + 0,0124 \cdot 2,0 + 0,0161 \cdot 6,373 = 0,161.$$

Сумарний об'єм ($\text{м}^3/\text{кг}$) продуктів згоряння

$$v_{п.з} = v_{CO_2} + v_{SO_2} + v_{CO} + v_{N_2} + v_{H_2O} =$$

$$= 1,102 + 0,008 + 0,429 + 5,043 + 0,161 = 6,743.$$

3. Склад продуктів згоряння такий, %:

$$CO_2 = \frac{v_{CO_2}}{v_{п.з}} \cdot 100 = \frac{1,102}{6,743} \cdot 100 = 16,34;$$

$$SO_2 = 0,12; CO = 6,36; N_2 = 74,79; H_2O = 2,39.$$

Перевірка:

$$CO_2 + SO_2 + CO + N_2 + H_2O = 16,34 + 0,12 + 6,36 + 74,79 +$$

$$+ 2,39 = 100\%.$$

4. Визначаємо калориметричну температуру горіння. Калорійність коксу заданого складу визначається за формулою Менделєєва:

$$Q_H^P = 339 \cdot C^P + 1030 \cdot H^P - 109 \cdot (O^P - S_n^P) - 25 \cdot W^P =$$

$$= 339 \cdot 82,0 + 1030 \cdot 0,3 - 109 \cdot (0,5 - 1,2) -$$

$$- 25 \cdot 2,0 = 28820 \text{ кДж/кг.}$$

Теплота згоряння відхідних газів визначається за формулою

$$Q_{зг}^{B,r} = 126 \cdot CO = 126 \cdot 6,36 = 801 \text{ кДж/м}^3 \text{ в.г.,}$$

а на 1 кг коксу це становить

$$Q'_H = Q_{зг}^{B,r} \cdot v_{п.з} = 801 \cdot 6,743 = 5404 \text{ кДж/кг.}$$

При неповному згорянні коксу (за умов прикладу 4.3) виділяється теплота

$$Q''_H = Q_H^P - Q'_H = 28820 - 5404 = 23416 \text{ кДж/кг.}$$

5. Калориметрична температура визначається з рівняння

$$t_k = \frac{Q''_H}{v_{п.з} \cdot c_{п.з}}.$$

Попередньо приймаємо $t_k = 2100^\circ\text{C}$ і знаходимо величину $v_{п.з} \cdot c_{п.з}$. Теплоємності складових продуктів згоряння визначаємо, прийнявши $t_k = 2100^\circ\text{C}$ (див. дод. 4):

$$v_{п.з} \cdot c_{п.з} = v_{CO_2} c_{CO_2} + v_{SO_2} c_{SO_2} + v_{CO} c_{CO} + v_{N_2} c_{N_2} + v_{H_2O} c_{H_2O};$$

$$v_{п.з} \cdot c_{п.з} = 1,102 \cdot 2,4359 + 0,008 \cdot 2,4359 + 0,429 \cdot 1,5102 + 5,043 \cdot 1,4892 + 0,161 \cdot 1,9824 = 11,18 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К});$$

$$t_k = \frac{Q''}{v_{п.з} \cdot c_{п.з}} = \frac{23416}{11,18} = 2094 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Відхилення розрахункової температури від попередньо прийнятої становить $\Delta t = 2100 - 2094 = 6^\circ\text{C}$, або 0,3%, що цілком можливо.

Приймаємо $t_k = 2094^\circ\text{C}$.

6. Визначаємо теоретичну температуру згоряння коксу (з урахуванням дисоціації CO_2 та H_2O).

Знаходимо частку кожного продукту згоряння:

$$r_{CO_2} = \frac{v_{CO_2}}{v_{п.з}} = \frac{1,102}{6,743} = 0,1634;$$

$$r_{SO_2} = 0,0012; \quad r_{CO} = 0,0636; \quad r_{N_2} = 0,7479; \quad r_{H_2O} = 0,0239.$$

Перевірка:

$$\Sigma r_i = r_{CO_2} + r_{SO_2} + r_{CO} + r_{H_2} + r_{H_2O} =$$

$$= 0,1634 + 0,0012 + 0,0636 + 0,7479 + 0,0239 = 1,000.$$

Визначаємо парціальний тиск вуглекислого газу та водяної пари в суміші продуктів згоряння, МПа:

$$p_{CO_2} = r_{CO_2} \cdot 0,1 = 0,1634 \cdot 0,1 = 0,0163;$$

$$p_{H_2O} = r_{H_2O} \cdot 0,1 = 0,0239 \cdot 0,1 = 0,0024.$$

Користуючись діаграмою (див. рис.4.1) і попередньо прийнявши $t_T = 1920^\circ\text{C}$, визначаємо частки CO_2 та H_2O , які розпалися внаслідок дисоціації: $\alpha_{CO_2} = 0,15$; $\alpha_{H_2O} = 0,06$.

Теплота, витрачена на дисоціацію CO_2 та H_2O , визначається за формулою

$$Q_{\text{дис}} = \alpha_{CO_2} \cdot v_{CO_2} \cdot q_{CO} + \alpha_{H_2O} \cdot v_{H_2O} \cdot q_{H_2} =$$

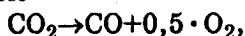
$$= 0,15 \cdot 1,102 \cdot 12640 + 0,06 \cdot 0,161 \cdot 10800 = 2194 \text{ кДж}/\text{кг}.$$

Теоретичну температуру згоряння коксу визначаємо за формулою

$$t_r = \frac{Q'_n - Q_{\text{дис}}}{v_{\text{п.з}} \cdot c_{\text{п.з}}}$$

Об'єми і склад продуктів згоряння коксу знаходимо з урахуванням дисоціації CO_2 та H_2O . Ці об'єми позначимо штрихом.

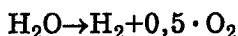
а) Об'єм оксиду вуглецю, що утворився при дисоціації CO_2 , згідно з реакцією



становить

$$v'_{\text{CO}} = v_{\text{CO}_2} \cdot \alpha_{\text{CO}_2} = 1,102 \cdot 0,15 = 0,165 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

б) Об'єм водню, що утворився при дисоціації згідно рівнянням



становить

$$v'_{\text{H}_2} = v_{\text{H}_2\text{O}} \cdot \alpha_{\text{H}_2\text{O}} = 0,161 \cdot 0,06 = 0,00966 \approx 0,01 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

в) Об'єм вуглекислого газу з урахуванням дисоціації (зменшується на величину об'єму утвореного CO) дорівнює

$$v'_{\text{CO}_2} = v_{\text{CO}_2} - v'_{\text{CO}} = 1,102 - 0,165 = 0,937 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

г) Об'єм водяної пари з урахуванням дисоціації H_2O (зменшується на величину об'єму утвореного водню) дорівнює

$$v'_{\text{H}_2\text{O}} = v_{\text{H}_2\text{O}} - v'_{\text{H}_2} = 0,161 - 0,01 = 0,151 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

д) Об'єм кисню, що утворився в результаті дисоціації CO_2 та H_2O , визначається за формулою

$$\begin{aligned} v'_{\text{O}_2} &= v_{\text{CO}_2} \cdot \alpha_{\text{CO}_2} \cdot 0,5 + v_{\text{H}_2\text{O}} \cdot \alpha_{\text{H}_2\text{O}} \cdot 0,5 = \\ &= 1,102 \cdot 0,15 \cdot 0,5 + 0,161 \cdot 0,06 \cdot 0,5 = 0,087 \text{ м}^3/\text{кг}. \end{aligned}$$

е) Загальний об'єм CO в продуктах згоряння коксу (за рахунок неповного згоряння вуглецю $v_{\text{CO}} = 0,429 \text{ м}^3/\text{кг}$ та дисоціації $v'_{\text{CO}} = 0,165 \text{ м}^3/\text{кг}$) становить

$$\Sigma v'_{CO} = v_{CO} + v'_{CO} = 0,429 + 0,165 = 0,594 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

е) Загальний об'єм продуктів згоряння з врахуванням дисоціації CO_2 та H_2O дорівнює

$$v'_{\text{п.з}} = v'_{\text{CO}_2} + v'_{\text{SO}_2} + \Sigma v'_{\text{CO}} + v'_{\text{H}_2\text{O}} + v'_{\text{N}_2} + v'_{\text{O}_2} + v'_{\text{H}_2}.$$

За умов цього прикладу об'єми сірчастого газу та азоту не змінюються, тому

$$v'_{\text{SO}_2} = v_{\text{SO}_2} \text{ та } v'_{\text{N}_2} = v_{\text{N}_2}.$$

Тобто

$$v'_{\text{п.з}} = 0,937 + 0,008 + 0,594 + 0,151 + 5,043 + 0,087 + 0,01;$$

$$v'_{\text{п.з}} = 6,830 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Склад (%) продуктів згоряння, з урахуванням дисоціації CO_2 та H_2O , визначається за формулою

$$\text{CO}'_2 = \frac{v'_{\text{CO}_2}}{v'_{\text{п.з}}} \cdot 100 = \frac{0,937}{6,83} \cdot 100 = 13,72;$$

$$\text{SO}'_2 = 0,12; \Sigma \text{CO}' = 8,70; \text{H}_2\text{O}' = 2,21;$$

$$\text{N}'_2 = 73,83; \text{O}'_2 = 1,27; \text{H}'_2 = 0,15.$$

Перевірка:

$$\begin{aligned} & \text{CO}'_2 + \text{SO}'_2 + \Sigma \text{CO}' + \text{H}_2\text{O}' + \text{N}'_2 + \text{O}'_2 + \text{H}'_2 = \\ & = 13,72 + 0,12 + 8,70 + 2,21 + 73,83 + 1,27 + 0,15 = 100\%. \end{aligned}$$

Визначаємо величину $v_{\text{п.з}} \cdot c_{\text{п.з}}$, попередньо прийнявши $t_{\text{T}} = 1920^\circ\text{C}$. Теплоємності складових продуктів згоряння визначаємо за температури $t_{\text{T}} = 1920^\circ\text{C}$ (див. дод. 4):

$$\begin{aligned} v'_{\text{п.з}} \cdot c_{\text{п.з}} &= v'_{\text{CO}_2} \cdot c_{\text{CO}_2} + v'_{\text{SO}_2} \cdot c_{\text{SO}_2} + \Sigma v'_{\text{CO}} \cdot c_{\text{CO}} + \\ &+ v'_{\text{H}_2\text{O}} \cdot c_{\text{H}_2\text{O}} + v'_{\text{N}_2} \cdot c_{\text{N}_2} + v'_{\text{O}_2} \cdot c_{\text{O}_2} + v'_{\text{H}_2} \cdot c_{\text{H}_2} \\ v'_{\text{п.з}} \cdot c_{\text{п.з}} &= 0,937 \cdot 2,4104 + 0,008 \cdot 2,4104 + 0,594 \cdot 1,4985 + \\ &+ 0,151 \cdot 1,9464 + 5,043 \cdot 1,4771 + 0,087 \cdot 1,5632 + 0,01 \cdot 1,4012 = \\ &= 11,061 \text{ кДж/ (кг} \cdot \text{К)}. \end{aligned}$$

$$t_{\text{T}} = \frac{Q''_{\text{H}} - Q_{\text{дис}}}{v'_{\text{п.з}} \cdot c_{\text{п.з}}} = \frac{23416 - 2194}{11,061} = 1919^\circ\text{C}.$$

Відхилення розрахункової температури від попередньо прийнятої становить $1929-1919=10^{\circ}\text{C}$, або 0,05%, що цілком можливо.

Приймаємо $t_T=1919^{\circ}\text{C}$.

7. Визначаємо коефіцієнт витрати повітря (для умов цього прикладу) з рівняння (4.60):

$$\alpha = 1 - \frac{\text{CO}}{69,4} = 1 - \frac{6,36}{69,4} = 0,91.$$

8. Перевіряємо правильність прийнятої (на початку розрахунку) частки вуглецю, що згоряє в CO.

Величина y_H обчислюється за формулою (4.54):

$$y_H = \frac{126 \cdot \text{CO} \cdot v_{\text{с.г}}}{235 \cdot C^P};$$

тут $\text{CO} = 6,36\%$;

$$v_{\text{с.г}} = v_{\text{п.з}} - v_{\text{H}_2\text{O}} = 6,743 - 0,161 = 6,582 \text{ м}^3 / \text{кг}$$

$C^P = 82,0\%$;

$$y_H = \frac{126 \cdot 6,36 \cdot 6,582}{235 \cdot 82,0} = 0,274.$$

Значення y_H мало відхиляється від прийнятого на початку розрахунку $y_H = 0,28$ (приблизно на 2%). Тому розрахунок процесу згоряння коксу за умов прикладу слід вважати правильним.

Приклад 4.4

Визначити склад продуктів неповного згоряння природного газу Шебелинського родовища при виробництві сажі. Коефіцієнт витрати повітря $\alpha=0,4$, температура продуктів згоряння 1200 К . Склад природного газу за об'ємом, %:

$\text{CH}_4 = 92,8$; $\text{C}_2\text{H}_6 = 3,9$; $\text{C}_3\text{H}_8 = 1,0$; $\text{C}_4\text{H}_{10} = 0,4$;

$\text{CO}_2 = 0,1$; $\text{N}_2 = 1,8$.

Вологовміст газу $d_T=12 \text{ г/м}^3$.

Методичні пояснення

При здійсненні реформації CH_4 з виділенням сажистого вуглецю вважається, що за рахунок кисню повітря повністю згоряє частина газу, пропорційна витраті повітря α . Вуглеводні, що не згоріли під дією теплоти розкладаються з виділенням сажистого вуглецю.

Позначимо:

x — кількість CO_2 , яка прореагувала з відповідною кількістю вуглецю з утворенням CO за реакцією $\text{CO}_2 + \text{C} = 2\text{CO}$;

y — кількість метану CH_4 , що розклалась під дією теплоти за реакцією $\text{CH}_4 \rightarrow 2\text{H}_2 + \text{C}_T$.

Розв'язання

Приклад розв'язуємо за методикою, викладеною в п.4.1.2 та п.4.2.3.А.

Розрахунок ведемо на 100 м^3 газу.

1. Витрату повітря при $\alpha=1,0$ визначаємо використовуючи формулу (4.27):

$$V_{\text{пов}}^{\circ} = 4,76 \cdot (0,5 \cdot \text{CO} + 0,5 \cdot \text{H}_2 + 1,5 \cdot \text{H}_2\text{S} + \Sigma (m + \frac{n}{4}) \cdot \text{C}_m\text{H}_n - \text{O}_2^{\text{пал}});$$

$$V_{\text{пов}}^{\circ} = 4,76 \cdot (0,5 \cdot 0 + 0,5 \cdot 0 + 1,5 \cdot 0 + 2 \cdot \text{CH}_4 + 3,5 \cdot \text{C}_2\text{H}_6 + 5 \cdot \text{C}_3\text{H}_8 + 6,5 \cdot \text{C}_4\text{H}_{10} - 0) = 4,76 \cdot (2 \cdot 92,8 + 3,5 \cdot 3,9 + 5 \cdot 1,0 + 6,5 \cdot 0,4);$$

$$V_{\text{пов}}^{\circ} = 984,6 \text{ м}^3.$$

Витрата повітря при $\alpha=0,4$ становить

$$V_{\text{пов}} = V_{\text{пов}}^{\circ} \cdot \alpha = 984,6 \cdot 0,4 = 393,8 \text{ м}^3.$$

2. В об'єм продуктів неповного згоряння входять, м^3 :
об'єм азоту

$$V_{\text{N}_2} = 0,79 \cdot V_{\text{пов}} + \text{N}_2^{\text{пал}} = 0,79 \cdot 393,8 + 1,8 = 312,9;$$

об'єм вуглекислого газу

$$V_{\text{CO}_2} = \alpha \cdot (\text{CO} + \text{CH}_4 + \Sigma m \cdot \text{C}_m\text{H}_n) + \text{CO}_2 - x = \alpha \cdot (1 \cdot \text{CO} + 1 \cdot \text{CH}_4 + 2 \cdot \text{C}_2\text{H}_6 + 3 \cdot \text{C}_3\text{H}_8 + 4 \cdot \text{C}_4\text{H}_{10}) + \text{CO}_2 - x = 0,4 \cdot (0 + 1 \cdot 92,8 + 2 \cdot 3,9 + 3 \cdot 1,0 + 4 \cdot 0,4) + 0,1 - x$$

$$V_{\text{CO}_2} = 42,18 - x;$$

об'єм оксиду вуглецю

$$V_{\text{CO}} = (1 - \alpha) \cdot \text{CO} + 2 \cdot x = (1,0 - 0,4) \cdot 0 + 2 \cdot x,$$

$$V_{\text{CO}} = 2 \cdot x;$$

об'єм водяної пари

$$V_{\text{H}_2\text{O}} = \alpha \cdot (\text{H}_2 + 2 \cdot \text{CH}_4 + \sum \frac{n}{2} \cdot \text{C}_m\text{H}_n + \text{H}_2\text{S} + 0,016 \cdot V_{\text{пов}}^{\circ}) + \\ + 0,124 \cdot d_r = \alpha \cdot (1 \cdot \text{H}_2 + 2 \cdot \text{CH}_4 + 3 \cdot \text{C}_2\text{H}_6 + 4 \cdot \text{C}_3\text{H}_8 + 5 \cdot \text{C}_4\text{H}_{10} + \\ + \text{H}_2\text{S} + 0,016 \cdot V_{\text{пов}}^{\circ}) + 0,124 \cdot d_r = 0,4 \cdot (0 + 2 \cdot 92,8 + 3 \cdot 3,9 + \\ + 4 \cdot 1,0 + 5 \cdot 0,4 + 0 + 0,016 \cdot 984,6) + 0,124 \cdot 12;$$

$$V_{\text{H}_2\text{O}} = 89,1 \text{ м}^3;$$

об'єм метану

$$V_{\text{CH}_4} = (1 - \alpha) \cdot \text{CH}_4 - y = (1 - 0,4) \cdot 92,8 - y,$$

$$V_{\text{CH}_4} = 55,68 - y;$$

об'єм водню

$$V_{\text{H}_2} = (1 - \alpha) \cdot (\text{H}_2 + \sum \frac{n}{2} \cdot \text{C}_m\text{H}_n) + 2 \cdot y = (1 - \alpha) \cdot (1 \cdot \text{H}_2 + 3 \cdot \text{C}_2\text{H}_6 + \\ + 4 \cdot \text{C}_3\text{H}_8 + 5 \cdot \text{C}_4\text{H}_{10}) + 2 \cdot y = (1 - 0,4) \cdot (0 + 3 \cdot 3,9 + 4 \cdot 1,0 + 5 \cdot 0,4) + 2 \cdot y;$$

$$V_{\text{H}_2} = 10,62 + 2 \cdot y.$$

Для визначення величини y напишемо рівняння константи хімічної рівноваги реакції $\text{CH}_4 \rightarrow 2\text{H}_2 + \text{C}_T$ за температури 1200 К (див. дод. 8):

$$K_C^{\text{IV}} = \frac{\text{CH}_4}{(\text{H}_2)^2} = \frac{V_{\text{CH}_4}}{(V_{\text{H}_2})^2} = \frac{55,68 - y}{(10,62 + 2y)^2} = 0,0166.$$

Здійснивши необхідні перетворення, одержимо квадратне рівняння

$$0,0664 \cdot y^2 + 1,705 \cdot y - 53,81 = 0.$$

Розв'язуючи це рівняння, знаходимо $y = 18,95 \text{ м}^3$.

Для визначення величини x напишемо рівняння кон-

станти хімічної рівноваги реакції $\text{CO} + \text{H}_2\text{O} \leftrightarrow \text{CO}_2 + \text{H}_2$ за температури 1200 К (див. дод.8):

$$K_C^V = \frac{\text{CO}_2 \cdot \text{H}_2}{\text{CO} \cdot \text{H}_2\text{O}} = \frac{V_{\text{CO}_2} \cdot V_{\text{H}_2}}{V_{\text{CO}} \cdot V_{\text{H}_2\text{O}}} = 0,7162.$$

Визначаємо об'єми, м³:

$$V_{\text{CO}_2} = 42,18 - x;$$

$$V_{\text{H}_2} = 10,62 + 2 \cdot y = 10,62 + 2 \cdot 18,95 = 48,52;$$

$$V_{\text{CO}} = 2x;$$

$$V_{\text{H}_2\text{O}} = 89,1;$$

Рівняння рівноваги матиме вигляд

$$K_C^V = \frac{(42,18 - x) \cdot 48,52}{2x \cdot 89,1} = 0,7162.$$

Розв'язуючи це рівняння, знаходимо
 $x = 11,62.$

Визначаємо об'єми (м³) продуктів згоряння, використовуючи значення x та y :

$$V_{\text{CO}_2} = 42,18 - x = 42,18 - 11,62 = 30,56;$$

$$V_{\text{CO}} = 2x = 2 \cdot 11,62 = 23,24;$$

$$V_{\text{CH}_4} = 55,68 - y = 55,68 - 18,95 = 36,73;$$

$$V_{\text{H}_2} = 48,52; V_{\text{H}_2\text{O}} = 89,1; V_{\text{N}_2} = 312,9.$$

Об'єм продуктів згоряння на 1 м³ природного газу становитиме (м³/м³):

$$\nu_{\text{CO}_2} = \frac{V_{\text{CO}_2}}{100} = \frac{30,56}{100} = 0,306.$$

$$\nu_{\text{CO}} = 0,232; \nu_{\text{CH}_4} = 0,367; \nu_{\text{H}_2} = 0,485; \nu_{\text{H}_2\text{O}} = 0,891;$$

$$\nu_{\text{N}_2} = 3,129.$$

Повний об'єм продуктів згоряння (на 1 м³ природного газу) становитиме:

$$\begin{aligned}
 v_{\text{п.з}} &= v_{\text{CO}_2} + v_{\text{CO}} + v_{\text{CH}_4} + v_{\text{H}_2} + v_{\text{H}_2\text{O}} + v_{\text{N}_2} = \\
 &= 0,306 + 0,232 + 0,367 + 0,485 + 0,891 + 3,129; \\
 v_{\text{п.з}} &= 5,410.
 \end{aligned}$$

Склад продуктів згоряння в процентах за об'ємом визначаємо так:

$$\text{CO}_2 = \frac{v_{\text{CO}_2}}{v_{\text{п.з}}} \cdot 100 = 5,66;$$

$$\text{CO} = 4,29; \text{CH}_4 = 6,78; \text{H}_2 = 8,96; \text{H}_2\text{O} = 16,47; \text{N}_2 = 57,84.$$

Перевірка:

$$\begin{aligned}
 \text{CO}_2 + \text{CO} + \text{CH}_4 + \text{H}_2 + \text{H}_2\text{O} + \text{N}_2 &= \\
 = 5,66 + 4,29 + 6,78 + 8,96 + 16,47 + 57,84 &= 100 \%.
 \end{aligned}$$

3. Визначаємо кількість сажистого вуглецю, що утворюється при спалюванні природного газу в даних умовах за формулою (4.75):

$$C_T = 120,1 \cdot \left[(1-\alpha) \cdot \sum \frac{m \cdot V_{C_m H_n}}{(v_\mu)_{C_m H_n}} + \frac{\Delta V_{\text{CH}_4} - 0,5 \cdot \Delta V_{\text{CO}}}{22,4} \right],$$

де $(v_\mu)_{C_m H_n}$ — мольний об'єм, тобто об'єм, який займає 1 моль високомолекулярних вуглеводнів, м³/моль (див. дод.1); ΔV_{CH_4} — об'єм метану, що розпався в робочій камері установки.

Із розрахунку одержуємо

$$\Delta V_{\text{CH}_4} = y = 18,95 \text{ м}^3;$$

ΔV_{CO} — об'єм оксиду вуглецю, що утворився в результаті реакції $\text{CO}_2 + \text{C} \leftrightarrow \text{CO}$:

$$\Delta V_{\text{CO}} = 23,24 \text{ м}^3;$$

$$C_T = 120,1 \times \left[(1-0,4) \cdot \left(\frac{2 \cdot C_{C_2H_6}}{(v_{\mu})_{C_2H_6}} + \frac{3 \cdot C_{C_3H_8}}{(v_{\mu})_{C_3H_8}} + \frac{4 \cdot C_{C_4H_{10}}}{(v_{\mu})_{C_4H_{10}}} \right) + \frac{\Delta V_{CH_4} - 0,5 \Delta V_{CO}}{22,4} \right] =$$

$$= 120,1 \cdot \left[0,6 \cdot \left(\frac{2 \cdot 3,9}{22,16} + \frac{3 \cdot 1,0}{22,0} + \frac{4 \cdot 0,4}{21,78} \right) + \frac{18,95 - 0,5 \cdot 23,24}{22,4} \right] =$$

$$= 79,8 \text{ г/м}^3 \text{ природного газу}$$

або

$$C'_T = \frac{C_T}{v_{п.з}} = \frac{79,8}{5,410} = 14,75 \text{ г/м}^3 \text{ продуктів згоряння.}$$

Приклад 4.5

Розрахувати процес двоступеневого згоряння палива в печі для безоксидного нагріву сталевих виробів. Паливо — природний газ Полтавського родовища. Склад сухого газу в процентах за об'ємом: $CH_4=85,8$; $C_2H_6=0,2$; $C_3H_8=0,1$; $C_4H_{10}=0,1$; $CO_2=0,1$; $N_2^{пал} = 13,7\%$.

Коефіцієнт витрати повітря в робочій камері неповного згоряння (внутрішній камері) становить $\alpha'=0,5$, а в зовнішній камері (камері допалювання) — $\alpha''=0,6$. Загальний коефіцієнт витрати повітря

$$\alpha = \alpha' + \alpha'' = 0,5 + 0,6 = 1,1.$$

При розрахунках прийняти:

- 1) температуру у камері згоряння — 1300°C ;
- 2) температуру нагріву повітря (первинного), що надходить у робочу камеру $t'_{нов} = 500^\circ\text{C}$;
- 3) температуру нагріву повітря (вторинного), що надходить у зовнішню камеру (камеру допалювання) $t'_{нов} = 800^\circ\text{C}$.

Методичні пояснення

За цього прикладу відповідно до рекомендацій професора В. Ф. Копитова приймаються припущення, що в продуктах неповного згоряння палива (у робочій камері) відсутні сажилий вуглець, а також метан (див. 4.2.3Б).

Розв'язання

1. Визначаємо теплоту згоряння природного газу за формулою (4.25):

$$Q_H^c = 0,01 \cdot (Q_{CH_4} \cdot CH_4 + Q_{C_2H_6} \cdot C_2H_6 + Q_{C_3H_8} \cdot C_3H_8 + Q_{C_4H_{10}} \cdot C_4H_{10}),$$

де CH_4 , C_2H_6 , C_3H_8 , C_4H_{10} — вміст відповідного газу в паливі, об'ємна частка, %;

Q_{CH_4} , $Q_{C_2H_6}$, $Q_{C_3H_8}$, $Q_{C_4H_{10}}$ — теплота згоряння кожного компонента газу (див. дод. 1);

$$Q_H^c = 0,01 \cdot (35820 \cdot 85,8 + 63750 \cdot 0,2 + 91400 \cdot 0,1 + 118000 \cdot 0,1);$$

$$Q_H^c = 31070 \text{ кДж/м}^3.$$

2. Визначаємо теоретично необхідний об'єм повітря для повного згоряння 1 м^3 природного газу за формулою (4.27):

$$v_{пов}^0 = 0,0476 \cdot (0,5CO + 0,5H_2 + 2CH_4 + \sum \left(m + \frac{n}{4} \right) C_m H_n + 1,5H_2S - O_2^{нал}).$$

Враховуючи, що $CO=0$; $H_2=0$; $H_2S=0$; $O_2^{нал}=0$, формула матиме вигляд

$$v_{пов}^0 = 0,0476 \cdot (2CH_4 + 3,5C_2H_6 + 5C_3H_8 + 6,5C_4H_{10}) = 0,0476 \cdot (2 \cdot 85,8 + 3,5 \cdot 0,2 + 5 \cdot 0,1 + 6,5 \cdot 0,1) = 8,256 \text{ м}^3/\text{м}^3.$$

Розрахунки об'ємів повітря та продуктів згоряння в робочій камері печі безокисного нагріву ведемо на 100 м^3 природного газу.

$$V'_{пов} = \alpha' \cdot v_{пов}^0 \cdot 100 = 0,5 \cdot 8,256 \cdot 100;$$

$$V'_{пов} = 412,8 \text{ м}^3 / (100 \text{ м}^3 \text{ природного газу}).$$

3. Визначаємо об'єм продуктів згоряння.

3.1. Об'єм азоту в продуктах згоряння становить

$$V'_{N_2} = 0,79 \cdot V'_{пов} + N_2^{нал} = 0,79 \cdot 412,8 + 13,7;$$

$$V'_{N_2} = 339,8 \text{ м}^3 / (100 \text{ м}^3 \text{ природного газу}).$$

3.2. У 100 м³ природного газу заданого складу міститься: CO₂=0,1 м³; CH₄=85,8 м³; C₂H₆=0,2 м³; C₃H₈=0,1 м³; C₄H₁₀=0,1 м³; CO₂=0,1 м³; N₂ = 13,7 м³.

3.3. У результаті неповного згоряння природного газу одержимо об'єми (м³) продуктів згоряння, які позначимо так:

CO₂-*x*; CO-*y*; H₂O-*z*; H₂-*u*; N₂-339,8.

3.4. Складаємо чотири рівняння з чотирма невідомими.

3.4.1. З матеріального балансу вуглецю (кількість вуглецю в продуктах неповного згоряння дорівнює кількості вуглецю у складі природного газу):

$$x + y = 1 \cdot \text{CO}_2 + 1 \cdot \text{CH}_4 + 2 \cdot \text{C}_2\text{H}_6 + 3 \cdot \text{C}_3\text{H}_8 + 4 \cdot \text{C}_4\text{H}_{10} = \\ = 1 \cdot 0,1 + 1 \cdot 85,8 + 2 \cdot 0,2 + 3 \cdot 0,1 + 4 \cdot 0,1;$$

$$x + y = 87,0.$$

3.4.2. З матеріального балансу водню:

$$2z + 2u = 4 \cdot \text{CH}_4 + 6 \cdot \text{C}_2\text{H}_6 + 8 \cdot \text{C}_3\text{H}_8 + 10 \cdot \text{C}_4\text{H}_{10} = \\ = 4 \cdot 85,8 + 6 \cdot 0,2 + 8 \cdot 0,1 + 10 \cdot 0,1;$$

$$2z + 2u = 346,2.$$

3.4.3. З матеріального балансу кисню

$$2x + y + z = 2 \cdot \text{CO}_2 + 2 \cdot 0,21 \cdot V'_{\text{пов}} = 2 \cdot 0,1 + 2 \cdot 0,21 \cdot 412,8;$$

$$2x + y + z = 173,6.$$

3.4.4. Константа хімічної рівноваги водяного газу визначається за формулою

$$K_c^v = \frac{\text{CO}_2 \cdot \text{H}_2}{\text{CO} \cdot \text{H}_2\text{O}} = \frac{xu}{yz}.$$

За температури 1300+273=1573 К значення цієї константи хімічної рівноваги

$$K_c^v = 0,3394 \text{ (див. дод. 8).}$$

3.4.5. Із рівняння матеріального балансу вуглецю $x+y=87,0$ знаходимо $x=87,0-y$.

Із рівняння матеріального балансу кисню $2x+y+z=173,6$

знаходимо $z=173,6-2x-y=173,6-2(87-y)-y$; $z=y-0,4$.

Із рівняння матеріального балансу водню $2z+2u=346,2$ знаходимо $u=173,5-y$.

Тоді рівняння константи рівноваги продуктів неповного згоряння матиме вигляд

$$K_c^v = \frac{x \cdot u}{y \cdot z} = \frac{(87-y) \cdot (173,5-y)}{y(y-0,4)} = 0,3394.$$

Здійснивши математичні перетворення одержимо квадратне рівняння $0,6606y^2 - 260,36y + 15094,5 = 0$. Звідки знаходимо $y_1=326,58$ та $y_2=66,5$. Значенням $y_1=326,58$ нехтуємо як явно нереальним. Приймаємо $y=y_2=66,5$.

Із рівнянь матеріального балансу вуглецю, кисню та водню знаходимо

$$\begin{aligned} x &= 87,0 - y = 87,0 - 66,5 = 20,5; & x &= 20,5; \\ z &= y - 0,4 = 66,5 - 0,4 = 66,1; & z &= 66,1; \\ u &= 173,5 - y = 173,5 - 66,5 = 107,0; & u &= 107,0. \end{aligned}$$

3.4.6. Об'єм продуктів неповного згоряння при $\alpha=0,5$, віднесений до 1 м^3 газу (палива) становитиме: $v_{\text{CO}_2} = \frac{V_{\text{CO}_2}}{100}$ і т.ін.

$$v'_{\text{CO}_2} = 0,205; v'_{\text{CO}} = 0,665; v'_{\text{H}_2\text{O}} = 0,661; v'_{\text{H}_2} = 1,070;$$

$$v'_{\text{N}_2} = 3,398; v'_{\text{пов}} = 4,128.$$

Загальний об'єм продуктів неповного згоряння дорівнюватиме

$$\begin{aligned} v'_{\text{п.з}} &= v'_{\text{CO}_2} + v'_{\text{CO}} + v'_{\text{H}_2\text{O}} + v'_{\text{H}_2} + v'_{\text{N}_2} = \\ &= 0,205 + 0,665 + 0,661 + 1,070 + 3,398; \end{aligned}$$

$$v'_{\text{п.з}} = 5,999 \text{ м}^3/\text{м}^3.$$

3.4.7. Визначаємо склад продуктів неповного згоряння, %:

$$\text{CO}'_2 = \frac{v'_{\text{CO}_2}}{v'_{\text{п.з}}} \cdot 100 = \frac{0,205}{5,999} \cdot 100 = 3,42;$$

$$\text{CO}' = 11,08; \text{H}_2\text{O}' = 11,02; \text{H}'_2 = 17,84; \text{N}'_2 = 56,64.$$

Перевірка:

$$\begin{aligned} \text{CO}'_2 + \text{CO}' + \text{H}_2\text{O}' + \text{H}'_2 + \text{N}'_2 &= \\ &= 3,42 + 11,08 + 11,02 + 17,84 + 56,64 = 100\%. \end{aligned}$$

4. Визначаємо теплоту згоряння захисного газу (продуктів неповного згоряння):

$$(Q_{\text{H}}^{\text{C}})_{\text{н.зг}} = 126,4 \cdot \text{CO} + 108 \cdot \text{H}_2 = 126,4 \cdot 11,08 + 108 \cdot 17,84;$$

$$(Q_{\text{H}}^{\text{C}})_{\text{н.зг}} = 3327 \text{ кДж}/(\text{м}^3 \text{ продуктів згоряння})$$

або на 1 м^3 палива (природного газу);

$$(Q_{\text{H}}^{\text{C}})'' = (Q_{\text{H}}^{\text{C}})_{\text{н.зг}} \cdot \nu_{\text{п.з}} = 3327 \cdot 5,999;$$

$$(Q_{\text{H}}^{\text{C}})'' = 19959 \text{ кДж}/\text{м}^3.$$

Теплота, що виділяється при неповному згорянні палива (природного газу):

$$(Q_{\text{H}}^{\text{C}})' = Q_{\text{H}}^{\text{C}} - (Q_{\text{H}}^{\text{C}})'' = 31070 - 19959;$$

$$(Q_{\text{H}}^{\text{C}})' = 11111 \text{ кДж}/\text{м}^3.$$

Калориметрична температура продуктів неповного згоряння палива при використанні повітря, нагрітого до температури $t'_{\text{пов}} = 500^\circ\text{C}$, становитиме

$$t' = \frac{(Q_{\text{H}}^{\text{C}})' + \nu'_{\text{пов}} \cdot c'_{\text{пов}} \cdot t'_{\text{пов}}}{\nu'_{\text{CO}_2} \cdot c'_{\text{CO}_2} + \nu'_{\text{CO}} \cdot c'_{\text{CO}} + \nu'_{\text{H}_2\text{O}} \cdot c'_{\text{H}_2\text{O}} + \nu'_{\text{H}_2} \cdot c'_{\text{H}_2} + \nu'_{\text{N}_2} \cdot c'_{\text{N}_2}}$$

Попередньо задаємося $t'_k = 1540^\circ\text{C}$ і визначаємо теплємності компонентів продуктів згоряння при цій температурі c'_{CO_2} , c'_{CO} тощо (див дод. 4).

$$t'_k = \frac{11111 + 4,128 \cdot 1,3427 \cdot 500}{0,205 \cdot 2,3434 + 0,665 \cdot 1,4694 + 0,661 \cdot 1,8621 + 1,07 \cdot 1,3706 + 3,398 \cdot 1,4475};$$

$$t' = 1542^\circ\text{C}.$$

Розбіжність з попередньо прийнятою калориметричною температурою становить $1542 - 1540 = 2^\circ\text{C}$, або $0,13\%$, що цілком можливо.

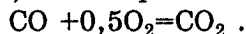
Остаточно приймаємо $t'_k = 1542^\circ\text{C}$.

5. Визначаємо об'єм повітря (вторинного), що вводиться в камеру допалювання:

$$v_{\text{пов}}'' = \alpha'' \cdot v_{\text{пов}}^0 = 0,6 \cdot 8,256 = 4,954 \text{ м}^3/\text{м}^3.$$

6. Визначаємо об'єм продуктів повного згоряння в камері зовнішнього півмуфеля (камери допалювання).

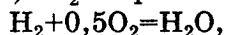
а) CO згоряє в CO_2 ,



При цьому об'єм газу не змінюється, тому

$$v_{\text{CO}_2}'' = v_{\text{CO}_2}' + v_{\text{CO}}' = 0,205 + 0,665 = 0,870 \text{ м}^3/\text{м}^3.$$

б) H_2 згоряє в H_2O , зберігаючи свій об'єм:



$$\text{тому } v_{\text{H}_2\text{O}}'' = v_{\text{H}_2\text{O}}' + v_{\text{H}_2}' = 0,661 + 1,070 = 1,731 \text{ м}^3/\text{м}^3.$$

в) Об'єм азоту

$$v_{\text{N}_2}'' = 0,79 \cdot v_{\text{пов}}^0 \cdot \alpha + 0,01 \cdot N_2^{\text{пал}} = 0,79 \cdot 8,256 \cdot 1,1 + 0,01 \cdot 13,7;$$

$$v_{\text{N}_2}'' = 7,311 \text{ м}^3/\text{м}^3.$$

г) Об'єм кисню знаходимо за формулою

$$v_{\text{O}_2}'' = 0,21(\alpha - 1) \cdot v_{\text{пов}}^0 = 0,21(1,1 - 1) \cdot 8,256 = 0,173 \text{ м}^3/\text{м}^3.$$

д) Об'єм продуктів повного згоряння у зовнішньому півмуфелі

$$v_{\text{п.з}}'' = v_{\text{CO}_2}'' + v_{\text{H}_2\text{O}}'' + v_{\text{N}_2}'' + v_{\text{O}_2}'' = 0,870 + 1,731 + 7,311 + 0,173;$$

$$v_{\text{п.з}}'' = 10,085 \text{ м}^3/\text{м}^3.$$

7. Визначаємо склад продуктів повного згоряння палива в камері зовнішнього півмуфеля, %:

$$\text{CO}_2'' = \frac{v_{\text{CO}_2}''}{v_{\text{п.з}}''} \cdot 100 = \frac{0,870}{10,085} \cdot 100 = 8,63;$$

$$\text{H}_2\text{O}'' = 17,16; \text{N}_2'' = 72,50; \text{O}_2'' = 1,71.$$

Перевірка:

$$\text{CO}_2'' + \text{H}_2\text{O}'' + \text{N}_2'' + \text{O}_2'' = 8,63 + 17,16 + 72,50 + 1,71 = 100\%.$$

8. Калориметрична температура повного згоряння палива в зовнішній камері печі при використанні повітря нагрітого до температури $t''_{\text{пов}} = 800^\circ\text{C}$:

$$t''_{\text{к}} = \frac{(Q_{\text{н}}^{\text{с}})'' + v''_{\text{пов}} \cdot c''_{\text{пов}} \cdot t''_{\text{пов}}}{v''_{\text{CO}_2} \cdot c''_{\text{CO}_2} + v''_{\text{H}_2\text{O}} \cdot c''_{\text{H}_2\text{O}} + v''_{\text{N}_2} \cdot c''_{\text{N}_2} + v''_{\text{O}_2} \cdot c''_{\text{O}_2}}.$$

Попередньо приймаємо $t''_{\text{к}} = 1600^\circ\text{C}$ і визначаємо теплоємності компонентів продуктів повного згоряння при цій температурі c''_{CO_2} , $c''_{\text{H}_2\text{O}}$ тощо (див. дод. 4).

$$t''_{\text{к}} = \frac{19959 + 4,954 \cdot 1,4708 \cdot 800}{0,870 \cdot 2,3555 + 1,731 \cdot 1,8761 + 7,311 \cdot 1,4528 + 0,173 \cdot 1,5378}$$

$$t''_{\text{к}} = 1593^\circ\text{C}.$$

Розбіжність з попередньо прийнятою калориметричною температурою становить $1600 - 1593 = 7^\circ\text{C}$, або 0,44%, що цілком можливо.

Остаточо приймаємо $t''_{\text{к}} = 1593^\circ\text{C}$.

Контрольні запитання

1. Що входить до поняття розрахунку процесу горіння?
2. Наведіть формулу розрахунку калорійності твердого та рідкого палива.
3. Наведіть формулу розрахунку калорійності газоподібного палива.
4. Напишіть формулу для визначення об'єму окисника за умови повного спалювання твердого та рідкого палива.
5. Напишіть формулу для визначення об'єму окисника за умови повного спалювання газоподібного палива.
6. Напишіть формулу для визначення об'єму та складу продуктів згоряння за повного спалювання твердого та рідкого палива.
7. Напишіть формули для визначення об'єму та складу продуктів згоряння за повного спалювання газоподібного палива.

8. Наведіть розрахункові формули для визначення температури продуктів згоряння.
9. Як визначити об'єм повітря, збагаченого киснем, необхідний для спалювання 1 кг (1 м^3) палива?
10. Наведіть методику розрахунку теоретичної температури згоряння палива (з урахуванням процесу дисоціації продуктів згоряння — CO_2 та H_2O).
11. Наведіть методику розрахунку процесу неповного згоряння палива з утворенням оксиду вуглецю (CO).
12. Наведіть методику розрахунку процесу неповного згоряння газоподібного палива за умови реформації газу ($\alpha < 1$) з виділенням сажистого вуглецю.
13. Наведіть методику розрахунку процесу неповного згоряння газоподібного палива за умови реформації газу ($\alpha < 1$) без сажоутворення.

ТЕПЛОВІ, ТЕПЛОТЕХНІЧНІ ТА КОНСТРУКТИВНІ СХЕМИ ВИСОКО- ТЕМПЕРАТУРНИХ УСТАНОВОК

5.1. Класифікація високотемпературних теплотехнологічних процесів

Високотемпературні теплотехнологічні процеси (ВТП) дуже різноманітні і тісно пов'язані з використанням теплової енергії для здійснення основного технологічного процесу (нагрівання, плавлення, перебігу певних хімічних реакцій тощо).

В основу їх класифікації доцільно покласти фізичні та фізико-хімічні процеси, які характеризують якість здійснення основного процесу (швидкість, повноту перетворень тощо) і керуються за допомогою теплотехнічних засобів. І саме тому окремі ВТП визначаються такими факторами:

- 1) інтенсивністю підведення теплоти на поверхню матеріалів, що обробляються (наприклад, нагрів тіл при $Bi \leq 1$);
- 2) інтенсивністю перенесення теплоти всередині матеріалу, що обробляється (наприклад нагрів тіл при $Bi \geq 1$);
- 3) інтенсивністю підведення маси матеріалів, що обробляються, до поверхні їх реакції (деякі окисні та відновні процеси, випалювання або плавлення);
- 4) інтенсивністю молекулярного перенесення маси всередині матеріалу, що обробляється (обробка багатокомпонентних початкових матеріалів, наприклад, варіння скла, сталі тощо);
- 5) інтенсивністю перемішування фаз (твердих, рідких) у зоні їх термічної обробки;

6) швидкістю власне хімічного реагування (хімічні реакції при недостатніх рівнях температур);

7) швидкістю поділу цільових та супутніх продуктів (плавка мідних та інших руд у швидкісних печах);

8) сукупністю двох або більше факторів, що перелічені вище.

Така класифікація дає підстави для уніфікації засобів та способів теплотехнічного та конструктивного оформлення різних технологічних процесів. Разом з тим така класифікація дає змогу уніфікувати критерії оцінок теплотехнічної та технологічної досконалості паливних печей.

Технологічні процеси, що реалізуються в паливних печах, можуть бути представлені як сукупність окремих їх стадій. Ці стадії відрізняються між собою особливостями фізичних та фізико-хімічних перетворень початкових матеріалів, особливостями теплового та температурного режимів їх термічної обробки.

На рис.5.1 наведено деякі приклади схем технологічних процесів, що реалізуються:

I — у печах для нагріву крупних виробів та заготовок;

II — у склоплавильних печах;

III — у печах для випалювання вапна;

IV — в обертових печах виробництва цементного клінкеру;

V — у відбивних печах кольорової металургії.

Такі схеми, доповнені конкретними умовами проведення окремих стадій процесу, дають повне уявлення про особливості певного технологічного процесу та можуть слугувати основою для подальших теплотехнічних та конструктивних розробок з їх оформлення.

Промислові печі зручно класифікувати за спільністю теплотехнічних методів (принципів) оформлення організації технологічних процесів.

Під теплотехнічними принципами оформлення технологічних процесів у паливних печах розуміють характерну сукупність теплових, аеродинамічних, механічних та інших умов організації термічної обробки матеріалів (табл.5.1).

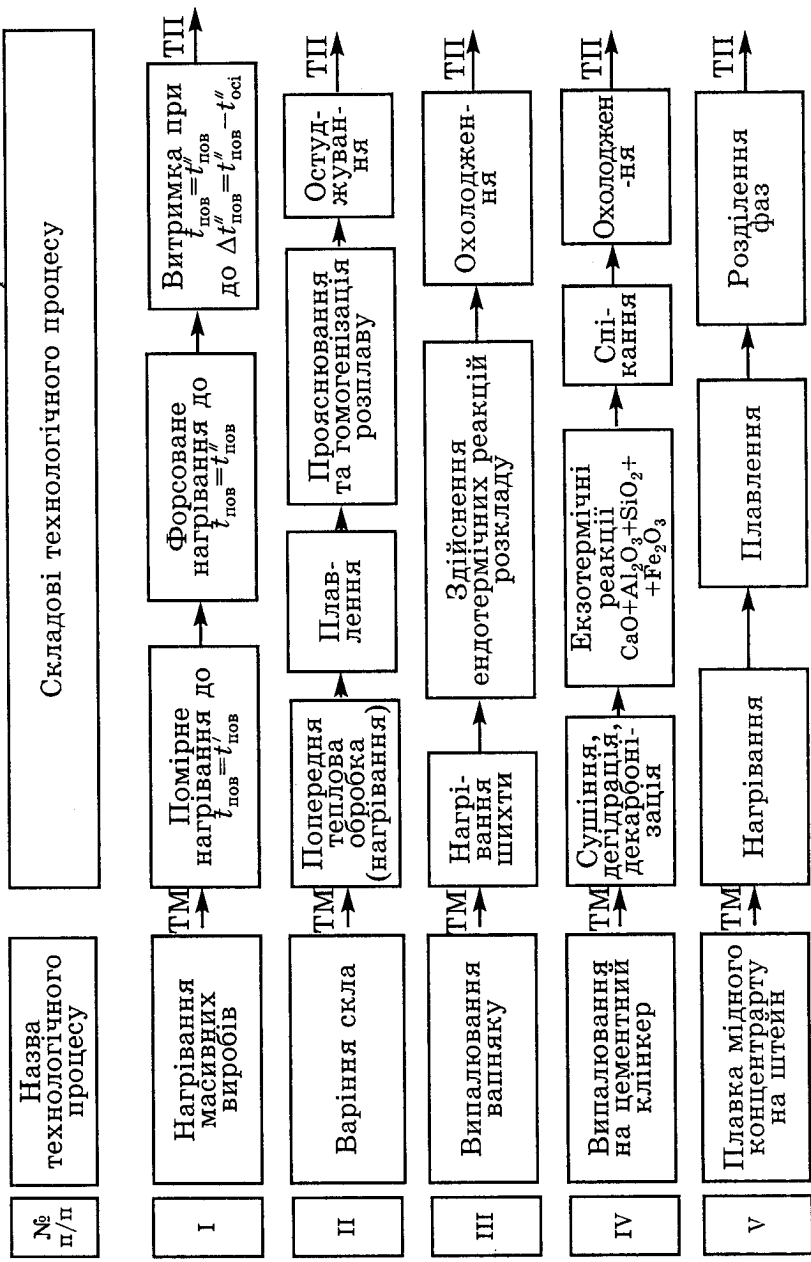


Рис.5.1. Приклади схем технологічних процесів, що реалізуються в промислових печах

Таблиця 5.1. Основні теплотехнічні принципи організації технологічних процесів

Теплотехнічні принципи оформлення технологічних процесів у паливних печах	Типи середньо- та високотемпературних промислових паливних печей, в яких реалізуються вказані теплотехнічні принципи
1. Принцип щільного фільтрувального шару	Печі з щільним шаром матеріалу, що продувається теплоносієм (шахтні печі)
2. Принцип киплячого шару	Печі з киплячим шаром матеріалу
3. Принцип завислого шару	Печі циклонного типу
4. Принцип пересипного шару	Печі з шаром матеріалу, що пересипається
5. Принцип укладених завантажень	Печі з укладеним об'ємним завантаженням виробів (тунельні та інші печі)
6. Принцип випромінювального факела	Полум'яні пічі
7. Принцип поверхневого випромінювання	Печі опосередкованого (непрямого) нагріву
8. Принцип зануреного факела	Печі із зануреним у розплав факелом
9. Принцип комбінований	Печі, в яких використовуються комбіновані теплотехнічні принципи

5.2. Робочий простір печей

Робочий простір, у межах якого здійснюються всі стадії технологічно необхідного теплового впливу на вихідні технологічні матеріали, дуже різноманітний. Робочі простори паливних печей можна класифікувати за їхніми найбільш загальними конструктивними особливостями (рис.5.2).

Печі з однокамерним робочим простором — це такі печі, в яких всі стадії технологічного процесу здійснюються в

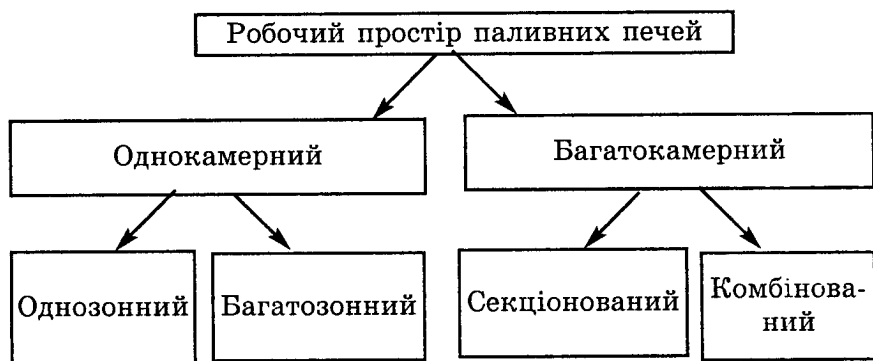


Рис. 5.2. Класифікація печей за конструктивним оформленням робочого простору

конструктивно єдиної камері. В свою чергу ці печі можуть бути однозонними (наприклад, мартенівські печі, нагрівальний колодязь, камерні нагрівальні печі) або багатозонними (наприклад, шахтні, оберткові печі, методичні нагрівальні печі). За низкою показників багатозонні печі більш досконалі, ніж однозонні.

Багатокамерний варіант робочого простору притаманний низці нових схем печей, що розробляються. Так, печі з багатокамерним секціонованим робочим простором характеризуються наявністю конструктивно однотипних камер (секцій), в яких здійснюються окремі стадії технологічного процесу із застосуванням однотипних теплотехнічних принципів (наприклад, печі з багатосхідчастим киплячим шаром). Принципові конструктивні схеми основних типів паливних печей подані далі (див. рис.5.5—5.22).

Печі з багатокамерним комбінованим робочим простором характеризуються наявністю окремих конструктивно різних камер, в яких здійснюються послідовні стадії технологічного процесу з використанням різних теплотехнічних принципів, а також, можливо, і різних джерел енергії (наприклад, нові плавильні печі).

У багатозонних та багатокамерних робочих просторах, в загальному випадку, можна виділити такі зони, або камери:

1) зони (камери) попередньої теплової обробки технологічних матеріалів — ЗПТО (КПТО);

2) зони (камери) основної теплової обробки технологічних матеріалів — ЗОТО (КОТО);

3) зони (камери) технологічної дообробки матеріалів — ЗТД (КТД);

4) зони (камери) технологічно регламентованого охолодження технологічного продукту — ЗТРО (КТРО).

5.3. Теплові та теплотехнічні схеми печей

Теплові схеми печей ілюструють систему джерел енергії, їх взаємозв'язок, розміщення, склад теплоносіїв та послідовність переміщення їх через технологічні зони та через інші тепловикористовуючі елементи печей. Найкоротше означення: *теплові схеми якісно характеризують загальну організацію використання теплоти та джерел енергії в паливних печах.*

Основною ознакою класифікації теплових схем є загальна направленість використання теплоти палива, що спалюється в даній печі, та особливість підключення до неї систем зовнішнього тепловикористання. Із цієї точки зору можна виділити три категорії печей :

1) печі без зовнішнього тепловикористання;

2) печі, обладнані установками або системами зовнішнього тепловикористання (печі з парогенераторами — утилізаторами, системами випарного охолодження тощо);

3) печі, суміжно пов'язані з іншими самостійними вогнетехнічними агрегатами та установками (з парогенераторами, печами тощо).

Теплотехнічними схемами печей називають теплові схеми печей, доповнені ілюстрацією використаних теплотехнічних принципів організації технологічних процесів, а також використання відходів теплоти робочого простору.

На рис.5.3 наведено схему технологічного процесу одностороннього нагрівання тонких заготовок та відповідні йому конструктивна, тепла та теплотехнічна схеми двозонної методичної печі для здійснення вказаного технологічного процесу. Із рис.5.3 чітко видно зв'язок та взаємодоповнення між вказаними схемами.

Приклади теплових схем наведено на рис.5.4.

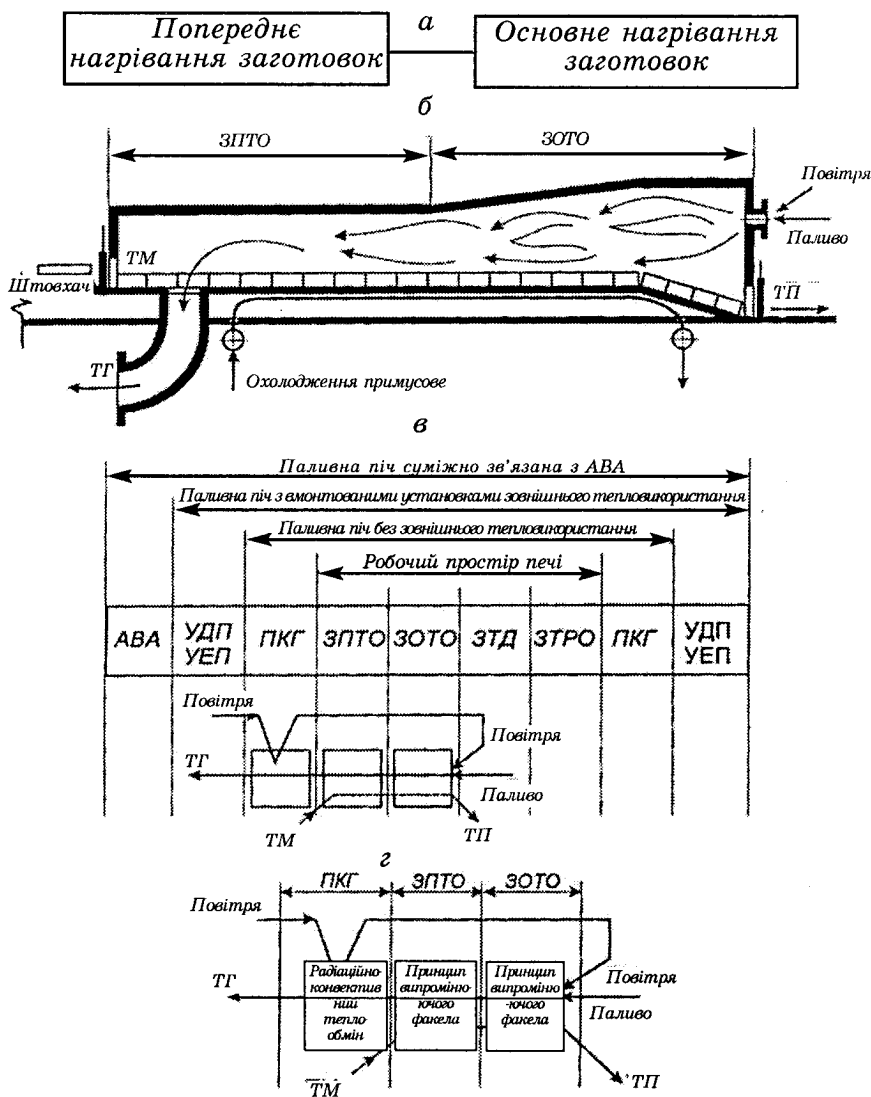


Рис. 5.3. Характеристика технологічної установки для нагрівання тонких заготовок у двозонній методичній печі: а—схема технологічного процесу нагрівання тонких заготовок; б— конструктивна схема печі; в— тепла схема печі; г—теплотехнічна схема печі

Примітка: УДП (УЕП) — установка додаткової (енергетичної) продукції; АВА— автономний вогнетехнічний агрегат; ПКГ - підігрівник компонентів горіння

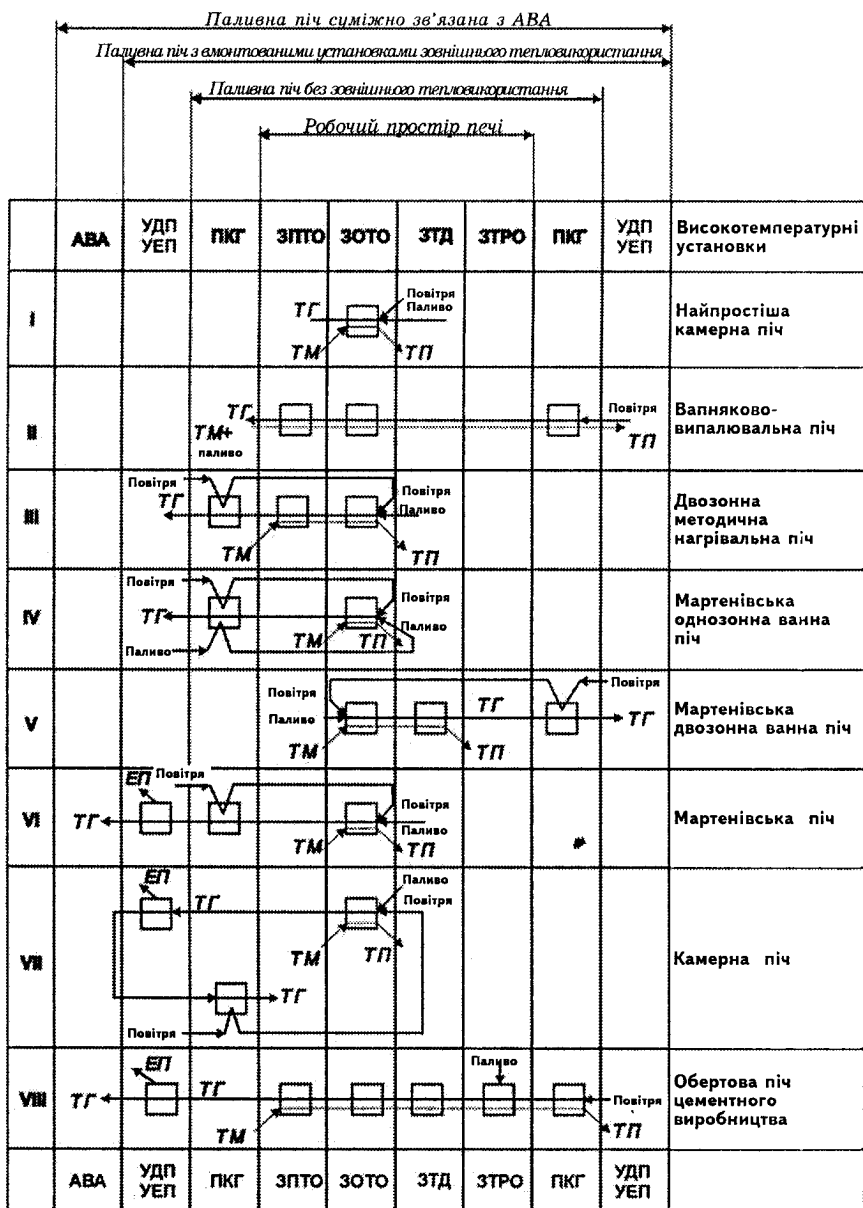


Рис. 5.4. Приклади теплових схем деяких високотемпературних установок

5.4. Класифікація високотемпературних установок

Найефективнішою та науково обґрунтованою є класифікація високотемпературних установок за ознакою тепло-технічних принципів, які використовуються для здійснення конкретних технологічних процесів, про що йшлося раніше.

На практиці і в технічній літературі більш ранніх видань існує класифікація за різними ознаками: призначенням, характером процесів, що здійснюються в них, видом палива, способом виділення теплоти, будовою робочого простору, способом обслуговування, способом використання теплоти відхідних газів тощо. Найбільш поширена класифікація високотемпературних установок за такими трьома основними ознаками.

1) За технологічним призначенням:

а) *плавильні печі* слугують для плавлення матеріалів (металів, мінералів, скла тощо). До них належать доменні та мартенівські печі, вагранки, печі для плавлення кольорових металів, склоплавильні та інші печі. Схематичні зображення печей показано на рис.5.15—5.19, а спрощені зображення конструкцій печей — у додатку (рис. Д 5.1—Д 5.7);

б) *нагрівальні печі*, які використовуються для нагрівання металу перед обробкою тиском, прокаткою, куванням, штамповкою (див.рис.5.5—5.13, та рис.Д 5.8—Д 5.13);

в) *термічні печі* для нагрівання матеріалів з метою їх термічної обробки — загартування, відпускання, відпалювання, нормалізації (див.рис.5.5—5.8. та рис. Д 5.11);

г) *випалювальні печі*, призначені для випалювання матеріалів. До них відносять печі для випалювання кераміки, вапна, цементного клінкеру, сірчаного колчедану тощо. Окремі конструкції таких печей показано на рис.5.20—5.22 та рис. Д 5.14—Д 5.16;

д) *сушилки* для видалення вологи з матеріалів чи для висушування пофарбованих виробів (див. рис. Д 5.10);

е) *печі для одержання з одного продукту іншого шляхом його перегонки*. До них належать печі нафтопереробних за-

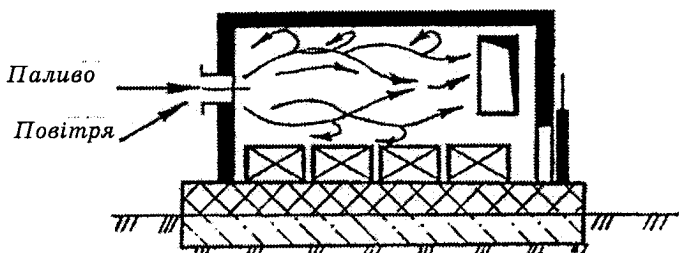


Рис. 5.5. Камерна піч

водів, печі для одержання штучного рідкого палива, коксові батареї для печей хімічної промисловості;

є) *печі хімічної промисловості* для нагрівання матеріалів з метою проведення хімічних процесів.

2) За джерелом теплової енергії:

а) *полум'яні печі*, в яких тепла енергія створюється за рахунок спалювання палива. Полум'яні печі, в свою чергу, діляться на печі, що працюють на твердому, рідкому та газоподібному паливі. Саме такі печі в основному і розглядатимемо;

б) *електричні печі*, в яких нагрівання здійснюється за рахунок електроенергії. За використанням електричної енергії розрізняють електричні печі опору, дугові, індукційні, контактні, електронні, інфрачервоного нагріву.

3) За конфігурацією робочого простору:

а) *камерні печі*, в яких матеріал у процесі нагрівання нерухомо лежить на подові. Температура робочого простору камерних печей у всіх точках простору майже однакова (рис.5.5—5.8 та рис Д 5.8);

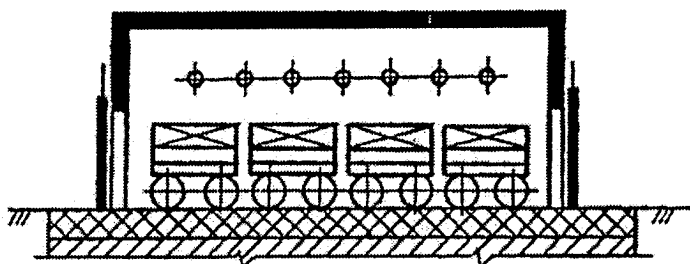


Рис. 5.6. Прохідна піч

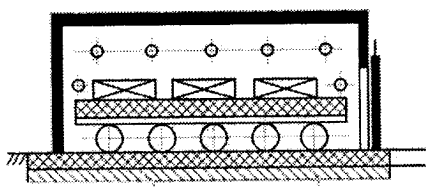


Рис. 5.7. Камерна піч з висувним подом

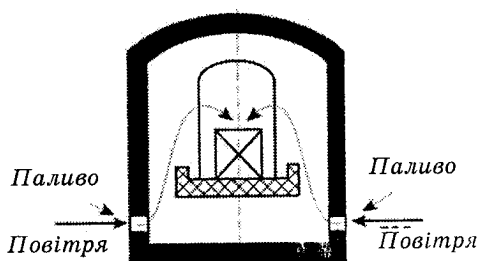


Рис. 5.8. Муфельна піч

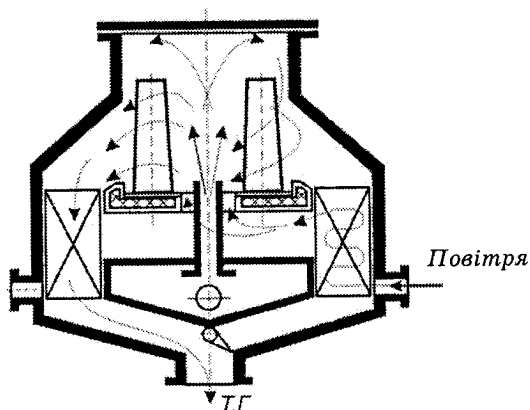


Рис. 5.9. Рекупративний нагрівальний колодязь

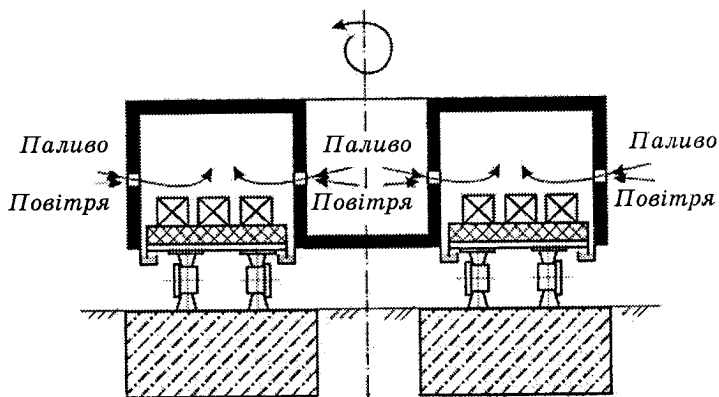


Рис. 5.10. Піч з обертвовим кільцевим подом

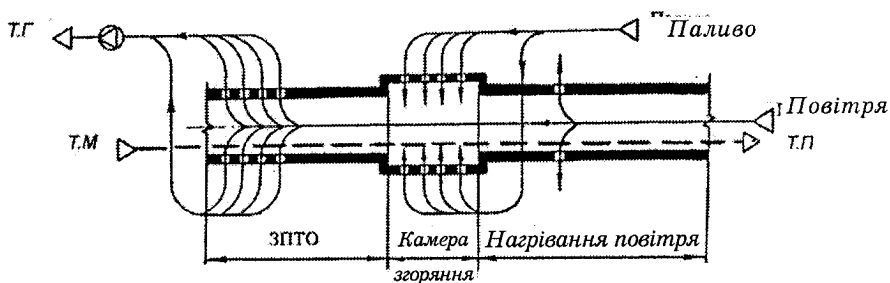


Рис. 5.11. Тунельна піч прямої дії

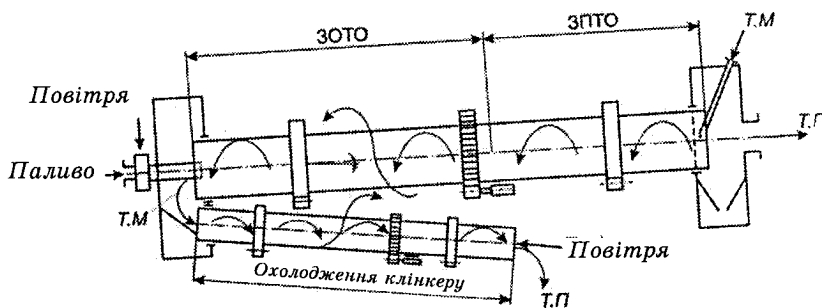


Рис. 5.12. Обертова барабанна піч для випалювання цементного клінкеру

б) *прохідні печі*, в котрих матеріал, поступово нагріваючись, переміщується від завантажувального кінця до вивантажувального. Температура теплоносія в певних точках робочого простору підтримується приблизно однаковою (рис. 5.6, рис. Д 5.12);

в) *методичні печі* мають робочий простір, витягнутий за

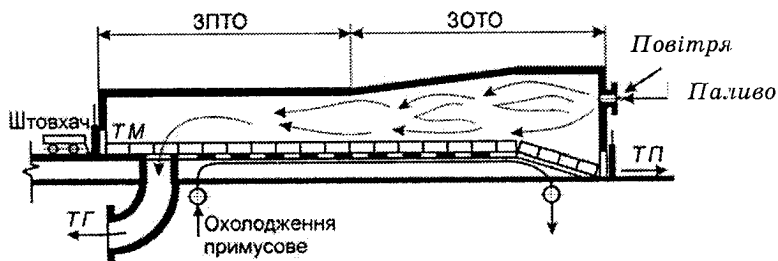


Рис. 5.13. Методична піч для одностороннього нагріву тонких заготовок

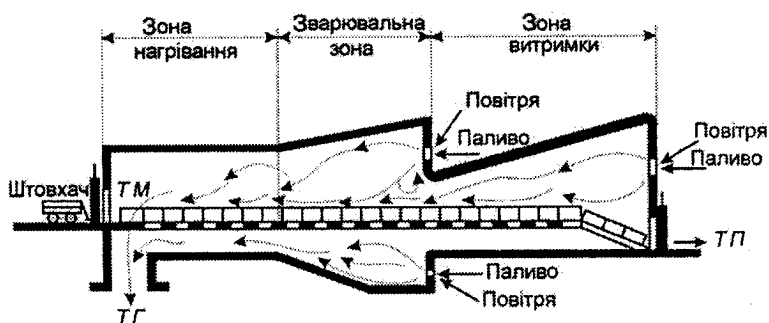


Рис.5.14. Методична піч для двобічного нагріву заготовок

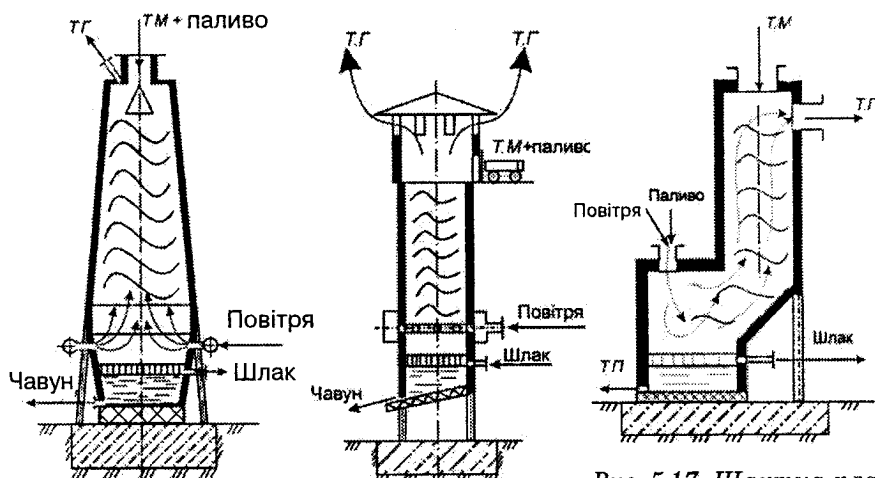


Рис. 5.15. Шахтна доменна піч

Рис. 5.16. Вагранка

Рис. 5.17. Шахтна плавильна піч, що використовується у кольоровій металургії

довжиною. Нагрівання матеріалів у них здійснюється за принципом протитечії (рис. 5.13, 5.14);

г) *печі із висувним подом* — це камерні печі, в яких для зручності завантаження та вивантаження матеріалів під печі висувається (рис. 5.7, рис. Д 5.9);

д) *печі з обертовим подом або карусельні* — кільцеві та тарілчасті, в яких матеріал, що нагрівається, лежить нерухомо на подові, а під, обертаючись, переміщує його в робочому просторі (рис. 5.10 та Д 5.13);

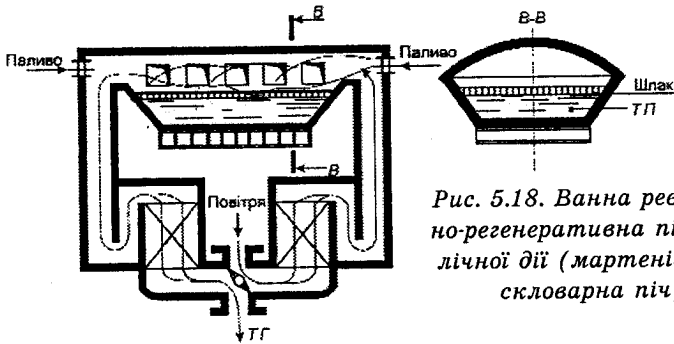


Рис. 5.18. Ванна реверсивно-регенеративна піч циклічної дії (мартенівська, скловарна піч)

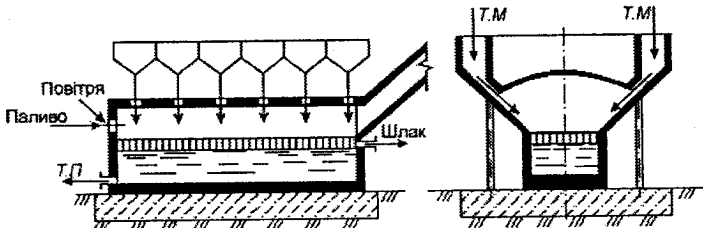


Рис. 5.19. Ванна піч з відбивним склепінням для плавлення на штейн концентратів мідної руди

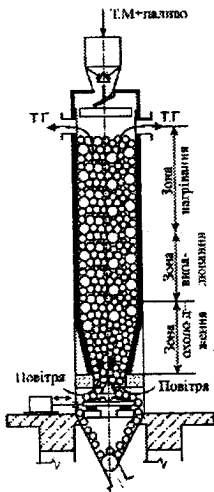


Рис. 5.20. Шахтна вапняково-випалювальна піч

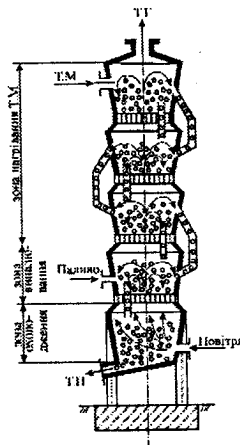


Рис. 5.21. Піч киплячого шару для випалювання вапняку

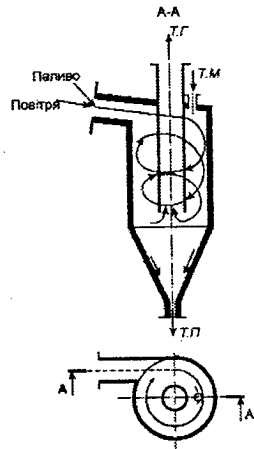


Рис. 5.22. Циклонна піч

е) *шахтні печі* мають вертикальне розташування робочого об'єму, заповненого кусковим матеріалом. Матеріал у них завантажуються зверху, а вивантажується знизу (рис. 5.15, рис. Д 5.1, Д 5.7, Д 5.14) ;

е) *печі киплячого шару* — в них частинки матеріалу чітко визначених розмірів піднімаються струменем теплоносія на певну висоту, після чого опускаються і процес повторюється. Тим чи іншим способом матеріал виводиться з печі (рис. Д5.15);

ж) *циклонні печі* — в них матеріал нагрівається в завислому стані. Теплообмін здійснюється дуже інтенсивно, але в реалізації процесу є свої проблеми, про що буде сказано пізніше (рис. 5.22);

з) *циліндричні обертові печі* являють собою обертовий циліндр (футерований всередині), розміщений під невеликим кутом. Матеріал поступово нагрівається, пересуваючись від верхнього завантажувального кінця до нижнього, де і вивантажується з печі (див. рис. Д5.16);

и) *тунельні печі* з робочим простором у вигляді довгого каналу. Матеріал переміщується в печі на вагонетках (див. рис. 5.11).

Враховуючи всі особливості конкретних високотемпературних процесів, установки для їх здійснення конструктивно дуже різноманітні. Зокрема слід зауважити, що навіть однотипні печі відрізняються між собою конструкціями каркасу, поду, завантажувальних та розвантажувальних пристроїв, конвеєрів, пальників, обладнання для подачі повітря та відсмоктування технологічних газів, гарнітури тощо. Ці подробиці з'ясовують при детальному ознайомленні з конкретною високотемпературною установкою, використовуючи спеціальну літературу чи технічну документацію.

Контрольні запитання

1. За якими ознаками класифікуються високотемпературні теплотехнологічні процеси?
2. Наведіть приклади схем технологічних процесів, які реалізуються в печах різних типів.

3. Наведіть класифікацію промислових печей за спільністю теплотехнічних методів (принципів) оформлення технологічних процесів, що відбуваються в них.
4. Наведіть класифікацію промислових печей за конструктивним оформленням їхнього робочого простору.
5. Дайте означення теплових та теплотехнічних схем печей. Для яких потреб вони використовуються?
6. Наведіть додаткову класифікацію високотемпературних установок за їхнім технологічним призначенням, за джерелом теплової енергії, що використовується в них, та за конфігурацією робочого простору.

КОНСТРУКЦІЙНІ ТА ТЕХНОЛОГІЧНІ МАТЕРІАЛИ ВИСОКО- ТЕМПЕРАТУРНИХ УСТАНОВОК

Якість, довговічність та економічність високотемпературних установок (ВУ) залежить від правильно підібраних матеріалів для окремих її частин: а) футеровки робочої камери, перевалів, димових труб; б) фундаментів; в) каркасів, кожухів, робочих вікон, льотків тощо.

6.1. Вплив стійкості конструкції на показники роботи ВУ

Під час спорудження ВУ використовуються різні конструкційні та будівельні матеріали: чорні метали та сплави, вогнетривкі та теплоізоляційні матеріали, бетони, залізобетони тощо.

Тривалість міжремонтного періоду установки визначається терміном служби найменш надійних її елементів, швидкість зносу яких зростає з інтенсифікацією технологічного процесу, що стримує можливість його форсування. Прискорений знос конструктивних частин ВУ збільшує простої та витрати на ремонт, зменшує річну продуктивність, а також всі техніко-економічні показники роботи ВУ.

Особливо швидко зношуються захисні огороження (кладка, футеровка) ВУ. Підвищення їх стійкості дає значний виробничий та економічний ефект.

З урахуванням конкретних умов роботи окремих елементів ВУ необхідно дібрати для них такі матеріали, які б давали змогу здійснювати високе форсування технологічно

го процесу в поєднанні з тривалим міжремонтним періодом.

Поступове зношування конструктивних елементів ВУ обумовлюється в першу чергу фізичною, хімічною та фізико-хімічною дією на них за високих температур технологічних матеріалів, які знаходяться в твердому, розплавленому або газоподібному станах. Інтенсивність та характер вказаного зносу визначаються властивостями взаємодіючих матеріалів, наприклад, газоподібні продукти згорання палива та металеві поверхні нагріву; розплавлений шлак та вогнетривки тощо. Тому доцільно розглядати властивості як конструктивних та будівельних матеріалів, що використовуються при спорудженні ВУ, так і тих технологічних матеріалів в різних фазових станах, які спричиняють зношування елементів ВУ.

6.2. Конструкційні металеві матеріали

Для спорудження ВУ широко використовуються чорні метали та сплави (чавуни, вуглецеві сталі та жаротривкі сплави). Той чи інший метал використовується залежно від типу конструкції та умов роботи — рівня температур, значення та характеру механічних навантажень, агресивності середовища тощо.

Для виготовлення таких конструктивних елементів ВУ, як каркас, майданчики обслуговування, обшивка обмуровки та інших використовують вуглецеві сталі рядових марок звичайної якості у вигляді листів, сортового прокату — швелерів, двотаврів, кутиків тощо. Більш відповідальні конструкції, які мають витримувати великі механічні навантаження, потребують використання якісної конструкційної сталі.

У ВУ є металеві деталі та елементи, які працюють в умовах підвищених температур та механічних навантажень: деталі робочих вікон та гарнітури, підвіски футеровок, гарячі трубопроводи під тиском, транспортні засоби всередині робочих камер, муфелі тощо. Для їх виготовлення застосовують жаростійкі та жароміцні сплави — чавуни та сталі.

До жаростійких (окалиностійких) сплавів відносять

сплави, стійкі проти окиснення в газових середовищах за температур вище як 550°C , коли механічне навантаження або слабке, або зовсім відсутнє. Жароміцні сплави працюють у навантаженому стані за високих температур протягом певного часу і достатньо окалиностійкі.

Максимальна робоча температура обмежується для вуглецевих сталей значенням 400°C , а для сірого чавуну 500°C , щоб не допустити окалиноутворення та втрати механічної міцності.

Окалиностійкість сплаву надають легувальні домішки, які окиснюються легше за залізо і створюють на поверхні міцну тонку захисну плівку оксиду (Cr, Al, Si, Mn, Ti, V, Mg, Nb, Zr, Cu).

Однчасне використання кількох легувальних елементів дає змогу значно підвищити жаростійкість. Домішки Si та Al в сталі обмежують, через те що вони спричиняють крихкість сплаву. На окалиностійкість в основному впливає домішка хрому (рис. 6.1).

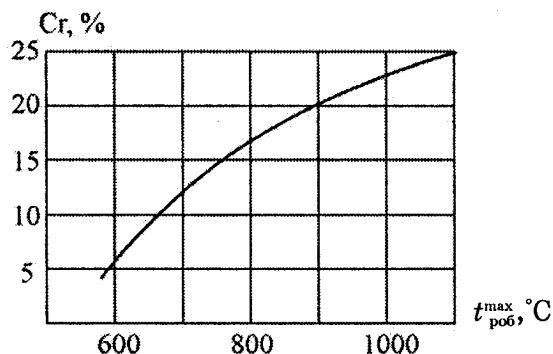


Рис. 6.1. Залежність окалиностійкості сплаву ($t_{роб}^{max}$) від вмісту в ньому хрому

Жароміцність сталі забезпечується у разі великого вмісту в ній Cr та Ni з домішкою W, Co, Nb, V та інших тугоплавких легувальних елементів. Жароміцні сплави мають підвищену крипостійкість, тобто обмежену повзучість за високих температур. В особливо

відповідальних випадках (затискувачі для глісажних труб методичних печей, електричні нагрівальні елементи) використовуються сплави не на основі Fe, а на основі Co, Ni, Mo та Cr.

Під час роботи під тиском та за підвищеної температури

метал підлягає регламентації за правилами Держгіртехнагляду, а відповідні ВУ — контролю Котлонагляду.

Чавун порівняно з вуглецевою сталлю більш окалиностійкий (до 500—550°C), добре леться, міцний та корозійностійкий, дешевший від сталі, але крихкий, менш пластичний і погано зварюється. Жаростійкі чавуни ЖЧХ та ЖЧС з різним вмістом Cr та Si надійно працюють при температурах до 600...1000°C. Тому в конструктивних елементах ВУ широко застосовується чавунне литво для плит, вузлів кріплення, облицювання, арматури, гарнітури.

У результаті корозії метал перетворюється на оксиди, сульфати або інші крихкі неміцні сполуки.

Електрохімічна корозія здійснюється за умов контакту металу з вологою (електролітом), що має місце під час конденсації водяної пари з пічних газів на поверхні нагріву, та контакту фундаментів з ґрунтовими водами.

Хімічна чи газова корозія відбувається без електролітів за підвищених температур. За наявності в газовому середовищі агресивних окиснювальних сполук, наприклад SO₂, CO₂, H₂O, HF, газова корозія суттєво прискорюється з підвищенням температури.

Леговані сталі мають підвищену корозійну стійкість, тому що на їх поверхні утворюються тонкі щільні плівки оксидів Cr, Ni, Al, Cu, які добре сполучаються з металом і утруднюють дифузю окисників.

Захист металів від атмосферної корозії здійснюється такими засобами:

а) покриття тонким шаром корозійностійкого металу (Sn, Ni, Cr, Cu, Zn, Al), який наноситься електролізом чи зануренням у розплав;

б) неметалеві покриття лаками, фарбами або емалями;

в) оксидування або фосфатування, для чого метал обробляють у сильних окисниках для утворення тонкої міцної захисної плівки оксидів чи фосфатів заліза.

Кольорові метали та їхні сплави порівняно з чорними використовуються в значно менших об'ємах. Однак останнім часом поширюється використання алюмінієвих сплавів у будівельних конструкціях, а також для обшивок, обмуро-

вок, теплових трас тощо. Незважаючи на підвищену вартість, застосування алюмінієвих сплавів виправдане, оскільки вони корозійно стійкі, міцні, легкі, коефіцієнт теплового випромінювання, малий, а значить знижуються теплові витрати в навколишнє середовище.

6.3. Загальні властивості та особливості мінеральних матеріалів

Мінеральні технологічні та конструкційні матеріали (шихти, руди та концентрати, скломаса, шлаки паливні та технологічні, цементний клінкер тощо) складаються в основному з оксидних сполук, які поділяються на:

кислотні (загальна структурна формула RO_2, R_2O_5), наприклад, $SiO_2, TiO_2, P_2O_5, V_2O_5$;

основні (R_2O, RO), наприклад, $Na_2O, K_2O, CaO, FeO, MnO$;

амфотерні (R_2O_3), наприклад, $Al_2O_3, Fe_2O_3, Cr_2O_3$.

Примітка. Амфотерність — це здатність сполук проявляти як кислотні, так і основні властивості.

Технологічні матеріали складаються із суміші різних сполук і класифікуються за співвідношенням кислотних та основних сполук. Історично склалась класифікація шлаків чорної металургії за основністю, що являє собою відношення суми основних оксидів до суми кислотних (у молях, іноді в масових процентах):

$$O = \frac{\sum_i (R_2O + RO)_i}{\sum_i (RO_2 + R_2O_5)_i} \quad (6.1)$$

У кольоровій металургії та петрургії (виробництво кам'яного литва) прийнята класифікація за кислотністю:

$$K = \frac{\sum_i (RO_2 + R_2O_5)_i}{\sum_i (R_2O + RO)_i} \quad (6.2)$$

Мінеральні розплави за внутрішньою будовою посідають

проміжне місце між кристалами з високим ступенем упорядкованості структури і газами з хаотичним розміщенням частинок у просторі.

Мінеральні розплави нарівні з елементарними іонами, що рухаються хаотично (Si^4 , Ca^{++} , O^{--}), включають у свій склад упорядковані структурні групи — комплексні іони, які бувають двох видів: із різнорідних катіонів виду $\text{R}_1\text{—O—R}_2$ та із створених полімеризацією кислотних комплексотворювальних катіонів R_xO_y^z . Останні утворюють ланцюжки і мають порівняно малу рухливість. Із ростом температури комплексні іони подрібнюються і ступінь упорядкованості структури розплаву знижується.

На швидкість зношування вогнетривів за високих температур суттєво впливають в'язкість та поверхневий натяг мінеральних розплавів, змочуваність ними поверхні вогнетривів.

В'язкість мінерального розплаву обумовлена силами зв'язку між іонами, котрі значно більші всередині комплексного іона порівняно з його зовнішніми взаємодіями і малі між елементарними іонами. Тому основні розплави мають малу в'язкість, а кислотні — значно вищу (рис. 6.2).

З підвищенням температури в'язкість основних розплавів знижується значно повільніше, ніж кислотних внаслідок подрібнення великих комплексних іонів і підвищення концентрації дрібних, більш рухливих частинок.

Руйнування вогнетривів відбувається лише під час змочування його мінеральним розплавом і посилюється під час зменшення значень коефіцієнта поверхневого натягу (σ_p , Н/м) та кута змочування (θ) розплаву, тому що розплав глибше проникає в пори вогнетрива.

Внаслідок зниження температури мінеральний розплав кристалізується, або перетворюється на скло (за швидкого охолодження).

Порівняно з кристалом того самого складу скло розм'якчується та деформується за значно нижчої температури і має більші питомі теплоємність та об'єм. Наприклад, кварцове скло, що складається з SiO_2 , розм'якшується при 1100°C , а кристали SiO_2 плавляться при 1700°C . Тому у во-

Па · с

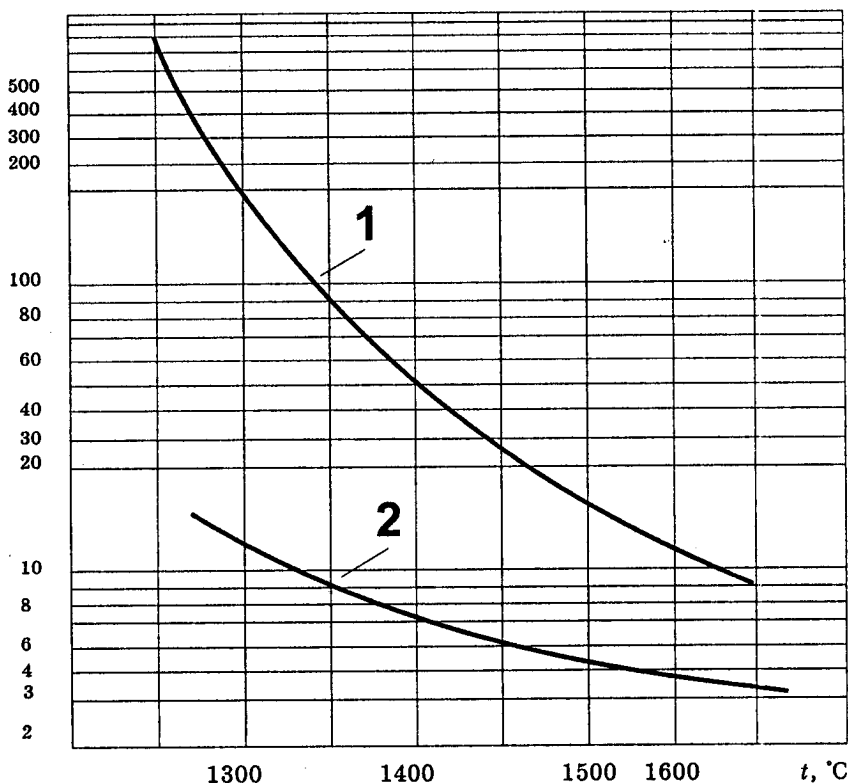


Рис. 6.2. Залежність в'язкості кислотного (1) та основного (2) мінерального розплаву від температури

гнетривах намагаються мати мінімальну кількість скла і максимум сполук у стійкому за високих температур кристалічному стані.

За високих температур ($T > 1300$ К), характерних для робочих камер багатьох ВУ, стає помітним перехід мінеральних матеріалів у пароподібний стан.

Мінеральні матеріали в пароподібному стані мають високу хімічну активність і, дифундуючи в пори вогнетривів, спричиняють їх прискорений знос порівняно із зносом при дії розплаву.

6.4. Вогнетривкі матеріали та вироби

6.4.1. Загальні характеристики вогнетривів. Вогнетривами називають неметалеві матеріали та вироби, здатні тривалий час протистояти різним механічним та фізико-хімічним руйнівальним діям на них за високих температур (не нижче як 1580°C). Із вогнетривких матеріалів вимуровують топки та робочі камери ВУ або футерують ними стінки тепловикористовуючого устаткування та димоходів.

Із всіх матеріалів, що використовуються під час спорудження ВУ, вогнетриви є найбільш специфічними. Вони значно впливають на стійкість ВУ та їхню продуктивність, а значить і на техніко-економічні показники їх роботи.

Залежно від температури плавлення вогнетривкі матеріали поділяють на три групи:

матеріали середньої вогнетривкості, для яких $t_{\text{пл}}=t_{\text{вогн}} = 1580 \dots 1770^\circ\text{C}$;

матеріали високої вогнетривкості, для яких $t_{\text{пл}}=t_{\text{вогн}} = 1770 \dots 2000^\circ\text{C}$;

матеріали найвищої вогнетривкості, для яких $t_{\text{пл}}=t_{\text{вогн}} > 2000^\circ\text{C}$.

Якість вогнетривів характеризується вогнетривкістю, температурою початку деформації під навантаженням, зміною об'єму при нагріванні, термічною стійкістю, механічною міцністю, стійкістю проти дії шлаків та оксидів, правильністю заданої геометричної форми та точністю розмірів.

У вогнетривах переважають тугоплавкі оксидні та інші сполуки в кристалічному стані. Вогнетривкою основою є прості оксиди (SiO_2 , Al_2O_3 , MnO , Cr_2O_3 та ін.), карбіди (SiC), нітриди, бориди або вогнетривкі сполуки ($2\text{MgO} \cdot \text{SiO}_2$ — форстерит; $3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$ — муліт та ін.), а також різні домішки та зв'язки (в'язі).

За хімічними властивостями вогнетривкої основи виділяють *кислі вогнетриви*, в яких переважає кислотний оксид SiO_2 ; *нейтральні*, коли кислотний оксид нейтралізується основним (наприклад, шамот, який складається з SiO_2 та Al_2O_3); *основні*, в яких переважає основний оксид (MnO , Al_2O_3 та ін.) та *індиферентні* або *амфотерні*, що не мають

ні кислотних, ні основних властивостей (наприклад, вуглецеві, хромисті Cr_2O_3); цирконієві ZrO_2 та ін.).

Вогнетриви застосовують у вигляді цегли різних розмірів (стандартних), фасонних виробів та виробів спеціального призначення.

За способом виготовлення вогнетриви поділяють на: 1) пиляні з природних гірських порід, 2) формовані з пластичних мас, 3) півсухого та сухого пресування, одержані з сухих чи зволжених порошоків, 4) трамбовані, 5) литі, 6) вироби, виготовлені особливими способами.

За способом термічної обробки виділяють вогнетриви необпалені, обпалені, плавлені.

Для правильної оцінки та вибору вогнетривких виробів треба мати чітке уявлення про зміст основних характеристик, які наводяться в довідниках.

6.4.2. Властивості вогнетривів. Вогнетривкість характеризує граничну температуру служби вогнетрива в ідеальних умовах, тобто за відсутності механічного навантаження та фізико-хімічної дії середовища. Вогнетривкість є технічною характеристикою матеріалу і визначається як температура ($t_{\text{вогн}}$), за якої відбувається певна пластична деформація стандартного зразка, що нагрівається в регламентованих умовах.

У вогнетривів як суміші хімічних сполук немає певної температури плавлення $t_{\text{пл}}$, а існує температурний інтервал плавлення, всередині якого і лежить $t_{\text{вогн}}$. Звичайно $t_{\text{вогн}}$ суттєво перевищує граничну робочу температуру служби вогнетриву $t_{\text{роб}}^{\text{макс}}$, яка також є не фізичним, а технічним поняттям. Під $t_{\text{роб}}^{\text{макс}}$ вважають таку температуру, вище від якої в найбільш поширених умовах експлуатації (механічні, фізико-хімічні руйнівальні дії) даний вогнетрив недопустимо швидко зношується.

Деформація під навантаженням за високої температури враховує дію на вогнетрив механічного навантаження і є дуже важливою його піропластичною характеристикою. Напруга стиснення у футеровці ВУ знаходиться в межах 10...150 і не перевищує 200 кПа.

Для визначення деформації під навантаженням стандартні зразки ($d = 36$ мм; $h = 50$ мм) випробовують на стиснення під навантаженням ~ 200 кПа за безперервного підвищення температури. Температура початку розм'ягчення ($t_{п.р.}$) відповідає стисненню зразка на 0,3 мм.

Можливість застосування вогнетривів за високих температур визначається саме температурою $t_{п.р.}$. Тому шамотні вироби, для яких $t_{вогн}=1770^{\circ}\text{C}$ і $t_{п.р.}=1400^{\circ}\text{C}$, використовують у ВУ, де максимальна температура не перевищує 1350...1400 $^{\circ}\text{C}$. Динасові вироби, що мають вогнетривкість $t_{вогн}=1760^{\circ}\text{C}$, але $t_{п.р.}=1630\text{...}1690^{\circ}\text{C}$, застосовують у камерах з робочою температурою 1600...1650 $^{\circ}\text{C}$.

Механічна міцність вогнетривких виробів визначається їхньою структурою і характеризується границею міцності в мегапаскалях, яку витримує зразок при стисканні за звичайних температурних. Чим щільніша, дрібнозернистіша та однорідніша структура вогнетривких виробів, тим менше в них тріщин і тим вища їхня механічна міцність.

У зв'язку з тим, що механічна міцність вогнетривів пов'язана з їхньою структурою, яка обумовлює пористість, шлакостійкість, термічну стійкість та інші властивості, границя міцності на стиснення за нормальних умов є важливим показником і знаходиться в межах $\sigma_{ст} = 8\text{...}100$ МПа.

Сталість об'єму характеризується зміною розмірів вогнетриву під час нагрівання. Вона суттєво впливає на тривалість служби футеровки і є результатом теплового розширення (оборотна деформація) та спікання чи поліморфних перетворень (необоротна деформація — зростання чи усадка). Значна зміна розмірів вогнетривів при нагріванні може призвести до розкривання швів, розтріскування, випучування футеровки та її руйнування. Тому бажано використовувати вогнетриви з мінімальною зміною розмірів у процесі служби. Необоротна деформація зменшується за тривалого випалювання вогнетривів при температурі, вищій від робочої.

Збільшення об'єму вогнетривких виробів (термічне

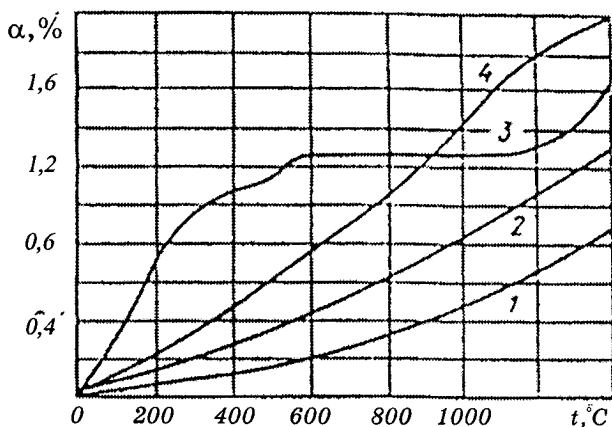


Рис. 6.3. Відносне подовження вогнетривів при нагріванні:
 1—шамотного; 2 — корундового; 3 — динасового; 4 — периклазового

розширення) внаслідок нагрівання прийнято виражати коефіцієнтом лінійного температурного розширення, тобто приростом Δl їхніх лінійних розмірів відносно початкових розмірів при нагріванні на 1°C ($\alpha_t, ^\circ\text{C}^{-1}$).

Відносне подовження вогнетривів $\alpha_t = \Delta l / l_0 = f(t)$ представлено на рис.6.3. Для більшості вогнетривів у межах температур до 1000°C значення α не перевищує десятої частки відсотка. Найбільший коефіцієнт лінійного температурного розширення мають магнетитові вироби: $\alpha_t = (13...14) \cdot 10^6, ^\circ\text{C}^{-1}$, а найменший — карборундові $\alpha_t = (4,7 \cdot 10^6), ^\circ\text{C}^{-1}$; для шамотних виробів: $\alpha_t = (5,2...5,8) \cdot 10^6, ^\circ\text{C}^{-1}$.

Додаткове зростання об'єму при нагріванні, крім термічного розширення, найбільше проявляється у динасових вогнетривів, у яких воно відбувається в період переродження кварцу з однієї кристалічної форми в іншу. Додаткова усадка шамотних напівкислих, доломітових та магнетитових виробів пояснюється зміною структури цих виробів при нагріванні у ВУ до температури, вищої за температуру їх початкового випалювання. Тому, щоб уникнути додаткової усадки, вогнетривкі вироби рекомендується випалювати до максимальної робочої температури ВУ, для кладки якої вони призначені.

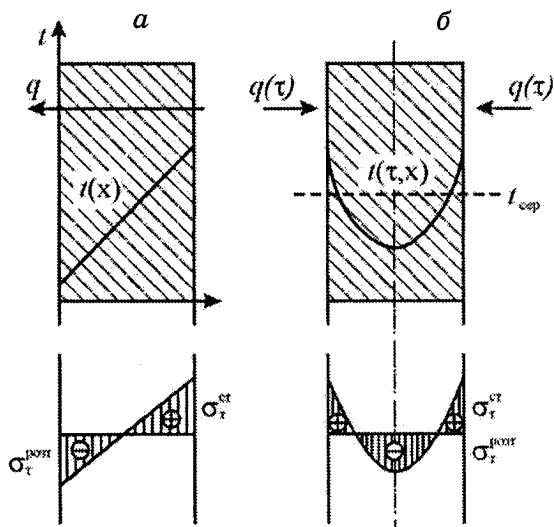


Рис. 6.4. Приклади виникнення термічних напруг у вогнетривкій конструкції: а — при стаціонарному тепловому режимі стінки; б — при двобічному нагріванні (нестационарний режим)

Під впливом термічного розширення при нагріванні, тобто збільшенні об'єму, зовнішні шари вогнетривких виробів розширюються значно більше, ніж менш нагріті внутрішні шари. При цьому в певних шарах вогнетривких виробів з'являються сколюючі напруги. Якщо їх значення переважають сили зчеплення частинок між собою, то у таких виробках з'являються тріщини та відколи. Аналогічні процеси виникають і під час охолодження вогнетривів.

Термостійкість характеризується числом тепломінів (нагрів і охолодження) до втрати від сколювання 20% початкової маси зразка.

Розтріскування та сколювання вогнетрива відбувається за рахунок поступового накопичення залишкових деформацій та мікротріщин при тепломінах, хоча в кожному циклі температурні напруги можуть не перевищувати допустимих.

На термостійкість впливають механічні та теплофізичні

Термостійкість — це здатність вогнетривів не руйнуватися від дії термічних напруг. Термічні напруги σ_{τ} у вогнетривкій конструкції виникають як за наявності градієнта температур (одностороннє охолодження стінки, нестационарні умови теплової роботи (рис.6.4)), так і в результаті структурної неоднорідності вогнетривів — природної, чи набутої у процесі служби.

властивості вогнетривких виробів: міцність, модулі пружності та зсуву, тепло- та температуропровідність, коефіцієнт лінійного розширення; макроструктура вогнетриву — пористість, ступінь структурної неоднорідності, розмір кристалічних зерен; характер та властивості зв'язків; зовнішні умови експлуатації — температура та швидкість її зміни в часі; форма та розмір вогнетривких виробів.

Підвищену термостійкість мають вогнетривкі вироби невеликих розмірів, простої форми, з однорідною крупнокристалічною макроструктурою на кристалічній зв'язці (мінімум склоподібної фази) з оптимальною пористістю 10...18% (пори відіграють роль внутрішніх температурних швів, але знижують міцність виробів), з невеликим коефіцієнтом термічного розширення.

Шлакостійкість характеризує здатність вогнетриву протистояти фізико-хімічній та механічній руйнівній дії мінерального розплаву за високих температур.

Взаємодія вогнетриву з мінеральним розплавом являє собою складний фізико-хімічний процес, що є результатом сумісних процесів корозії та ерозії. Процес корозії або розчинення вогнетриву в нерухомому розплаві лімітується молекулярною дифузією.

На швидкість розчинення вогнетриву найсильніше впливає температура. З підвищенням температури знижується в'язкість розплаву і він глибше проникає в пори вогнетриву, збільшуючи поверхню взаємодії, зростає концентрація насичення вогнетривом мінерального розплаву, в результаті подрібнення комплексних іонів зменшується радіус іонів, тоншає дифузійний межовий шар. В області максимальних робочих температур підвищення температури на 30...80°C прискорює зношування вогнетривів у 2...10 разів.

Велике значення має макроструктура вогнетривів. Із збільшенням пористості (особливо з'єднаних між собою пор), збільшується поверхня взаємодії і швидкість зношування вогнетриву. Глибина проникнення розплаву обумовлена радіусом пор у вогнетриві, коефіцієнтом поверхневого натягу, змочуваністю вогнетриву розплавом.

Хімічно-мінеральний склад вогнетриву та мінерального розплаву відіграє значну роль у процесі зношування вогнетриву. Якщо хімічні склади вогнетриву та розплаву близькі між собою, то концентрація насичення вогнетривом мінерального розплаву невелика і процес розчинення швидко уповільнюється. Велика відмінність за складом сприяє активній взаємодії і прискорює зношування вогнетриву розплавом. Звідси формулюється грубе правило вибору вогнетривів: для кислих розплавів слід використовувати кислі вогнетриви, для основних розплавів — основні вогнетриви.

Процес ерозії, що перебігає під час руху розплаву відносно поверхні вогнетриву, значно прискорює його зношування. Це обумовлюється відривом слабо зчеплених частинок з поверхні вогнетриву і оголенням свіжих шарів, притоком до поверхні взаємодії свіжого розплаву, заміною молекулярної дифузії конвективною, яка інтенсивніша приблизно на два порядки.

Для підвищення стійкості футеровок в агресивних середовищах за високих температур намагаються використовувати вогнетриви з чистих хімічних сполук із високою щільністю та міцністю, мінімальною кількістю домішок та склоподібною фазою, з низькою пористістю.

6.4.3. Фізичні властивості вогнетривів. Пористість. Під пористістю розуміють відношення об'єму пор до всього об'єму вогнетривкового виробу. У вогнетривів розрізняють уявну (позірну) пористість та істинну. Під уявною пористістю розуміють відношення об'єму пор, що сполучаються між собою та із зовнішньою атмосферою, до загального об'єму виробу. Істинна пористість — це відношення сумарного об'єму всіх відкритих та закритих пор до загального об'єму вогнетриву. Пористість виражається в процентах. Чим вища пористість вогнетривів, тим, як правило, менша їх шлакостійкість. Чим більше відкритих і крупних пор у вогнетривких виробках, тим більша їх газопроникність, яка здебільшого суттєво впливає на тривалість її експлуатації в теплових агрегатах. Так, проникнення оксиду вуглецю в товщу цегли і відкладання в її порах са-

Таблиця 6.1. Класифікація вогнетривів за пористістю, %

Вогнетриви	Пористість	
	уявна (позірна)	істинна
Щільні: особливо щільні,	<3	—
високощільні,	3 — 10	—
підвищеної щільності,	10 — 16	—
ущільнені,	16 — 20	—
середньощільні,	20 — 30	—
низькощільні.	>30	<45
Теплоізоляційні: високопористі,	—	45 — 75
ультрапористі	—	>75

жистого вуглецю призводить до передчасного руйнування футеровок шахт доменних печей. Пористість вогнетривких виробів залежить головним чином від складу початкової сировини, технології формування сирцю та температури випалювання вогнетривів.

Залежно від пористості вогнетриви діляться на щільні та теплоізоляційні (табл. 6.1).

Щільність, тобто маса одиниці об'єму матеріалу виробу без пор, та *об'ємна маса*, тобто маса одиниці об'єму, є одними з найважливіших якісних характеристик вогнетривких виробів.

Газопроникність — це здатність вогнетривів пропускати газ. Її вимірюють кількістю газу в літрах, що проходить через досліджуваний зразок площею 1 м² при товщині зразка 1 м та різниці тисків приблизно 0,1 МН/м². Газопроникність залежить від природи вогнетривкого матеріалу, його обробки, від температури та тиску газу. З підвищенням температури газопроникність у всіх вогнетривів знижується, через те що теплові розширення сприяють ущільненню матеріалу, а легкоплавкі домішки іноді частково закупають його пори.

Газопроникність залежить безпосередньо від відкритої наскрізної пористості.

Теплопровідність. Вогнетривкі матеріали є поганими провідниками теплоти (за винятком карборунду та графіту). З підвищенням температури теплопровідність

більшості вогнетривів зростає; лише теплопровідність магнетиту та корунду знижується.

Теплоємність. Середня теплоємність вогнетривів збільшується з підвищенням температури. Для динасу, шамоту, магнезії та інших вогнетривів вона змінюється мало і може бути прийнята: $c'_{\text{вогн}} \approx 0,838$ кДж/(кг·К) при $t = 100^\circ\text{C}$ та $c''_{\text{вогн}} = 1,130$ кДж/(кг·К) при $t = 1000^\circ\text{C}$. Для вуглецевих вогнетривів теплоємність дещо вища: $c'_{\text{вогн}} = 1,256$ та $c''_{\text{вогн}} = 1,517$ кДж/(кг·К) відповідно.

За формою та розмірами виділяють вироби нормальних розмірів прямі (наприклад, $230 \times 114 \times 65$ мм) та клинові (наприклад, $230 \times 114 \times 65 \times 45$ мм); фасонні прості, складні та особливо складні; блочні масою від 40 до 1000 кг.

Допустимі відхилення лінійних розмірів становлять $\pm 2 \dots 4$ мм для звичайних та на 2% для крупних виробів.

Кривизна поверхні у звичайних вогнетривких виробів допускається в межах від 1,5 до 3,0 мм, а у крупних виробів — не більше 1%. Чим менша кривизна вогнетривких виробів, тим менша товщина швів вогнетривкої кладки, що є найбільш слабким місцем проти дії шлаків, розплавів та агресивних газів.

6.4.4. Короткі дані про технології виробництва та застосування вогнетривів. Найбільш представницькою є класифікація вогнетривів за хіміко-мінеральним складом, згідно з якою вони діляться на 15 типів та більш як 40 груп. Основні властивості вогнетривів, які широко використовуються під час спорудження ВУ, представлені в додатку 9.

Динасовими називають вогнетривкі вироби з вмістом кремнезему SiO_2 не менш як 94,5%, які виготовляються випалюванням сирцю, сформованого з розмелених кварцитів на вапняній чи інших зв'язках.

Динасові вогнетриви є ультракислими і стійкими проти кислих розплавів. Внаслідок поліморфних перетворень у динасі (під час випалювання виробів вони не завершуються) термостійкість його до 600°C незначна, а з підвищенням температури зростає. Динас має каркасну структуру, відносно легкий, має високу $t_{\text{п.р}}$, у широкому діапазоні температур ($600 \dots 1100^\circ\text{C}$) не змінює розмірів (див.

рис. 6.3). Тому він є кращим вогнетривом для розпирних склепінь, дає змогу перекривати великі прогони — до 10...11 м.

Напівкислі, шамотні, мулітові, мулітокорундові вогнетриви належать до типу алюмосилікатних. Деякі їх загальні властивості досить близькі між собою. Алюмосилікатні вогнетриви виготовляють на основі вогнетривкої глини Al_2O_3 з різними добавками: в напівкислих — піску (SiO_2), в шамотних — обпаленої в грудки і розмеленої в порошок вогнетривкої глини (шамоту), в мулітових та мулітокорундових — глинозему, основою якого є Al_2O_3 .

Із збільшенням вмісту Al_2O_3 якість алюмосилікатних виробів від напівкислих до муліто-корундових зростає: підвищується вогнетривкість (від 1580 до 1850°C), температура початку розм'ягшення (деформації) під навантаженням $t_{п.р}$ (від 1300 до 1650°C), міцність $\sigma_{доп}^{ст}$ (від 12...25 до 60...300 МПа), а також термостійкість та шлакостійкість. Одночасно зростають щільність (від 1900 до 2600 кг/м³) та вартість вогнетривів, ускладнюється технологія їх виробництва. Алюмосилікатні вогнетриви стійкі проти середніх та кислих розплавів, але нестійкі проти основних. Застосовуються вони найширше в різних галузях промисловості — в чорній та кольоровій металургії, енергетиці, промисловості будівельних матеріалів тощо.

Периклазові (магнезитові) вогнетриви виготовляють з дефіцитного природного магнезиту $MgCO_3$, мають високу вогнетривкість, але помірну та низьку термостійкість через значну кількість у вогнетриві склоподібної зв'язки. Ці вогнетриви стійкі проти основних і нестійкі проти кислих та середніх розплавів; широко застосовуються для кладки відповідальних елементів робочого простору, металургійних печей.

У нагрівальних печах периклазові вогнетриви можна застосовувати в зонах високих температур та для футеровки подів.

Доломітові вогнетриви виготовляють з менш дефіцитної та дорогої сировини ($nMgCO_3 \cdot CaCO_3$), ніж магнезит, але властивості їх дещо знижені порівняно з периклазовими.

Доломітові вироби застосовують як випалені (при максимальній температурі 1550...1580°C) так і невипалені (висушені протягом 10—15 годин при температурі 180°C). Доломітові вогнетриви на смоляній зв'язці з спиртової барди (смолодоломітові невипалені) широко використовуються для футеровки кисневих конверторів.

Хромітові вогнетриви одержують із хромітової руди, основу якої становить мінерал хроміт $\text{FeO} \cdot \text{Cr}_2\text{O}_3$ з $t_{\text{пл}} = 2180^\circ\text{C}$. Хромітові вогнетриви проявляють нейтральні властивості, що дуже цінно, та стійкі по відношенню до середніх, основних та кислих розплавів. Вони мають високу термостійкість та вогнетривкість, але рідка фаза з'являється уже при температурі близько 700°C. Тому хромітовий вогнетрив при високих температурах знаходиться в пластичному стані й ефективно використовується для обмазок та набивок у запалювальних поясах топок, на охолоджувальних поверхнях печей, при гарячих ремонтах.

Периклазохромітові вогнетриви виготовляються із магнезиту з добавкою хромітової руди. Таке сполучення дуже вдале, тому що хроміт сприяє підвищенню шлакостійкості та термостійкості вогнетривів та полегшує їх виготовлення, а магнезит покращує термічні характеристики ($t_{\text{вогн}}$ та $t_{\text{п.р}}$), забезпечує появу кристалічного (периклазового) каркасу у виробках. Ці вогнетриви застосовуються для кладки стін та поду, виконання склепіння плавильних печей чорної та кольорової металургії.

Форстеритові вогнетриви містять мінерал форстерит $2\text{MgO} \cdot \text{SiO}_2$ з температурою плавлення $t_{\text{пл}} = 1890^\circ\text{C}$. Вони стійкі проти окалини та основних розплавів, мають підвищену стійкість проти спрацювання та щодо механічних навантажень. Ці вогнетриви використовуються в цементацийних печах, насадках рекуператорів мартенівських печей, для виготовлення поду нагрівальних печей тощо.

Баделейтові та баделейтокорундові (бакор) вогнетриви мають у своєму складі дорогий та дефіцитний діоксид цирконію ZrO_2 з $t_{\text{пл}} = 2700^\circ\text{C}$, відзначаються великою стійкістю до кислих та середніх розплавів, міцністю при високих температурах, хорошими термічними властивостями. Ці

вогнетриви застосовуються у ВУ атомної промисловості, ракетній техніці тощо. Особливо успішно використовуються в скловарних печах електроплавлені бакорові вироби з вмістом $ZrO_2 = 20...60\%$.

Цирконові вогнетриви виготовляють із менш дефіцитного та не дуже дорогого цирконового концентрату $ZrO_2 \cdot SiO_2$, який містить у собі мінерал циркон, що плавиться з розкладанням при $1775^\circ C$.

Графітові та коксові вогнетриви виготовляються з дешевої та доступної сировини (антрацит після термообробки при $t=1100^\circ C$, металургійний кокс, графіт та кам'яновугільна смола) з високою температурою плавлення $t_{пл} \geq 3500^\circ C$. Вони не змочуються розплавами і тому абсолютно стійкі проти будь-яких з них, мають малу щільність і високу вогнетривкість та термостійкість, електропровідні, але починають окиснюватись у продуктах повного горіння уже при $t \geq 600^\circ C$. Тому ці вогнетриви використовуються в суміші з іншими вогнетривкими матеріалами (глинистографітові, графіто-шамотні тощо) та у відновному середовищі (у футеровках газогенераторів, електродугових печей для виготовлення феросплавів, алюмінію, свинцю, подів доменних печей тощо).

Карбід-кремнієві вогнетриви окиснюються повільніше, ніж вуглецеві (захищає тонка плівка SiO_2), мають високу твердість, стійкість проти зношування, тепло- та електропровідність, термостійкість. Вони стійкі проти середніх та кислих розплавів, нестійкі проти основних; SiC (карбід кремнію) розкладається при $t \geq 700^\circ C$. Ці вогнетриви застосовуються для виготовлення запалювальних поясів топок, керамічних рекуператорів, муфелів, реторт для плавлення цинку та інших кольорових металів, у футеровці газогенераторів.

Різні оксидні та безкисневі вогнетриви з чистих хімічних сполук завдяки різноманітності властивостей та виключно високій якості все ширше застосовуються в нових високотемпературних процесах, у тому числі плазмових, у виробництві особливо чистих металів та сплавів, у ракетній техніці, енергетиці — на АЕС тощо.

Нині для підвищення стійкості вогнетривких виробів на їх поверхню наносять *вогнетривкі покриття* методом газополум'яного (плазмового) напилювання чистих тугоплавких порошків, наприклад Al_2O_3 , ThO_2 , MgO , ZrO_2 , при виконанні та ремонті футеровок, що суттєво подовжує термін служби ВУ.

6.4.5. Вогнетривкий бетон. Вогнетривкий бетон являє собою суміш вогнетривкого заповнювача, зв'язки та добавок, що при замішуванні водяними розчинами в результаті процесів твердіння перетворюється на каменеподібне тіло. Твердіння вогнетривкого бетону відбувається при кімнатній температурі, або при нагріванні не вище як 600°C ; при цьому бетон набуває початкових заданих властивостей. Міцність вогнетривкого бетону при нагріванні в процесі сушіння і виведення установки на режим безперервно зростає при твердінні (до 300°C), зміцненні ($300\dots 1000^\circ\text{C}$) та спіканні (вище як 1000°C).

Як заповнювач (70...80% за масою) використовується безусадковий вогнетривкий матеріал (подрібнені відходи вогнетривів), з розміром частинок від 0,5 до 40 мм. Крупні кушки в бетоні відіграють роль арматури, зменшують усадку.

Як зв'язки використовують твердіючі в холодному стані вогнетривкі цементи (глиноземистий, кварцитовий, периклазовий), тонкомелені вогнетривкі порошки, рідке скло ($\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{SiO}_2$). Особливо якісні бетони одержують на фосфатних зв'язках — алюмофосфатній $\text{Al}_2(\text{HPO}_4)_3$, магнійфосфатній $\text{Mg}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$, ортофосфатній кислоті H_3PO_4 .

Для замішування бетонної маси використовуються водні розчини солей, кислот та інші електроліти. В суміш вводять різні домішки — пластифікувальні (пом'якшувальні), протиусадочні, поверхнево-активні, регулюючі швидкість тужавлення та твердіння.

Основні вимоги до вогнетривких бетонів — сталість об'єму та оптимальна міцність у температурному діапазоні експлуатації, обмежена деформація при спіканні.

Вогнетривкі бетони поставляються у вигляді виробів, готових до застосування, мас або сумішей, що потребують змішування із замішувачем і призначаються для виготовлення блочних та монолітних футеровок, ремонту вогне-

тривкої кладки. За максимальною температурою застосування вони поділяються на чотири групи — для помірних (1100°C), середніх (1400°C), високих (1700°C) та особливо високих (вище 1700°C) температур.

Вогнетривкі бетони дооре з'єднуються з холодними елементами робочих камер плавильних печей, а звичайні дешеві вогнетривкі бетони застосовуються в менш відповідальних місцях: в нагрівальних, тунельних та термічних печах, газоходах, димових трубах тощо.

6.4.6. Набивна вогнетривка маса. На відміну від бетону набивна вогнетривка маса включає в себе коагуляційну (вогнетривку глину, бентоніт) або органічну (смолу, бітум, декстрин, клеї, сульфатно-дріжджову бражку) зв'язку (бентоніти — це колоїдні глини, що складаються в основному з мінералів групи монтморілоніту $Al_2[Si_4O_{10}] \cdot (OH)_2 \cdot nH_2O$).

Набивні маси наносяться шарами безпосередньо на робоче місце і переважно пневмо- чи віброуцільнюються. Як результат, після нагрівання та спікання вогнетривких зерен утворюється моноліт без швів (наприклад, набивне склепіння або під печі), в якому термічні напруги компенсуються пластичною деформацією. Властивості набивних мас наближаються до властивостей вогнетривких штучних виробів, а за низкою показників можуть навіть перевищувати їх.

Слід зазначити, що часто буває важко провести чітку межу між вогнетривкими бетонами та набивними масами. Застосування набивних мас широко поширене у високотемпературних робочих камерах: при наварюванні поду мартенівських печей, набиванні жолобів для розливки металів, обмащенні запалювальних поясів топок, набиванні охолоджувальних ділянок стін та всієї робочої камери (циклонні печі), набиванні склепіння електросталеплавильних печей тощо.

6.4.7. Вибір стійкого робочого вогнетриву. Вибір стійкого вогнетриву при проектуванні ВУ здійснюється передусім на базі накопиченого виробничого досвіду, характеристик вогнетривів та їх стійкості в умовах конкретних технологічних процесів.

До руйнівальних факторів вогнетривів при високих тем-

пературах відносять різні механічні навантаження, фізико-хімічні взаємодії з розплавленим та пароподібним технологічним матеріалом, термічні напруги, а також різні їх комбінації.

Вогнетрив добирають за стійкістю до головного руйнівального фактора в даних конкретних умовах з урахуванням інших руйнівальних дій.

При дії розплавленого технологічного матеріалу (найпоширеніша причина руйнування футеровки) вогнетрив добирають за хімічним складом мінерального розплаву з урахуванням його стійкості:

при *кислому розплаві* добирають *кислі вогнетриви* (динасові, алюмосилікатні, корундові, бакорові, карбідкремнієві);

при *основному розплаві* — *основні вогнетриви* (периклазові, доломітові, периклазохромітові, хромітопериклазові, магнезіально-шпінелідні);

при *середньому розплаві* — *нейтральні вогнетриви* (алюмосилікатні, хромітові);

у *відновному середовищі* — вуглецеві, карбідкремнієві.

У разі різкозмінного температурного режиму роботи футеровки і відсутності мінерального розплаву вогнетриви добираються за термостійкістю (додаток 12).

За умови значних температурних напруг небажано використовувати крупноблочні та фасонні вироби, треба віддавати перевагу нормальній цеглі. Високу термостійкість мають футеровки з набивних мас.

При поєднанні змінного теплового режиму з дією розплавленого мінерального матеріалу враховуються шлакостійкість та термостійкість робочого вогнетриву. Якщо тепловий режим стабільний, а розплав відсутній, то на футеровку діє тільки механічне навантаження при високій температурі. Це потребує застосування вогнетриву підвищеної механічної міцності — щільного спеченого з тонкого порошку, або літого електроплавленого.

За малих механічних навантажень треба добирати вогнетрив, який забезпечує $t_{\text{вогн}} > t_{\text{роб}}^{\text{макс}}$ та $t_{\text{п.р}} \geq t_{\text{роб}}^{\text{сеп}}$. У цих умовах для футеровки доцільно використовувати найменш

дефіцитні та недорогі вогнетриви; в окремих випадках можна застосовувати легковагові вогнетриви.

6.4.8. Теплоізоляційні матеріали та вироби. Теплоізоляційні матеріали призначені для ефективного зниження теплових втрат через футеровку ВУ у навколишнє середовище. Вимоги до теплоізоляційних матеріалів такі: низька теплопровідність, стабільність фізико-механічних та тепло-технічних властивостей в умовах експлуатації, нетоксичність речовин, стійкість до підвищеної температури.

Кращим теплоізолятором є шар нерухомого повітря. За помірних температур (не вище як 500°C) його теплопровідність $\lambda_{\text{пов}} = 0,02 \dots 0,05 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$, тобто на два-три порядки менша, ніж у більшості непористих конструкційних матеріалів. Тому теплопровідність теплоізоляційних матеріалів зменшує їхня пористість, при цьому кращими є ізольовані дрібні пори. Розрізняють теплоізоляційні матеріали які працюють в межах високих температур ($>1100^{\circ}\text{C}$) — легковагові вогнетриви та в межах низьких температур ($70 \dots 90^{\circ}\text{C}$).

6.4.8.1. Теплоізоляційні вогнетривкі матеріали. Вони мають велике значення для теплоізоляції. Для високотемпературної теплової ізоляції використовують легковагові вогнетривкі вироби (легковаги), які мають, як правило, високу теплопровідність порівняно зі звичайними ізоляційними матеріалами і можуть надійно працювати в умовах високих температур. Легковаги класифікуються за хіміко-мінеральним складом та уявною (позірною) щільністю, а нормується максимальна робоча температура $t_{\text{роб}}^{\text{макс}}$ (дод. 10).

Порівняно зі щільними вогнетривами легковагові мають суттєво знижені шлакостійкість, термостійкість та міцність. Тому легковагові вогнетриви не використовуються як робочі вогнетриви там, де на футеровку діє розплав, виникають значні термічні напруги або механічні навантаження. За відсутності вказаних факторів легковагові вогнетриви використовуються як робочі, іноді під шаром захисного вогнетривкового покриття, яке наноситься з вогняного боку. В решті випадків легковагові вогнетриви використовуються в багатошарових обмуровках між робочим вогнетривом та шаром ефективної теплової ізоляції.

В останні роки все ширше застосовуються волокнисті легковагові матеріали, які мають найнижчий коефіцієнт теплопровідності і водночас високі вогнетривкі властивості. Їх застосування дає великий економічний ефект. Так, за даними американських спеціалістів, використання каолінової вати дає змогу знизити масу нагрівальних печей у 9...12, капітальні витрати — в 5...10, а тепловтрати — в 10...11 разів. Економія палива внаслідок застосування волокнистих легковагів становить 10...15% в печах безперервної дії та 45% у печах періодичної дії.

6.4.8.2. Теплоізоляційні матеріали. Теплоізоляційні матеріали класифікуються за такими основними ознаками.

За формою та зовнішнім виглядом виділяють штучні вироби (плити, цегла, порожнисті циліндри, напівциліндри та сегменти), рулонні та шнурові (мати, шнури, джгути), розсипчасті та сипучі матеріали (спучений перліт та вермикуліт, вата мінеральна та скляна).

За структурою розрізняють матеріали волокнисті (азбест, скловолокно, мінеральна вата), пористі (пінодіатоміт, совеліт, пінопласти, піноскло), зернисті (дрібняк діатомітовий, вермикулітовий).

За щільністю в сухому стані (кг/м^3) теплоізоляційні матеріали класифікують на групи та марки (табл.6.2).

Таблиця 6.2. Класифікація теплоізоляційних матеріалів за щільністю

Група теплоізоляційного матеріалу	Марка
Особливо низької щільності	15,25,35,50,75
Низької щільності	100,125,150,175
Середньої щільності	200,225,250,300,350
Щільні	400,450,500,600

За жорсткістю, яка вимірюється значенням відносного стиснення при певних питомих навантаженнях, розрізняють теплоізоляційні матеріали п'яти видів — м'які, напівжорсткі, жорсткі, підвищеної жорсткості та тверді.

Органічні теплоізоляційні матеріали використовуються для ізоляції поверхонь з температурою нижче як 100°C , не-

органічні також обмежені температурами застосування $t_{\text{роб}}^{\text{макс}}$ до 900°C, вище яких вони дають недопустиму усадку (спікаються), втрачають механічну міцність та теплоізоляційні властивості. Характеристики найпоширеніших теплоізоляційних матеріалів та виробів наведено в додатку 11.

Теплоізоляційні матеріали бувають *природні* та *штучні*.

До природних теплоізоляційних матеріалів, які використовуються при спорудженні ВУ, належать діатоміт, трепел та азбест. Діатоміт та трепел практично мають один і той самий хімічний склад, але вони різні за своєю структурою.

Діатоміт — це гірська осадова порода пізнього відкладення, яка складається переважно з раковинок діатомових водоростей, він крихкий і легкий; *трепел* щільніший і важчий. Температура застосування діатоміту до 900°C, використовується для засипання пазух ВУ та теплоізоляційних обмазок зовнішніх частин вогнетривкої кладки.

Азбест (мінерал групи серпентину) випускається у вигляді різних виробів, які мають такі характеристики (табл. 6.3).

Таблиця 6.3. Характеристика ізоляційних виробів з азбесту

Вироби	Об'ємна маса, кг/м ³	Температура застосування, °С	Призначення
Азбестове волокно	200...520	600	Засипка пазух ВУ
Азбестовий папір, δ=0,2...1,5 мм	1250	500	Прокладка між металевими частинами каркасу тощо
Азбестовий картон δ2;2,5;3;3,5;4;5;6;8;10	1000...1300	600	
Азбестовий шнур	600...800	220	Заповнення температурних швів у вогнетривкій кладці

Коефіцієнт теплопровідності азбестових виробів можна приймати в межах — $\lambda_{\text{азб}} = 0,157...0,118$ Вт/(м·К).

Найпоширенішим *штучним теплоізоляційним матеріалом* є *діатомітова цегла*, що виробляється шляхом

випалювання сирцю при температурі 750...900°C, виготовленого з діатоміту та дерев'яної тирси, яка вигорає при випалюванні.

Пінодіатоміт виготовляється з діатоміту, в який дають речовину, що утворює піну-сапонін. Суміш діатоміту та піни розливають у форми і після сушіння випалюють у тунельних печах при температурі 850...900°C.

Мінеральна вата виготовляється з розплаву металургійних та паливних шлаків і застосовується для заповнення зазорів між кладкою звичайної глиняної цегли і вогнетривкої футеровки при спорудженні, наприклад, димових труб.

Совеліт — теплоізоляційний матеріал, виготовлений з обпаленого діатоміту (85%) та розпушеного азбесту. Випалений доломіт гаситься й отримане молоко насичується вуглекислим газом, куди додають азбест. Цю масу розливають у форми, запресовують і висушують у спеціальних камерах. У промислових печах совеліт використовують як теплоізоляційний прошарок між металевим корпусом і вогнетривкою кладкою. Максимальна температура застосування 500°C.

Перлітовий пісок та щебінь використовуються для виготовлення легких вогнетривких бетонів, а також для засипної ізоляції.

6.4.8.3. Розчини використовують для цегляної кладки. При муруванні ВУ, залежно від їх призначення та матеріалів кладки використовуються різні за своїми властивостями розчини.

Для кладки із звичайної глиняної та діатомітової цегли використовуються будівельні розчини, які являють собою суміші в'язучих речовин та заповнювачів. Як в'язучі в основному використовують цемент та звичайну глину, а заповнювачем є кварцовий пісок. Для надання розчину більшої пластичності, що полегшує укладання на розчин цегли, в цементні розчини додають пластифіковані (пом'якшувальні) домішки — вапно, глину та інші.

Будівельні розчини поділяють на цементно-вапняні, цементно-глиняні та піщано-глиняні. Будівельні розчини з

домішками цементу застосовуються переважно в місцях з підвищеною вологістю, де необхідна механічна міцність.

Розчини поділяються на марки, які відповідають границі міцності розчину: 2...2,5 для цементно-глиняних та 25...100 цементно-вапняних або цементно-глиняних марок.

Для кладки вогнетривких виробів використовуються *вогнетривкі розчини*, близькі за своїм хімічним складом до тих видів вогнетривких виробів, з яких вимуровується вогнетривка кладка. Вогнетривкі розчини не мають механічної міцності за звичайних температур і тільки в процесі розігріву кладки відбувається їхнє спікання на глибину (від вогневої поверхні кладки), яка залежить від температури та товщини кладки. Механічна міцність розчину після його спікання залежить від температури, при якій відбулось спікання, та хімічного складу розчину. Чим вища ця міцність, тим вища якість вогнетривкої кладки та довший термін її експлуатації. Це пояснюється тим, що можливість руйнування кладки в найбільш слабких вузлах (швах, заповнених розчином) від дії рідких металів, шлаків та агресивних газоподібних продуктів при вищій міцності кладки значно зменшується.

Основною складовою вогнетривких розчинів є *мартелі* — вогнетривкі порошки, які складаються з подрібнених алюмосилікатних або кремнеземистих матеріалів та вогнетривкої глини з домішкою пластифікаторів.

Залежно від сировинного, хімічного та зернового складу, а також вогнетривкості випускаються: *алюмосилікатні мартелі*; високоглиноземисті ($\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiO}_2$ не нижче як 60 та 40% відповідно) з вогнетривкістю не нижче 2800...1750°C; шамотні тонкого та крупного помелу з вмістом $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiO}_2$ не менш як 30...33%, з вогнетривкістю 1730...1650°C; напівкислі з вмістом Al_2O_3 не менш як 20%, з вогнетривкістю 1650...1610°C. Пластифікатором для цих мартелів використовується розчин концентрату сульфітно-спиртової барди та кальцинованої соди.

Мартель динасовий складається із суміші кремнеземистих матеріалів (кварц, подрібнений динас), вогнетривкої глини (15...10%) та пластифікатора (використовується для

температури $t_{\text{роб}}^{\text{макс}} \leq 1500^\circ\text{C}$). Вміст SiO_2 в ньому 90...96%. Ці мартелі є найпоширенішими складовими розчинів для кладок ВУ з вогнетривких виробів.

При виготовленні вогнетривких розчинів із мартелів до них додають воду і ретельно перемішують. Розчини за своєю консистенцією бувають рідкі — 500...600 л води, напівгусті — 400...450 л води та густі — 350...400 л води на 1 м³ сухої суміші.

Консистенція розчину, так само як і тонкість помелу мартелю, залежить від товщини шва в кладці. Чим тонший шов, тим рідкіша консистенція розчину та тонший помел складових мартелю.

У вогнетехніці використовуються також розчини: *хромисто-глиняні* — 90% порошку, 10% вогнетривкої глини; *магнезитові* або *хромомагнезитові на смолі* — 90% магнезитового або хромистого порошку та 10% кам'яновугільної збездженої смоли; *вуглецеві* — 80% коксового пилу, 20% вогнетривкої глини.

У практиці поширені розчини, що твердіють на повітрі. Це розчини з добавкою в них рідкого скла, або вогнетривкого портландцементу (наприклад, глиноземистого, який одержують у результаті випалювання суміші вапняку та бокситу), що забезпечує зниження газопроникності швів у вогнетривкій кладці.

Контрольні запитання

1. Які чинники найактивніше впливають на зношування окремих конструктивних елементів ВТУ? Чи має при цьому значення форсування технологічного процесу?
2. Дайте коротку, але вичерпну характеристику металевих матеріалів, які використовуються при спорудженні ВТУ.
3. Яким чином досягається необхідна корозійна стійкість металів, що використовуються при спорудженні ВТУ?
4. Назвіть загальні властивості та особливості мінеральних матеріалів (шихти, руди, паливні та технологічні

шлаки тощо). Як мінеральні розплави впливають на зношування вогнетривів?

5. Наведіть загальну характеристику вогнетривів.
6. Назвіть основні властивості вогнетривів. Як ці властивості впливають на стійкість вогнетривів в умовах експлуатації ВТУ?
7. Як фізичні властивості вогнетривів (пористість, щільність, газопроникність, відхилення лінійних розмірів тощо) впливають на якісні показники вогнетривких виробів?
8. Назвіть основні типи вогнетривів, що використовуються при спорудженні ВТУ. Основні сфери їх застосування.
9. Вогнетривкі бетони: їх склад та сфера застосування.
10. Набивна вогнетривка маса: її склад та сфера застосування.
11. Вибір стійкого робочого вогнетриву для умов конкретних технологічних процесів: плавильних, нагрівних, при різкозмінному температурному режимі, при малих механічних навантаженнях тощо.
12. Назвіть основні вимоги до теплоізоляційних матеріалів та виробів.
13. Теплоізоляційні вогнетривкі вироби (легковаги): їх характеристика та сфера застосування.
14. Теплоізоляційні матеріали: їх характеристика та сфера застосування.
15. Розчини, які використовуються для кладки звичайної глиняної цегли та вогнетривких виробів.
16. Основні складові вогнетривких розчинів (мартелів). Вибір консистенції розчинів залежно від товщини швів.

КОНСТРУКТИВНІ ЕЛЕМЕНТИ ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНИХ УСТАНОВОК

7.1. Основні елементи високотемпературних установок

Високотемпературна установка являє собою сукупність елементів, різних за конструкцією та за функціональним призначенням, які об'єднуються в єдине ціле:

1) *робоча камера* — головний елемент ВУ, конструкція якого залежить від технологічного процесу та тепло-технічного принципу його здійснення;

2) *регенеративні елементи* служать для повернення частини теплоти технологічних газів, технологічних продуктів та відходів у робочу камеру;

3) *елементи зовнішнього технологічного та енергетичного використання матеріальних та енергетичних відходів* даної установки;

4) *елементи захисту навколишнього середовища* (пило-, газозуловлювачі тощо);

5) *зовнішні транспортні засоби*;

6) *нагнітальні засоби* — вентилятори, повітронагнітачі, димососи та інші.

Робочі камери ВУ складаються з низки конструктивних частин та вузлів: фундаментів, каркасів, захисних стінок (футеровок), пальникового обладнання, завантажувачів технологічного матеріалу та вивантажувачів готового технологічного продукту, внутрішніх транспортних засобів, газоходів тощо.

Конструкції основних частин робочих камер ВУ описано далі.

7.2. Фундаменти та основи

Фундаментом називають ту частину ВУ, яка сприймає навантаження від наземної її частини і передає це навантаження на пласти природного ґрунту, що в цьому разі називають основою, або підвалиною фундаменту. Фундамент та його основа є підземною частиною ВУ і розглядаються завжди як система (рис.7.1).

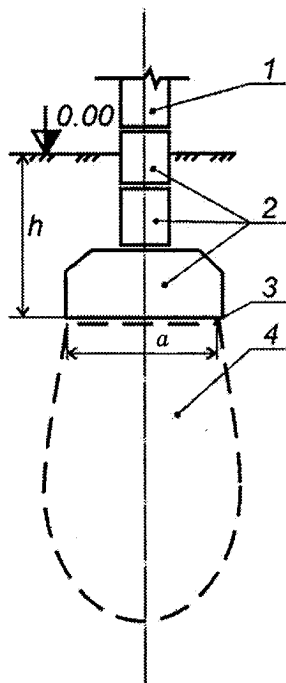


Рис. 7.1. Схема фундаменту та його основи:

- 1 — колона споруди;
- 2 — фундамент; 3 — підшоива фундаменту;
- 4 — основа (підвалина) фундаменту; h — глибина залягання фундаменту; a — ширина підшоиви фундаменту

Надійність цієї системи залежить від міцності ґрунту. Найміцніші ґрунти скальні (I клас) та крупноуламкові (II клас). Слабкі (неміцні) нестійкі природні ґрунти потребують зміцнення (ущільнення чи закріплення), тобто створення штучної основи. Збільшуючи глибину залягання фундаменту, можна зміцнити основу, але це призводить до зростання вартості фундаменту. В сучасних умовах економічно вигідніше зміцнювати слабкі ґрунти шляхом застосування паль.

Під час проектування фундаменту приймають таку глибину його залягання, яка має бути нижча за глибину промерзання ґрунту, але вища за глибину ґрунтових вод. Розміри подошви фундаменту визначаються допустимим тиском на основу, який змінюється від 0,6 до 0,15 МПа залежно від якості ґрунтів.

За конструкцією фундаменти класифікують як стовпові, стрічкові, суцільні та масивні (рис.7.2).

Стовповий фундамент складається з фундаментної плити, на

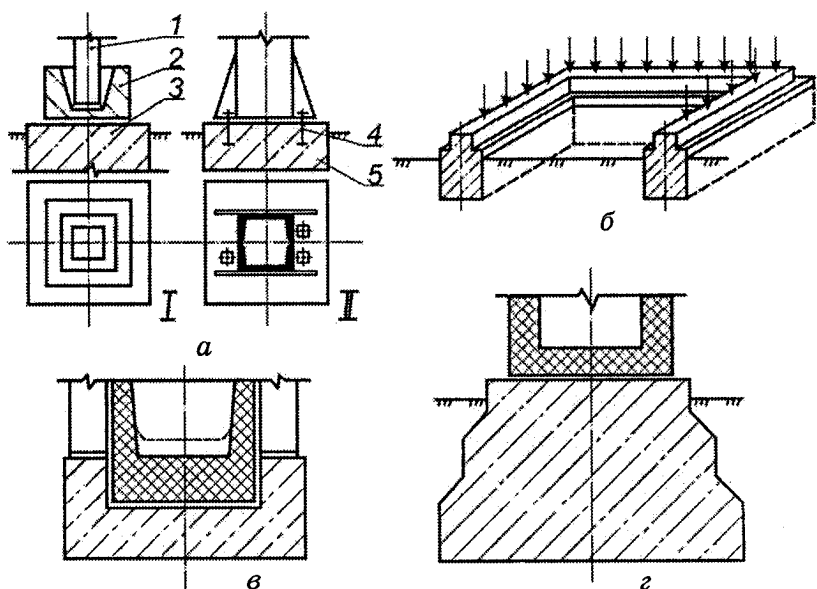


Рис. 7.2. Основні типи конструкцій фундаментів (приклади):
 а — стовповий з фундаментними опорами під залізобетонні (I) та сталеві (II) колони: 1 — колона; 2 — залізобетонний стакан; 3 — фундаментна плита; 4 — анкерні болти; 5 — елемент фундаменту;
 б — стрічковий фундамент; в — суцільний фундамент; г — масивний фундамент (наприклад, під димову трубу)

якій монтується залізобетонний стакан, а в ньому закріплюється колона. Металеві колони кріпляться до фундаментної плити анкерними болтами.

Стрічковий фундамент застосовується тоді, коли на нього безпосередньо опираються стіни ВУ (наприклад, витягнуті тунельні печі тощо).

Суцільний фундамент проектується як єдиний під всю установку. Між подом печі і фундаментом прокладають шар теплової ізоляції або облаштовують повітряні вентиляційні канали.

Масивні фундаменти проектують під споруди при великих зосереджених навантаженнях, наприклад під шахтні печі, димові труби тощо.

7.3. Каркаси

Щоб не допустити руйнування кладки робочої камери ВУ, її скріплюють металевим каркасом.

Функції каркасу такі:

1) сприйняття та передача на фундамент маси споруди чи окремих її частин;

2) сприйняття тиску кладки ВУ при її тепловому розширенні ;

3) протидія горизонтальному розпору, який створюється арочним склепінням;

4) каркас використовується також для закріплення на ньому гарнітури, заслонок, вікон, пальників, форсунок, трубопроводів, сходів, механізмів різного призначення (майданчиків для обслуговування, пристроїв для завантаження та транспортування технологічних матеріалів, а також вивантаження технологічних продуктів тощо).

Листова обшивка каркасу (кожух) захищає зовнішній бік кладки від механічних пошкоджень та забезпечує газонепроникність кладки.

Конструкція каркасу визначається типом та особливістю будови кладки ВУ. Основними елементами каркасу є стояки (колони) із сталюного прокату, стягнені поздовжніми та поперечними в'язями. Дві поздовжні балки обов'язково розміщуються проти п'ят склепіння і називаються підп'ятовими.

Залежно від сприйняття зусиль, що виникають при температурних розширеннях кладки, каркаси діляться на жорсткі та рухомі (рис. 7.3 та 7.4).

Жорсткий каркас являє собою монолітну конструкцію, елементи якої залишаються під час роботи ВУ в нерухомому положенні. При цьому розширення кладки компенсуються температурним швом та ростом склепіння.

Рухомий каркас дає змогу частково компенсувати теплове розширення склепіння кладки за допомогою пружин, що з'єднують вертикальні стояки або ослабленням натягу гайок на поперечних в'язях при нагріванні ВУ (рис.7.4). Збільшення відстані між верхніми кінцями стояків, тобто між підп'ятовими балками приводить до певного опускан-

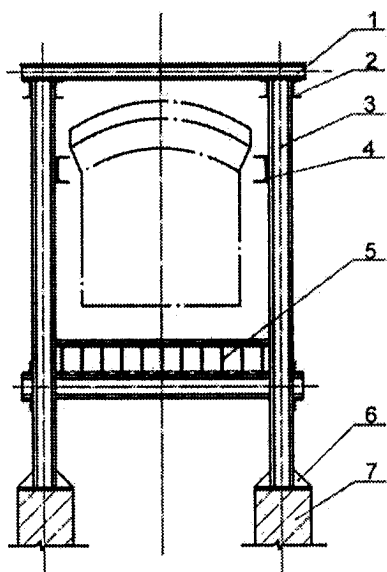


Рис.7.3. Рамний жорсткий каркас: 1 — поперечна пов'язь; 2 — поздовжня пов'язь (прогон); 3 — стоек; 4 — підп'ятова балка; 5 — подова рама; 6 — башмак стояка з опорною плитою; 7 — фундамент

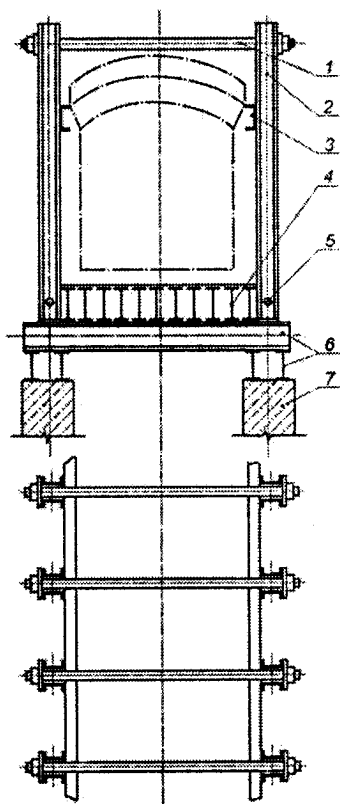


Рис.7.4. Рамний регульований каркас: 1 — верхня регульована пов'язь; 2 — стоек; 3 — підп'ятова балка; 4 — подова рама; 5 — шарнірне або жорстке кріплення; 6 — зварна рама; 7 — фундамент

ня склепіння, що знижує тиск на каркас від теплового розширення склепіння. При охолодженні склепіння поперечні в'язі підтягують. Такі каркаси використовують, наприклад, у скловарних печах.

Листові чи суцільні каркаси використовують для робочих камер циліндричної форми. Одночасно вони виконують функцію герметизуючої обшивки.

Для упередження корозії та зниження міцності сталі застосовують теплоізоляцію або вентиляційні щілини, оскільки температура каркаса має не перевищувати 300...400°C.

7.4. Огородження високотемпературних установок

Для того щоб створити умови для здійснення високотемпературного процесу, необхідно робочий простір ВУ відокремити (огородити) від навколишнього середовища. До огороження ВУ ставляться певні вимоги:

- 1) мінімальна втрата теплоти через теплозахисне огороження в навколишнє середовище;
- 2) висока газощільність;
- 3) забезпечення довгострокової та надійної роботи;
- 4) по можливості низька вартість.

7.4.1. Основні види огороження високотемпературних установок. Найпростішим огороженням або футеровкою (від. нім. Futter — підкладка, захисний шар) є одношарова суцільна конструкція, всі функції в якій (обмеження втрат теплоти, забезпечення стійкості та газощільності) виконує вогнетривкий матеріал.

У сучасних установках огороження мають багато шарів, де кожний шар виконує свою функцію. Сукупність вогнетривкого, теплоізоляційного та ущільнювального шарів у єдиній конструкції називають обмуровкою, а порядок укладання штучних футеровувальних матеріалів — кладкою.

Одношарова вогнетривка кладка виконується з однорідних вогнетривких виробів, є найпростішою і з'явилася першою в історичному розвитку ВУ (рис.7.5).

Товщину стін обчислюють, зважаючи на їхню будівельну міцність, а також залежно від температури внутрішньої поверхні стін. Теплопровідність стіни має забезпечувати температуру зовнішньої поверхні її не вище 60°C. Товщину стіни приймають кратною розмірам цегли. Недоліки одношарової кладки — велика товщина та маса стін, підвищені термічні напруги та значні втрати теплоти в навколишнє середовище.

У *багатошаровій кладці* (рис.7.6) функції шарів відповідають їх призначенню: вогнетрив протистоїть їх руйнуванню за високих температур, вогнетривке захисне покриття захищає вогнетрив від руйнівальної дії технологічного розплаву; легковаги та ефективна ізоляція знижують втрати теплоти в навколишнє середовище, ущіль-

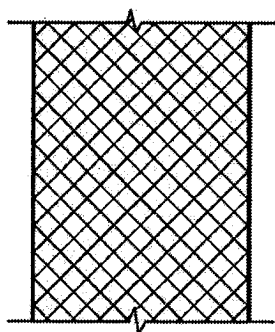


Рис.7.5. Одношарова вогнетривка кладка

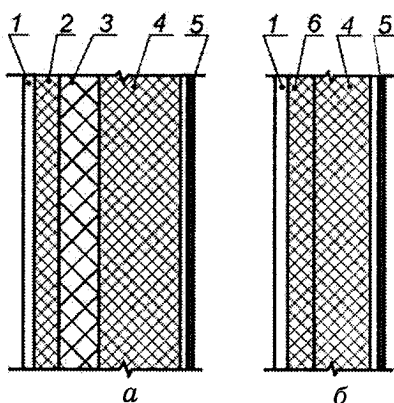


Рис.7.6. Багатошарова кладка з використанням звичайної теплоізоляції (а) та волокнистого вогнетривкового матеріалу (б):

1 — металева обшивка (ущільнювальний шар); 2 — ефективна теплова ізоляція; 3 — легковаз; 4 — вогнетрив; 5 — захисний шар; 6 — волокнистий вогнетривкий матеріал

нювальний шар герметизує кладку.

Захисне вогнетривке покриття наноситься у вигляді пластичного шару завтовшки 5...15 мм або плазмовим напилюванням завтовшки 0,1...0,5 мм. Найважливішою характе-

ристикою вогнетривкового покриття є його тугоплавкість та шлакостійкість. До складу вогнетривких покриттів входять чисті оксиди (ZrO_2 , ThO_2 , Al_2O_3 , MgO , Cr_2O_3), карбіди (TiC , WC , B_4C), бориди (CrB_2 , ZrB_3) та інші чисті сполуки.

Багатошарова кладка значно економніша, порівняно з одношаровою (менші витрати вогнетехнічних матеріалів, менші навантаження, що передаються на фундамент) та ефективніша (менші втрати теплоти в навколишнє середовище).

Якість кладки визначається товщиною швів між вогнетривкими виробами, тому що саме через шви руйнується футеровка. Чим тонший шов та краще його заповнення розчином, тим міцніша та довговічніша футеровка. У табл.7.1 показано зв'язок якості кладки з товщиною швів.

Монолітне огородження виконується з вогнетривких блоків або набивних мас (рис.7.7). Застосування монолітно-

Таблиця 7.1.

Категорія кладки	I	II	III	IV
Якість кладки	особливо ретельна	ретельна	звичайна	проста
Товщина шва, мм	менше 1	1—2	2—3	3—4
Концентрація розчину (мертельного)	рідка	рідка	напівкрута	крута

го огороження дає змогу скоротити строки будівництва в 2—4 рази, трудозатрати в 3—4 та вартість конструкції в 1,5—2 рази. Розміри блоків обмежуються (до 1,0—1,5 м), щоб уникнути надмірних термічних напруг.

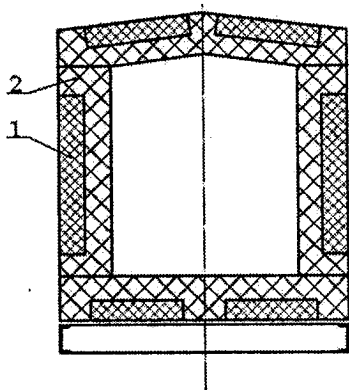


Рис. 7.7. Обмуровка тунельної печі з монолітних панелей:

1 — легкий теплоізоляційний бетон; 2 — вогнетривкий бетон

і дає змогу уповільнити його зношування та продовжити міжремонтний період. Охолодження здійснюється струменями вентиляційного повітря, стиснутим повітрям чи водою. За помірного форсування процесу втрати теплоти сягають 15—25% (за тепловим балансом).

Чисто гарнісажна футеровка створюється при застиганні безпосередньо на охолоджуваній металевій поверхні робочої камери ВУ розплаву технологічного матеріалу. При цьому утворюється два шари застиглого розплаву (гарнісажу) та рухомого розплаву (рис.7.8,в). Охолодження тут за-

Як вказано раніше (п. 6.4.2), фізико-хімічне руйнування вогнетривів під дією мінеральних розплавів більше всього залежить від температури вогнетривів. Зниження температури вогнетривів приблизно на 80°C зменшує їх руйнування майже на порядок. Досягти цього можна, збільшивши відведення теплоти з камери через огороження, шляхом примусового охолодження футеровки.

Примусове охолодження одношарової кладки (рис.7.8, а, б) приводить до зниження температури вогнетриву з гарячого боку

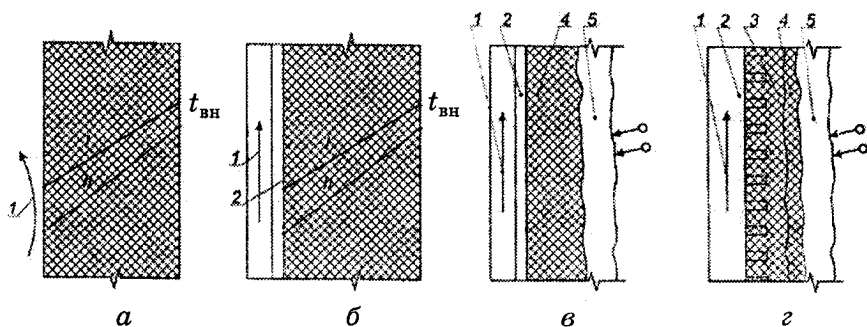


Рис. 7.8. Схеми примусово охолоджуваних футеровок:

а, б — одношарової вогнетривкої кладки відповідно повітрям та за допомогою металевого кесона; в — чисто гарнісажної; г — гарнісажної на вогнетривкій набивці; 1 — потік охолоджувального середовища; 2 — охолоджувана металева стінка; 3 — вогнетривка набивка між шипами; 4 — шар застиглого розплаву (гарнісаж); 5 — шар рухомого технологічного розплаву. Розподіл температур по товщині кладки без охолодження (I) та при зовнішньому її охолодженні (II)

стосовується водяне, або випарне. Через те що в цій футеровці відсутній вогнетрив, вона є абсолютно шлакостійкою.

Гарнісажна футеровка на вогнетривкій набивці (рис.7.8, г) створюється на тонкому шарі (менше 30 мм) набивки, яка наноситься на охолоджувану сталеву стінку з навареними на ній шипами. Шипи виконують роль арматури та підвищують теплопровідність шару набивки. Така футеровка найбільш ефективна для сучасних високофорсованих робочих камер ВУ.

7.4.2. Конструктивні частини огороження. Основними конструктивними частинами огороження є поди, стіни та склепіння.

Поди робочих камер мають бути ерозієстійкими (для нагрівальних установок) та шлакостійкими (для плавильних установок). Найчастіше під виконується багатошаровим (рис.7.9,а). На сталевий лист, що лежить на балках каркасу, по вистилці з азбестового картону викладаються послідовно шари теплової ізоляції, шамотного та робочого вогнетривів. Такий під має велику товщину (0,8...1,5 м) і значну теплову інерцію.

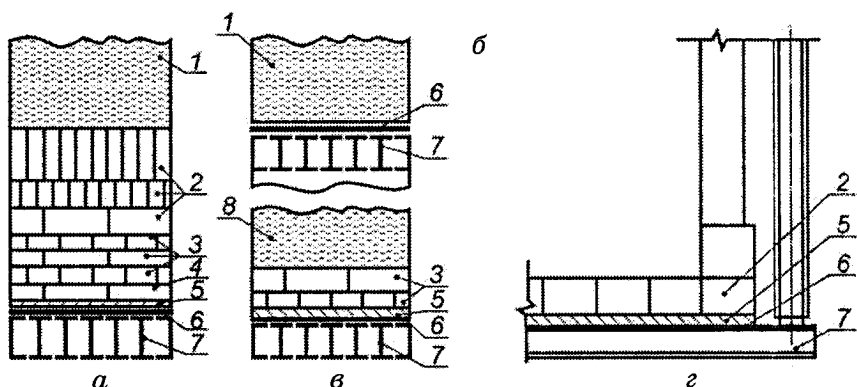


Рис. 7.9. Конструктивні схеми поду високотемпературних установок: а — багатошаровий; б — набивний; в — набивний в комбінації з кладкою; г — одношаровий з бруса без теплової ізоляції; 1 — шар вогнетривкого порошку; 2 — робочий вогнетрив; 3 — шамотний вогнетрив; 4 — шамотний легковаг; 5 — вистилка з азбестового картону; 6 — сталевий лист; 7 — балки каркаса; 8 — набивна вогнетривка маса

Останнім часом для ванних печей широко використовуються поди монолітні, набивні або набивні в комбінації з кладкою (рис.7.9, б, в). Вони характеризуються підвищеною стійкістю за менших витрат вогнетривких матеріалів та знижених трудовитрат. Надлишкова теплоізоляція призводить до зменшення стійкості футеровки через підвищення її температури. Тому деякі поди не мають теплової ізоляції (рис.7.9, г), часто робочий вогнетрив примусово охолоджується (наприклад, під ванної склоплавильної печі).

У стінах використовуються огороження всіх типів — вогнетривка кладка, футеровки монолітні та з примусовим охолодженням.

У багатошаровій кладці окремі шари по товщині стінки перев'язуються між собою. Вогнетривка цегла випускається в шар легковагу, а останній, в шар теплової ізоляції (рис.7.10, а). При висоті стіни більш як 4 м облаштовують розвантажувальні пояси чи анкерні кріплення для передачі частини маси стіни на каркас (рис.7.10, в, г). Під розвантажувальним поясом залишають горизонтальний температурний шов для компенсації теплового розширення розміщеної нижче частини стіни.

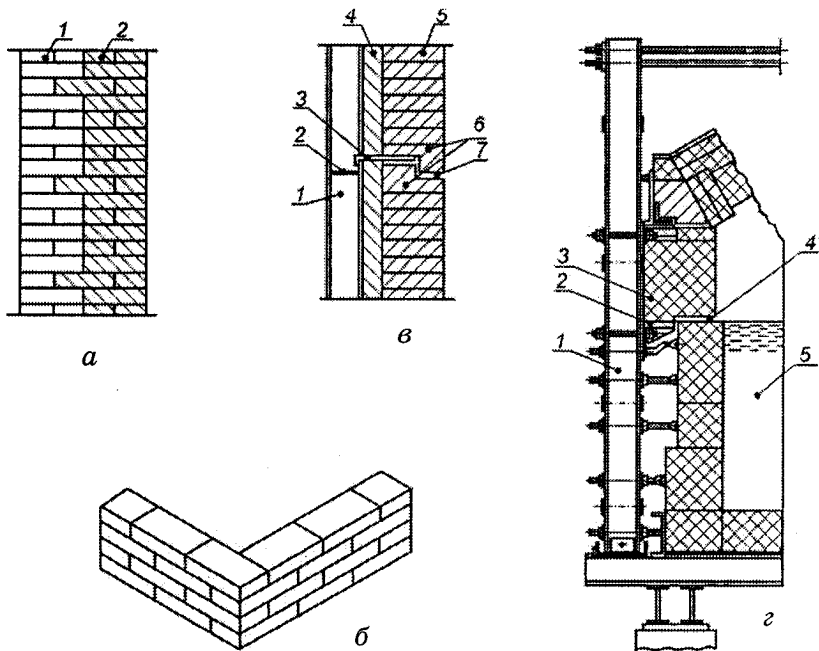


Рис. 7.10. Приклади кладки стін високотемпературних установок: а — двошарова стіна з перев'язкою шарів: 1 — теплоізоляційна цегла; 2 — вогнетривка цегла; б — перев'язка вертикальних швів при кладці прямої стіни та рогу стіни; в — схема розвантажувального пояса у високій стіні: 1 — стояк; 2 — балка прого-ну; 3 — кронштейн; 4 — теплоізоляційна плита; 5 — вогнетривка кладка; 6 — фасонні вогнетривкі вироби; 7 — горизонтальний температурний шов; г — кладка ванної склоплавильної печі та її кріплення на каркас: 1 — стояк; 2 — кронштейн; 3 — вогнетривкий брус; 4 — тем-пературний шов; 5 — ванна розплаву

Робочий простір ВУ зверху перекривається склепінням. За формою склепіння класифікують на плоскі, циліндричні та купольні, а за способом кріплення — на розпірні, розпірно-підвісні та підвісні.

Плоскі склепіння виконують із спеціальних шамотних плит і застосовують для невеликих ВУ, які працюють за температур до 1000°C (рис.7.11).

Арочне склепіння досить поширене у ВУ; в розрізі воно являє собою арку зі сталим радіусом кривизни. Арочні

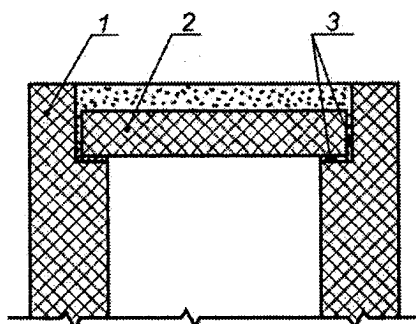


Рис. 7.11. З'єднання стін з плоским склепінням:

1 — верх стіни; 2 — плоске склепіння;

3 — температурні шви

склепіння прості за конструкцією та надійні в експлуатації, але потребують обов'язкового застосування каркаса для сприйняття горизонтальної сили, що розпирає стіни ВУ. Точно визначити силу розпору важко через те, що необхідно враховувати розширення кладки склепіння при її нагріванні. Наближено сила розпору може бути визначена згідно зі схемою (рис.7.12) за формулою:

$$R=K \frac{P}{2} \operatorname{ctg} \frac{\alpha}{2},$$

де R — сила розпору склепіння, Н; K — коефіцієнт зростання сили R залежно від температури склепіння, °С; P — сила тяжіння склепіння за довжиною між стійками, Н; α — центральний кут склепіння. Коефіцієнт K обирають залежно від температури склепіння ($t_{\text{скл}}$).

Температура, $t_{\text{скл}}$, °С	900	1000	1300	1500
Коефіцієнт K	2,0	2,5	3,0	3,5

Розпірні склепіння виконуються циліндричними (при $\alpha=60\dots90^\circ$ склепіння називають лучковими, при $\alpha=120\dots180^\circ$ — півциркульними) або купольними (рис.7.13). Купольні склепіння найбільш стійкі. В розпірних склепіннях при деформації цегли нещільності не виникає: при усадці склепіння робочої камери опускається, при зростанні — піднімається.

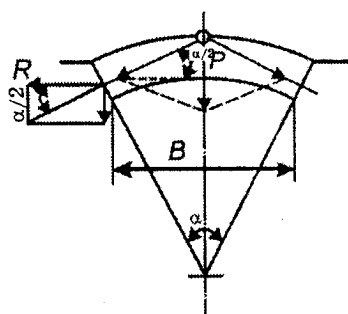


Рис. 7.12. Схема сил розпору футеровки в арочному склепінні

Розпирні склепіння зкладаються з клинової цегли кільцями чи в перев'язку (рис.7.14). Вони мають від одного до п'яти замкових цеглин у кільці, які забиваються перед розбиранням опалубки після викладки склепіння.

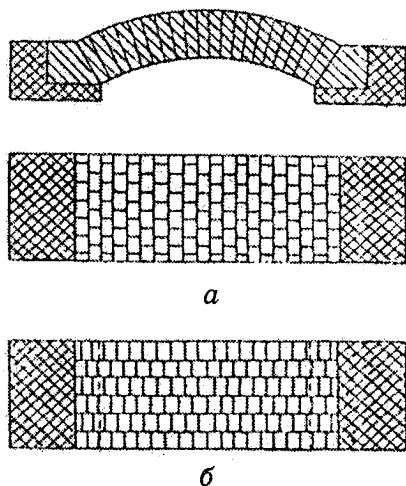
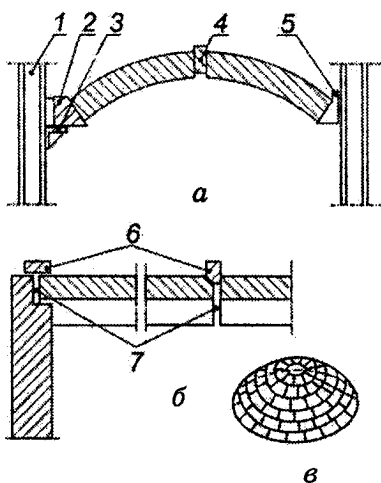


Рис. 7.13. Конструкція розпирних склепінь високотемпературних установок: а — поперечний розріз; б — поздовжній розріз; в — купольне склепіння;
 1 — стояк; 2 — п'ятова цегла;
 3 — підп'ятова балка; 4 — замкова цеглина (забита не до кінця);
 5 — п'ятова охолоджувана балка;
 6 — ущільнюючі вогнетривкі вироби;
 7 — температурні шви

Рис. 7.14. Кладка склепінь:
 а — перев'язом; б — кільцями

Прогін розпирного склепіння обмежується допустимими напругами та температурою початку деформації під навантаженням $t_{п.р}$ і для більшості вогнетривів не перевищує 3 м.

Кращим матеріалом для виготовлення склепінь є динасова цегла.

У розпирно-підвісних склепіннях частина маси склепіння передається через підвіски на каркас (рис.7.15); інша частина передається на п'ятову балку. Скріплення цеглин між собою здійснюється за допомогою тонких сталевих пластинок, які закладаються між цеглинами по всіх чотирьох гранях. За високих температур вони окиснюються і забезпечу-

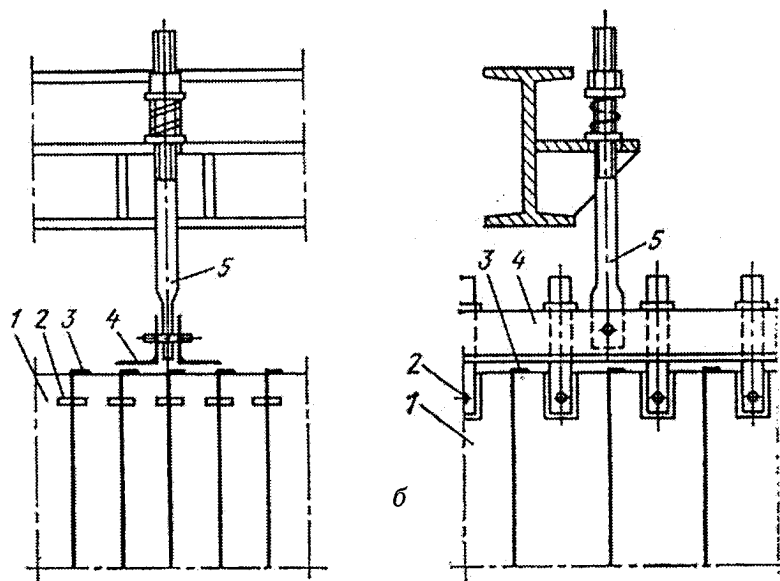
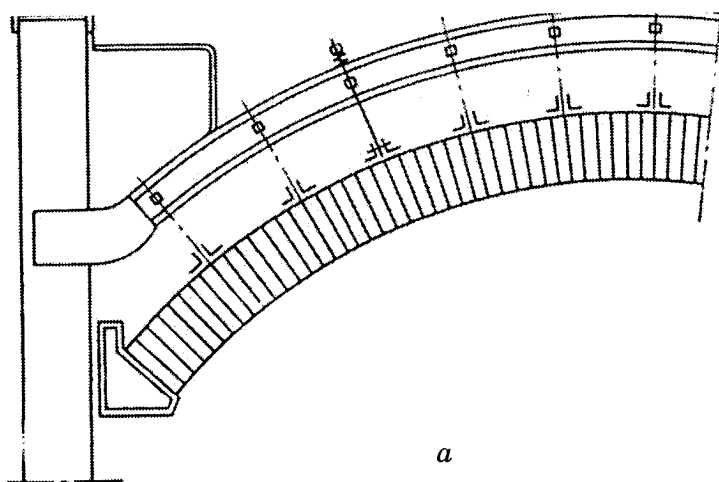


Рис. 7.15. Конструкція розпірно-підвісного склепіння:
 а — поперечний розріз; б — вузол кріплення;
 1 — периклазохромітова склепінна цеглина; 2 — сталевий штир;
 3 — залізна пластина; 4 — кутик; 5 — підвіска

ють високу міцність та щільність склепіння. Ці склепіння складніші (потребують фасонних вогнетривів). Їх вартість в 2—3 рази вища, ніж розпірних. Теплопровідність такого склепіння, а значить і втрата теплоти в навколишнє середовище зростає. П'яти, що сприймають розпірні зусилля кріплять до каркаса нерухомо або так, що можливе їхнє переміщення внаслідок нагрівання склепіння.

Температурні шви в розпірних купольних склепіннях не створюються, а в циліндричних розпірних та розпірно-підвісних — передбачаються тільки по довжині через кожні 3—4 м. Ці шви ущільнюються.

Підвісні склепіння повністю передають масу на каркас за допомогою різних за конструкцією кріплень (рис. 7.16). Вартість підвісних склепінь найвища, а газощільність найменша порівняно з іншими склепіннями. Теплова ізоляція не повинна закривати підвіски через небезпеку перегрівання металу підвісок.

Склепіння виконуються: а) при малих прогонах ($B < 3\text{ м}$) — розпірними (для будь-яких вогнетривів); б) при середніх прогонах ($B = 3 \dots 7\text{ м}$) — розпірними (для динасової цегли), або розпірно-підвісними (для інших вогнетривів); в) при великих прогонах ($B = 10 \dots 12\text{ м}$) — підвісними.

Окремі елементи та частини ВУ з'єднуються між собою по газовому тракту газоходами. За температурним рівнем газів, що переміщаються в газоходах, вони діляться на: а) високотемпературні $t_r < t_{\text{пл}}^{\text{r.m}}$, де $t_{\text{пл}}^{\text{r.m}}$ — температура плавлення технологічного матеріалу, що обробляється у ВУ; б) середньотемпературні ($t_r = 800^\circ\text{C} \dots t_{\text{пл}}^{\text{r.m}}$); в) помірної температури ($t_r = 400 \dots 800^\circ\text{C}$); г) низькотемпературні ($t_r < 400^\circ\text{C}$). Відповідно до температурного рівня добирається матеріал футеровки та конструкції газоходів (рис. 7.17).

До вибору типу та конструкції футеровки для камери ВУ слід керуватися такими двома основними принципами:

1) принцип узгодженої стійкості (рівної чи кратної) окремих конструктивних частин робочої камери — поду, стін, склепіння; термін міжремонтного періоду для більш стійкої частини приймають кратним такому терміну відповідно для менш стійкої частини (наприклад, регенера-

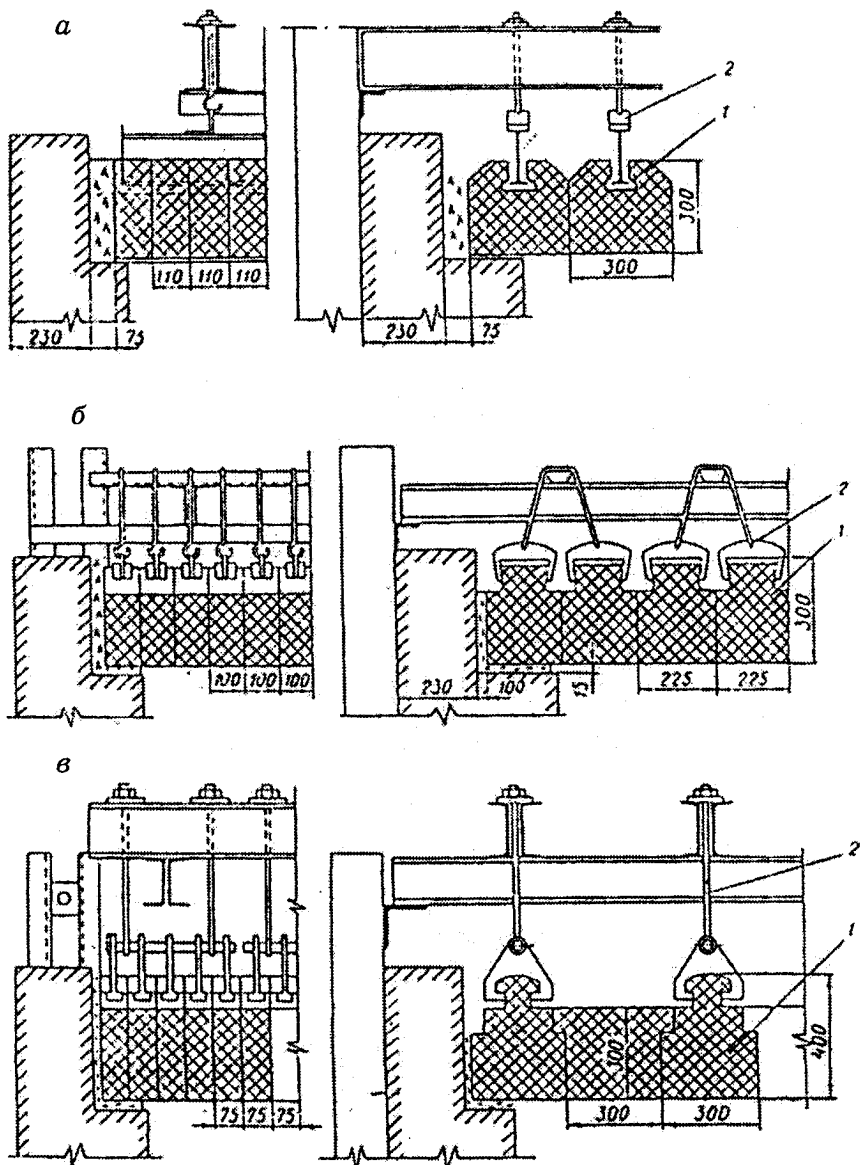


Рис. 7.16. Підвісні склепіння:

а — з секційним кріпленням цеглин;

б — з індивідуальною підвіскою; в — комбіновані; 1 — фасонна цегла;

2 — конструкція підвіски

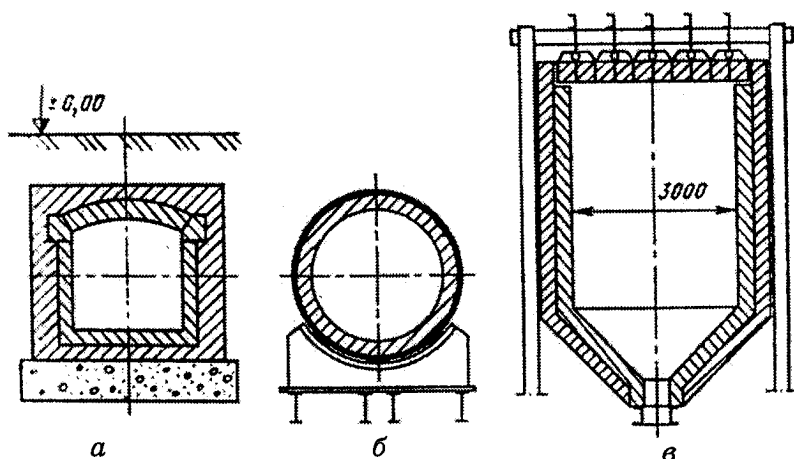


Рис.7.17. Приклади конструкцій газоходів високотемпературних установок:

а — газоход з лучковим склепінням, заглиблений нижче від рівня землі (боров); б — газоход круглого перерізу з обмуровкою всередині сталевій труби; в — газоход відбивної мідеплавильної печі, розташований над поверхнею землі на колонах

тори мартенівської печі між ремонтами витримують дві робочі кампанії для склепіння);

2) принцип забезпечення рівномірного зношування робочої поверхні кожної частини футеровки за рахунок добору більш стійких вогнетривів, їх товщини, примусового охолодження.

Дотримання цих принципів підвищує техніко-економічні показники ВУ.

7.5. Гарнітура, механізми та обладнання ВУ

Високотемпературні установки для забезпечення управління технологічним процесом облаштовуються різним обладнанням: для спалювання палива, переміщення продуктів згоряння палива, регулювання тяги, завантаження технологічних матеріалів та вивантаження технологічного продукту, приладами для контролю теплового режиму тощо.

7.5.1. Рами, заслінки, шибери та механізми для їх обслуговування. У стінах, склепіннях, а іноді і в подах ВУ

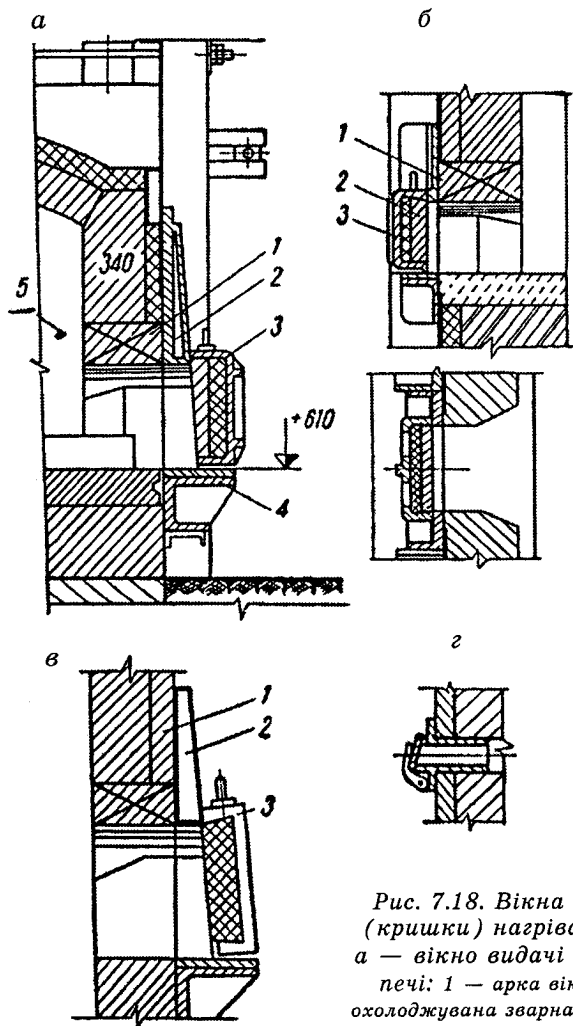


Рис. 7.18. Вікна та заслінки (кришки) нагрівальних печей:
 а — вікно видачі мартенівської печі; 1 — арка вікна; 2 — водоохолоджувана зварна верхня частина рами; 3 — лита футерована заслінка;

4 — нижня лита частина рами; 5 — робоча камера; б — робоче вікно малої камерної печі; 1 — арка вікна; 2 — лита чавунна рама; 3 — лита заслінка; в — робоче вікно великої камерної печі; 1 — арка печі; 2 — водоохолоджувана зварна рама; 3 — водоохолоджувана зварна футерована кришка; г — оглядове вікно печі

роблять отвори для завантаження та розвантаження матеріалу (робочі вікна), відведення газів, установлення пальників чи форсунок, термопар та інших приладів для нагляду за процесом горіння палива і нагрівання матеріалу (оглядові вікна чи вічка), випуску шлаків тощо. Кількість отворів та їхні розміри мають бути мінімальними.

Віконні отвори, як правило, зверху перекривають арками, а для упередження руйнування кладки — із зовнішнього боку обрамляють рамами, які кріпляться до каркаса ВУ. Рами виготовляють чавунними, іноді примусово охолоджують (рис.7.18).

Отвори вікон закривають заслінками чи дверцятами, які запобігають втратам теплоти випромінюванням та з газами, що виходять із камери, а також перешкоджають підсмоктуванню повітря в камеру ВУ.

Заслінку футерують легковагим шамотом та теплоізоляційною цеглою. Корпус заслінки виконують переважно литим — чавунним (чавун під час нагрівання та охолодження практично не деформується), іноді звареним з охолодженням, а для дуже великих заслінок (ширина вікна 1,5...2 м) — звареним із профільного прокату. З метою ущільнення рекомендується зовнішню поверхню рами, по якій ковзає заслінка, робити похилою в бік установки, а також застосовувати різні затискачі та затвори. В установках безоxygenного нагріву над заслінкою слід установлювати зонти з витяжкою, тому що в продуктах горіння може бути деяка кількість CO.

Для підймання та опускання заслонок застосовують ручні (важільні та ланцюгові), а також механізовані (пневматичні, гідравлічні та електричні) пристрої (рис.7.19).

Для підтримання необхідного тиску в робочій камері ВУ та регулювання відведення продуктів горіння в димоходах ставлять заслінки — шибери. Вони мають бути газоцільними, надійними та зручними в експлуатації. При низьких температурах газів (нижче як 600...700°C) застосовують шибери з чавуну чи жаростійкої сталі (рис.7.20). Іноді застосовують шибери у вигляді поворотних дросельних заслінок (рис.7.21). При температурі газів вище як

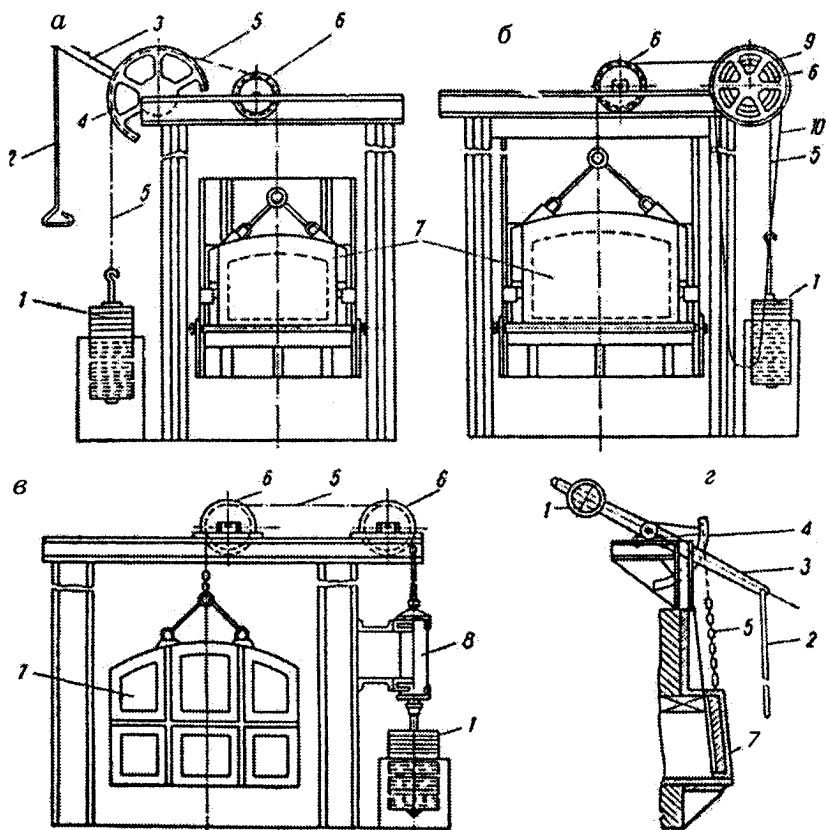


Рис. 7.19. Механізми піднімання заслонок:

- а — ручний важільний; б — ручний з нескінченним ланцюгом;
 в — з пневматичним чи гідравлічним циліндром; г — ручний секторний; 1 — противага; 2 — тяга підйомна; 3 — важіль;
 4 — напрямний сектор; 5 — ланцюг або трос; 6 — напрямні блоки;
 7 — заслінка; 8 — пневматичний циліндр; 9 — ланцюгове колесо;
 10 — нескінченний ланцюг

600...700°C шибери мають бути металеві водоохолоджувані (рис. 7.22).

Шибери крупних установок забезпечуються механізованим пристроєм для регулювання заданого тиску газів у робочій камері ВУ.

При використанні теплоти відхідних газів у регенерато-

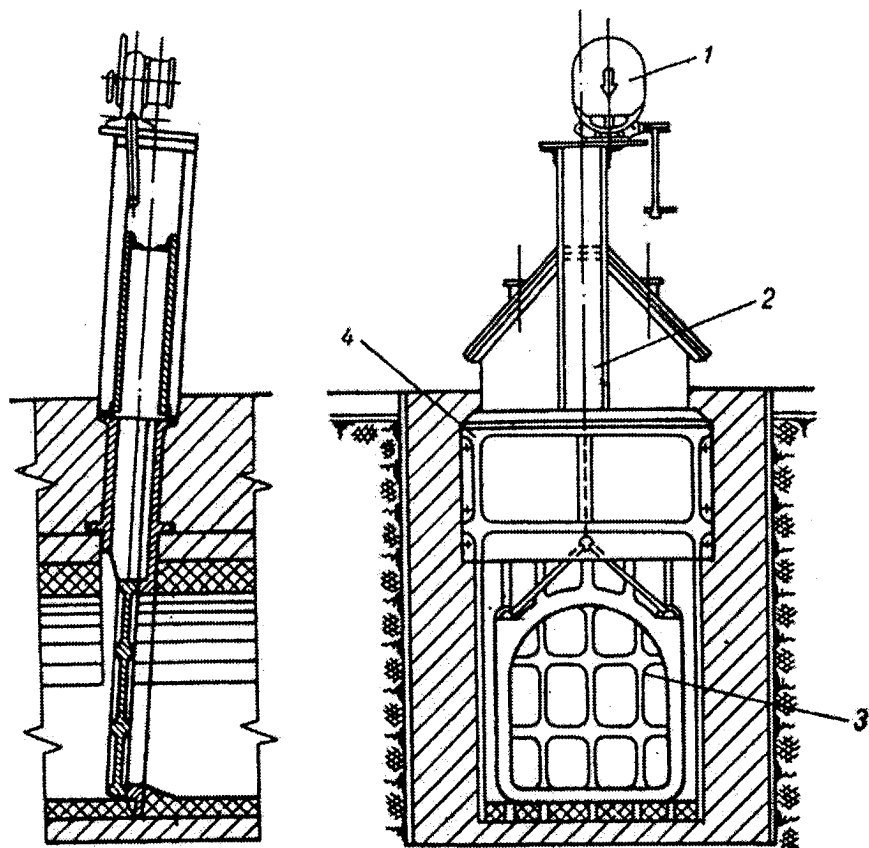


Рис. 7.20. Шибер металевий:

*1 — механізм піднімання шибера; 2 — короб; 3 — чавунний шибер;
4 — плита*

рах, високотемпературні установки слід обладнати спеціальними пристроями, які забезпечують проходження через регенеративну насадку періодично продуктів горіння та повітря (перекидні пристрої). Вони бувають шиберного чи клапанного типу.

7.5.2. Завантажувально-розвантажувальні та транспортні механізми. Для завантаження та переміщення матеріалів у різних ВУ найпоширенішими механізмами є

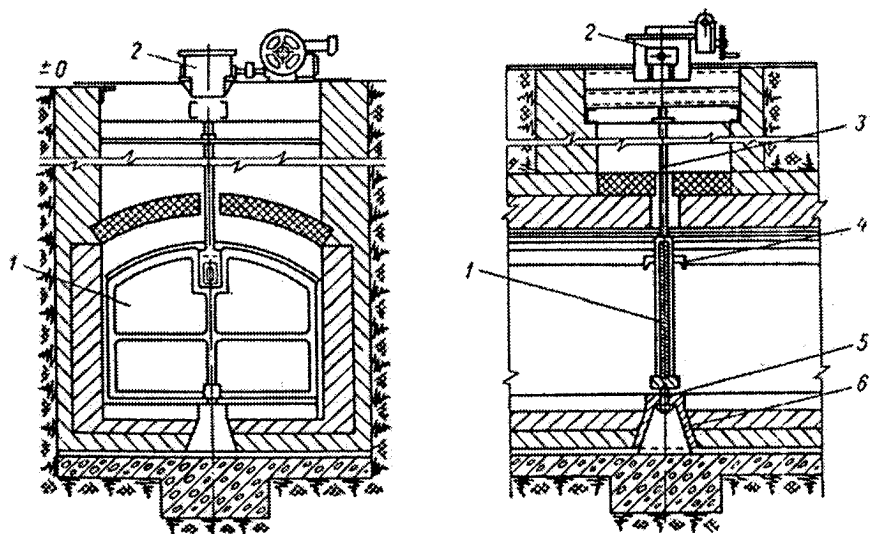


Рис.7.21. Шибер поворотний:

1 — шибер; 2 — механізм поворота шибера; 3 — тяга; 4 — штур; 5 — опора шибера; 6 — тумба

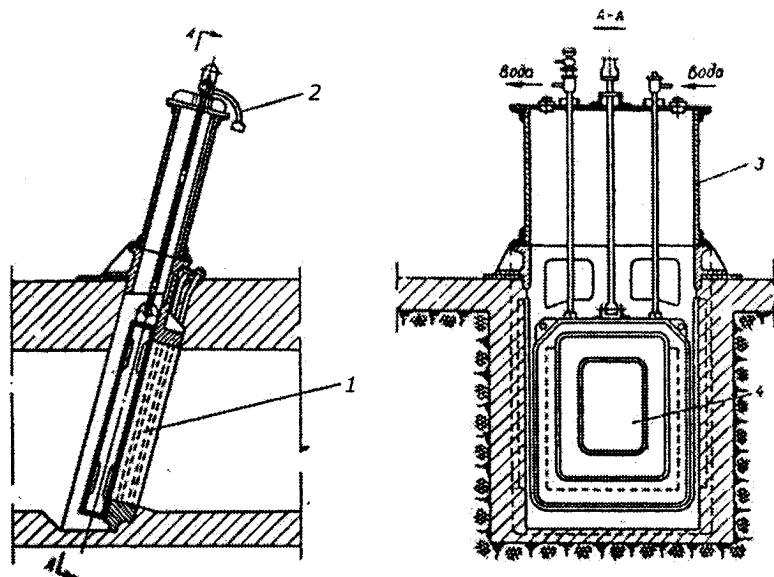


Рис.7.22. Шибер водоохолоджуваний:

1 — плита; 2 — труба для подачі холодної води; 3 — короб; 4 — шибер

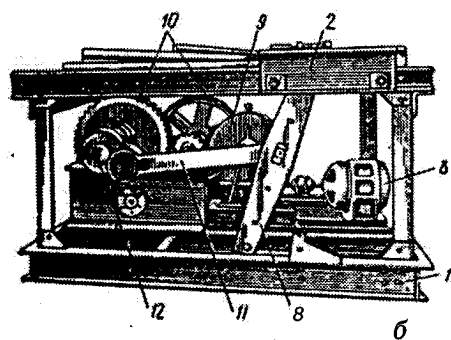
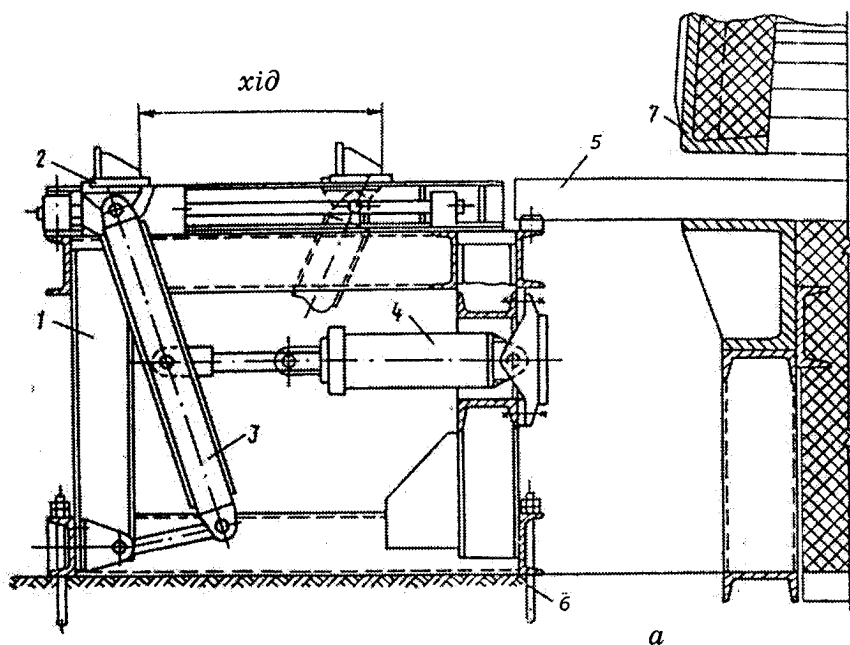


Рис. 7.23. Важільні штовхачі:

- a* — гідравлічний; *б* — електричний: 1 — рама; 2 — повзун;
 3 — важіль; 4 — гідравлічний циліндр; 5 — завантажувана заготовка;
 6 — фундаментні болти; 7 — заслінка; 8 — шатун; 9 — кривошип;
 10 — зубчасті колеса; 11 — редуктор; 12 — електродвигун

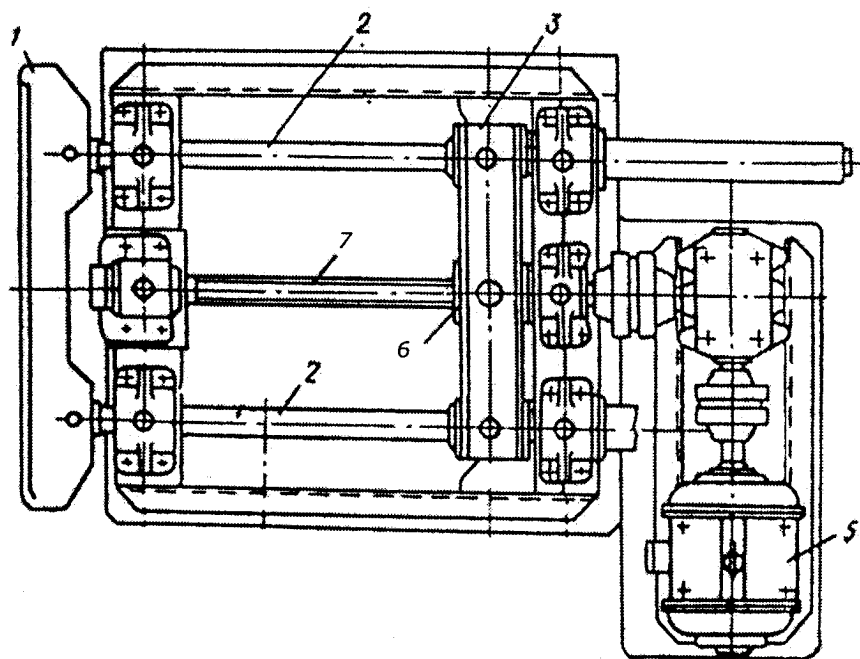
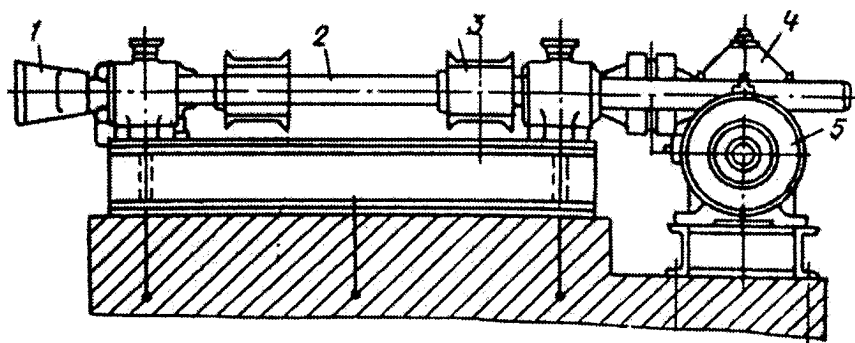
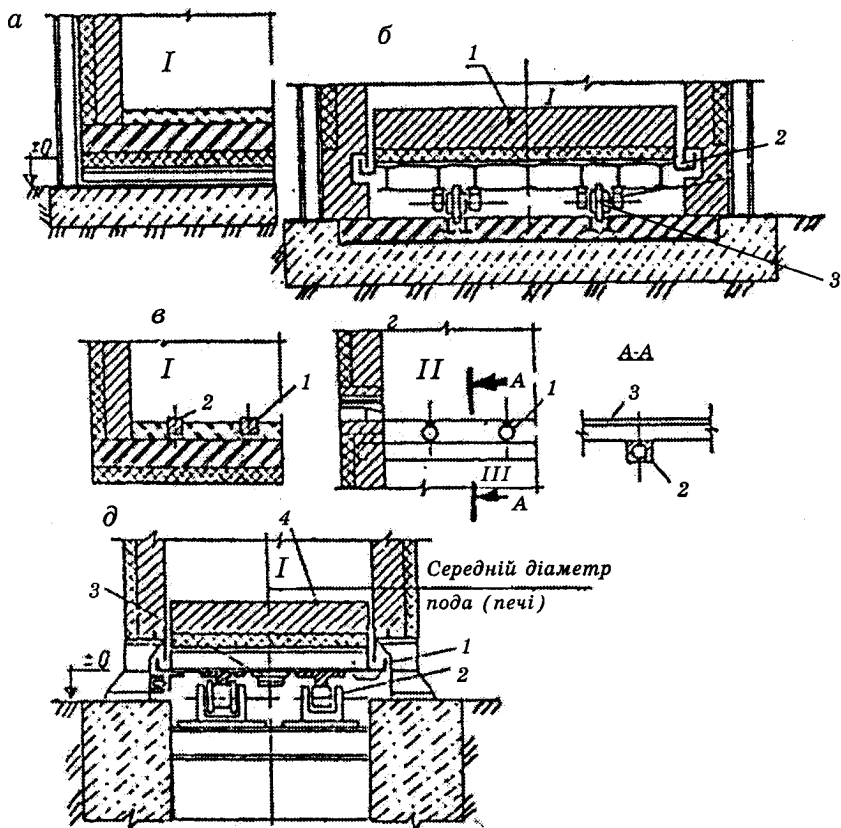


Рис.7.24. Гвинтовой штовхач:

*1 — траверса; 2 — шток; 3 — поперечина; 4 — редуктор;
5 — электродвигун; 6 — гайка; 7 — гвинт*



Умовні позначення

	Шамотна цегла класу «А»		Бетон, залізобетон
	Шамотна цегла класу «Б»		Метал
	Хромомагнетитова цегла		Діатомітова цегла

Рис.7.25. Поди нагрівальних печей: а — під стаціонарної камерної печі; б — висувний під: 1 — висувна подина; 2 — пісковий затвор; 3 — ролик; в — під методичної печі із сталевими глісажними шинами: 1 і 2 — сталеві неохолоджувані бруски; 2 — під методичної печі з двостороннім обігрівом: 1 — водоохолоджувана труба; 2 — опорний водоохолоджуваний квадрат; 3 — сталевий пруток, приварений до труби; д — кільцевий під карусельної печі: 1 — пісковий затвор; 2 — опорний ролик; 3 — кільцева шестерня; 4 — кільцева подина; I — робоча камера; II — верхня камера; III — нижня камера

штовхачі, які бувають важільні (гідравлічні та електричні), гвинтові та рейкові (електричні).

Важільні штовхачі складаються з рами, повзуна, який рухається по напрямних рамах і переміщує стіл із заготовкою, а також важелів та механізму приводу. Принцип роботи таких штовхачів зрозуміло з рис.7.23.

У гвинтових штовхачах (рис.7.24) траверса встановлена на штоках з поперечиною, в якій закріплено гайку, що надіта на гвинт. Гвинт приводиться в рух від електродвигуна через редуктор. При цьому гайка нагвинчується на гвинт і поперечина із закріпленими на ній штоками та траверсою рухається вперед чи назад, залежно від напрямку обертання гвинта.

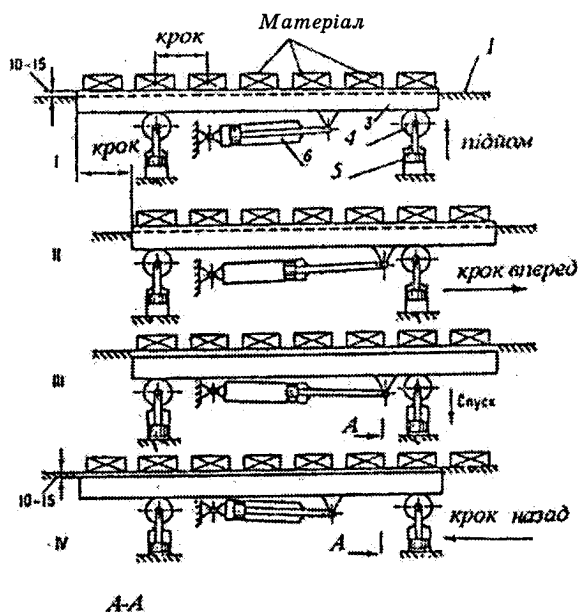


Рис.7.26. Крокуючий під:

- 1 — нерухома рама;
- 2 — напрямний ролик;
- 3 — рухома рама;
- 4 — каток;
- 5 — підйомник

Для зменшення зношування поду при пересуванні матеріалу, в підкладають металеві бруски, плити чи охолоджувані водою труби (глисажні шини) (рис. 7.25, в, г).

Переміщення матеріалу в нагрівальних установках здійснюється також за рахунок руху поду — висувного, обертального (рис.7.25, б, д), крокуючого (рис.7.26).

Контрольні запитання

1. Назвіть основні елементи, з яких складаються ВТУ. Їх призначення та коротка характеристика.
2. Дайте означення фундаменту та його основи. Класифікація фундаментів ВТУ.
3. Каркаси ВТУ. Їх призначення, конструктивні особливості каркасів за ознакою сприйняття ними зусиль від температурних розширень кладки.
4. Назвіть основні вимоги до огороджень ВТУ.
5. Назвіть основні переваги багатошарової кладки порівняно із одношаровою. Чим визначається якість кладки?
6. Як впливає примусове охолодження вогнетривкої кладки на умови її експлуатації?
7. Чисто гарнісажна футеровка та гарнісажна футеровка на вогнетривкій набивці. Їх характеристики та переваги перед багатошаровими вогнетривкими кладками.
8. Вимоги до облаштування подів та стін робочих камер ВТУ. Особливості їх конструкцій.
9. Особливості конструкцій різних типів склепінь робочих камер ВТУ.
10. Як теплові розширення арокних склепінь передаються на каркас ВТУ?
11. Особливості конструкцій розпірно-підвісних склепінь ВТУ. Сфера їх застосування.
12. Гарнітура ВТУ. Призначення та коротка характеристика окремих видів гарнітури. Матеріали, які використовуються для виготовлення гарнітури.
13. Наведіть приклади механізмів для обслуговування шиберів, заслінок та іншої гарнітури.
14. Дайте коротку характеристику завантажувально-розвантажувальних та транспортних механізмів ВТУ.

ТЕПЛООБМІН У ПАЛИВНИХ ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНИХ УСТАНОВКАХ

8.1. Організація теплопередачі в промислових паливних печах

8.1.1. Загальні положення. У промислових печах піддаються нагріванню різні матеріали (метали і неметали). Нагрівання здійснюється через поверхню виробів чи матеріалів, розміщених певним чином у робочому просторі. Вироби чи матеріали, що нагріваються, можуть бути нерухомими або поволі переміщатися.

Визначальним процесом у промислових печах є теплопередача в робочій камері, де відбуваються й інші процеси: газифікація та горіння палива, рух продуктів згорання, теплообмінні та масообмінні процеси, пов'язані з екзотермічними та ендотермічними реакціями. Всі ці процеси взаємопов'язані та взаємозалежні й дуже впливають на передачу теплоти на поверхню матеріалів чи виробів. Теплообмін значною мірою залежить від способу нагрівання, тобто від теплотехнічного принципу організації технологічного процесу (див. 5.1).

Найпоширеніші печі для нагріву відкритим (прямим) способом; менш поширені печі непрямого (опосередкованого) нагріву. Відкритий нагрів здійснюється просто — гази безпосередньо торкаються поверхні матеріалу чи виробів, що нагріваються. Такий нагрів є найбільш ефективним, ним легко керувати.

Печі прямого нагріву поділяються на такі: печі з великим вільним об'ємом робочого простору; шахтові; печі з киплячим шаром; циклонні та інші.

Наявність вільного об'єму дає змогу наблизити гарячий факел до матеріалу, що нагрівається; при цьому передача теплоти суттєво посилюється. Печі з великим об'ємом застосовуються для плавлення металу, нагрівання зливків перед прокатуванням чи ковкою. До класу печей з великим вільним об'ємом належать обертові барабанні печі, в яких використовується принцип пересипного шару. Кладка печі, обертаючись разом з барабаном, поперемінно торкається то нагрівальних газів, то матеріалу, що інтенсифікує передачу теплоти.

Шахові печі, в яких використовується теплотехнічний принцип щільного фільтруючого шару, мають свої особливості. Димові гази рухаються через вузькі канали в шихті, швидкість газів весь час змінюється, що турбулізує потік і сприяє збільшенню тепловіддачі конвекцією, але одночасно підвищує витрати енергії на переміщення газів через шар матеріалу.

У *печах із киплячим шаром* передача теплоти інтенсифікується внаслідок енергійного перемішування матеріалу по всьому об'єму печі та доброго обтікання матеріалу газами.

У *циклонних печах* ще більше інтенсифікується процес теплообміну внаслідок різкого збільшення площі контакту газів з матеріалом. Ці печі перспективніші за інші.

8.1.2. Зовнішній та внутрішній теплообмін. Складний процес теплообміну в печах умовно поділяють на дві складові частини: зовнішній та внутрішній теплообмін.

Зовнішній теплообмін — це процес передачі теплоти від полум'я в пічному просторі на зовнішню поверхню матеріалу чи виробів, що нагріваються.

У робочому просторі рухаються димові гази різного складу. Гази випромінюють теплоту внаслідок присутності в них трьохатомних газів (CO_2 , SO_2 та H_2O), а також частинок вуглецю, золи та пилу. Спектри випромінювання трьохатомних газів вирізняються великою вибірністю.

Двохатомні гази (O_2 , N_2 , CO) в практичних розрахунках вважаються теплопрозорими. Тверді тіла випромінюють енергію з поверхні, а гази всім об'ємом. Це пов'язано з тим, що молекули газу знаходяться одна від одної на значній відстані. Інтенсивність випромінювання теплоти, яка сприймається поверхнею матеріалу, що нагрівається, досить сильно залежить від ступеня чорноти газового факела ϵ_r :

$$\epsilon_r = f(T_r, p_i, s), \quad (8.1)$$

де T_r — температура газу, К; p_i — парціальний тиск; s — ефективна товщина шару газу. Ступінь чорноти газового факела ϵ_r визначають експериментальним шляхом.

Розрізняють безбарвне та світне полум'я. Світність полум'я визначається вмістом у ньому дисперсного сажистого вуглецю, що утворюється під час розкладання вуглеводневих сполук.

Для підвищення ступеня чорноти факела (полум'я) при необхідності вдаються до карбюрації чи самокарбюрації факела (див. 2.5.2).

Ступінь чорноти світного полум'я залежить від низки факторів: властивостей палива (вихід летких, вміст вуглеводнів C_mH_m та смол); підготовки палива до спалювання (підігрів та тонкість розпилювання мазуту, тонкість помелу твердого палива); способу змішування палива з повітрям (тобто від конструкцій форсунок чи пальників та їх режиму роботи); конструкцій топкового простору та режиму його роботи (тобто від ефективної товщини газового шару, температури, інтенсивності циркуляції газових потоків та інших умов).

Внутрішній теплообмін — це процес передачі теплоти теплопровідністю від зовнішньої поверхні в товщу матеріалу, що нагрівається за рахунок різниці температур поверхні та внутрішніх шарів матеріалу.

Внутрішній теплообмін залежить від: фізичних властивостей матеріалу, що нагрівається (коефіцієнта теплопровідності, коефіцієнта температуропровідності, щільності); співвідношення площі поверхні та маси матеріалу F/M ; способу укладки матеріалу на поду печі; тривалості нагрівання або швидкості нагрівання; умов тепловіддачі на поверхню матеріалу.

Через велику кількість факторів, що впливають на зовнішній та внутрішній теплообмін, та їх взаємозв'язки — розрахунки теплообміну в печах ускладнюються за рахунок відмінності процесів і часто ґрунтуються на значній кількості експериментальних даних.

Залежно від технологічних процесів, що здійснюються в печах, передача теплоти лімітується (обмежується) або зовнішнім, або внутрішнім теплообміном. У плавильних печах загальний теплообмін лімітується зовнішнім теплообміном, а в нагрівних печах — внутрішнім теплообміном.

8.1.3. Теплообмін у робочому просторі печі з великим об'ємом.

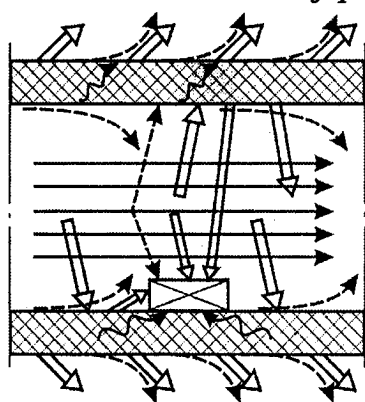


Рис. 8.1. Схема теплообміну в робочому просторі великого об'єму:

- випромінювання;
- конвекція;
- теплопровідність

В робочому просторі печі (рис. 8.1) проявляються, одночасно і в сукупності між собою, всі види теплообміну: випромінюванням, конвекцією та теплопровідністю.

Теплота від продуктів згоряння передається одночасно на внутрішню поверхню стін робочої камери та на поверхню матеріалу, що нагрівається за рахунок випромінювання та конвекції.

Внутрішня поверхня стін (кладки) частину теплоти, прийнятої від продуктів згоряння, відбиває; частину передає в навколишнє середовище (теплопровідністю через матеріал кладки і далі від стінки конвекцією та випромінюван-

ням); частину випромінює в робочий простір печі.

Теплота, яка відбивається та випромінюється внутрішніми поверхнями стін, частково сприймається поверхнею матеріалу, що нагрівається, частково поглинається продуктами згоряння.

Матеріал, який знаходиться в печі, отримує при цьому

теплоту: випромінюванням газоподібних продуктів згоряння (факела) — $Q_{г \rightarrow м}^p$; випромінюванням стін робочого простору через шар газоподібних продуктів згоряння — $Q_{кл \rightarrow м}^p$; конвекцією від продуктів згоряння — $Q_{г \rightarrow м}^к$.

Кількість теплоти, яку отримує матеріал у печі від газів та від кладки, визначають за формулою

$$Q_{г.кл \rightarrow м} = Q_{г \rightarrow м}^p + Q_{кл \rightarrow м}^p + Q_{г \rightarrow м}^к. \quad (8.2)$$

Склепіння, стінки та під печі відіграють роль вторинних випромінювачів, віддаючи теплоту матеріалу $Q_{кл \rightarrow м}^p$, яка в металургійних печах досягає 40...60 % від загальної кількості теплоти, що сприймається матеріалом у цілому — $Q_{г.кл \rightarrow м}$.

У нагрівальних та плавильних печах розрізняють такі режими зовнішнього теплообміну: радіаційний (випромінюванням), конвективний, складний теплообмін всередині шару шихти.

Якщо мова йде про радіаційний нагрів, то це означає лише те, що променевий теплообмін має переважне значення. Те саме можна сказати і про конвективний теплообмін.

Радіаційний нагрів, в свою чергу, ділиться на три види:

1) рівномірно розподілений теплообмін (коли температурне поле та випромінювальна здатність факела рівномірні по всьому об'єму печі), тобто $Q_{г \rightarrow м}^p = Q_{г \rightarrow кл}^p$;

2) спрямований прямий теплообмін, коли $Q_{г \rightarrow м}^p > Q_{г \rightarrow кл}^p$;

3) спрямований непрямий теплообмін, коли $Q_{г \rightarrow м}^p < Q_{г \rightarrow кл}^p$.

Потоки теплоти необхідно розглядати як суму променевого та конвективних складових.

Залежно від технологічного призначення високотемпературних установок у них по-різному реалізуються режими теплообміну. Так, у плавильних печах вигідніше використовувати радіаційний прямий спрямований теплообмін, коли світний факел буде настільним, тобто спрямованим на шихту. Такий режим теплообміну в цих умовах є найбільш ефективним.

У нагрівальних печах в зоні високих температур вигідним буде спрямований непрямий теплообмін. При цьому підвищується продуктивність печі, питома витрата палива знижується.

Детальніше про ці режими сказано далі.

8.1.4. Особливості руху газів у печах. Рух газів у печах тісно пов'язаний з технологічними процесами, які в них здійснюються, і, в кінцевому підсумку, визначає продуктивність та якість теплової обробки матеріалів.

Факел у печі — це потік гарячих газів, які рухаються через робочий простір. Велике значення має циркуляція газів, яка створюється струминами газів, та спрямованість руху газів, наприклад, настільність полум'я в плавильних печах. Рух газів у печах може регулюватись і є важелем керування процесами, що відбуваються в них.

За характером розподілу тиску газів промислові печі різко відрізняються від парових котлів. У робочій камері печі підтримується надлишковий тиск ($10 \dots 20 \text{ Н/м}^2$), що виключає підсмоктування повітря та окиснення металу при нагріванні. За межами робочої камери печі рух газів здійснюється за рахунок розрідження, яке створюється тяговим обладнанням (димовою трубою або димососом).

Аеродинаміка руху газів у пічному просторі має виняткове значення в здійсненні процесу сумішоутворення, утворення необхідної довжини та форми факела, а також створення заданого температурного режиму (див. 3.2.2).

На рис. 8.2 показана схема незатопленої струмини (факела) у відкритому повітряному просторі, де джерело кисню не обмежене.

Швидкість струмини газу, а також кратність циркуляції струмини $v_{\text{пер}}/v_0$ ($v_{\text{пер}}$ — об'єм газу в даному перерізі стру-

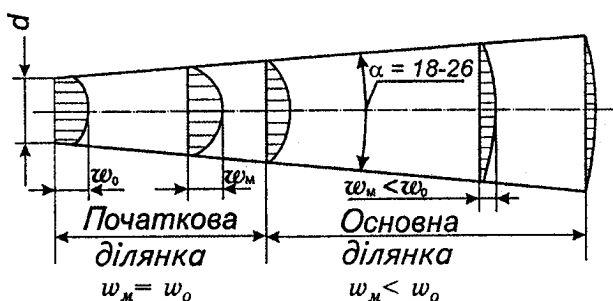


Рис. 8.2. Схема незатопленої струмини:

w_0 — швидкість газу початкова; w_m — швидкість газу на осі струмини, тобто максимальна швидкість

мини, v_0 — початковий об'єм газу) залежить від відстані перетину до сопла, що виражена через l/d . Початкова ділянка характеризується відношенням $l/d=4...6$. При зростанні значення l/d значення w зменшується, а кратність циркуляції $v_{\text{пер}}/v_0$ — збільшується.

Обмеження об'єму печі перешкоджає вільному притоку газів (повітря) до струмини і на поверхні струмини виникає розрідження (найбільше — у місці виходу струмини з форсунки чи пальника). Це створює внутрішню циркуляцію газів у робочій камері. Із збільшенням початкової швидкості струмини w_0 та l/d циркуляція зростає, а із збільшенням об'єму камери вона зменшується.

Чим вища кратність циркуляції, тим рівномірніша температура в печі, тим вища ефективність теплопередачі випромінюванням та конвекцією, тим легше керувати процесом теплообміну.

Середня температура в перерізі камерної А—А печі (рис. 8.3) визначається з рівняння теплового балансу змішування:

$$M_1 t_1 c_1 + M_2 t_2 c_2 = (M_1 + M_2) t_{\text{сум}} c_{\text{сум}}. \quad (8.3)$$

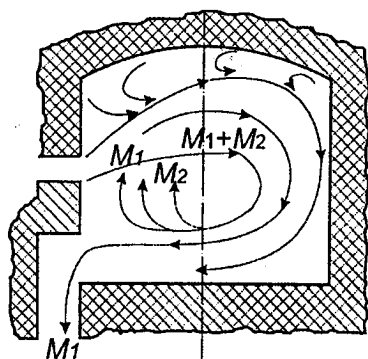


Рис. 8.3. Циркуляція газів в камерній печі

Прийнявши $c_1=c_2=c_{\text{сум}}$ та $t_2=t_{\text{т.г}}$, а також $i=M_1/M_2$ (кратність циркуляції), підставляємо вказані значення величин у рівняння (8.3) і визначаємо кратність циркуляції "i" для забезпечення необхідного температурного режиму в печі, тобто

$$i = \frac{t_{\text{сум}} - t_{\text{т.г}}}{t_1 - t_{\text{сум}}}. \quad (8.4)$$

Розрахунок руху газів у газоходах високотемпературних установок можна виконати, використовуючи рівняння Бернуллі. У задачу розрахунку входить визначення необхідного розрідження, що створюється димовою трубою чи димососом для забезпечення руху газів газоходами установки. Тиск на під печі при цьому (переріз

A—A, рис. 8.4) має бути нульовим чи близьким до нього - $0 \dots 5 \text{ Н/м}^2$.

Розглянемо видалення газів через димову трубу (рис. 8.4).

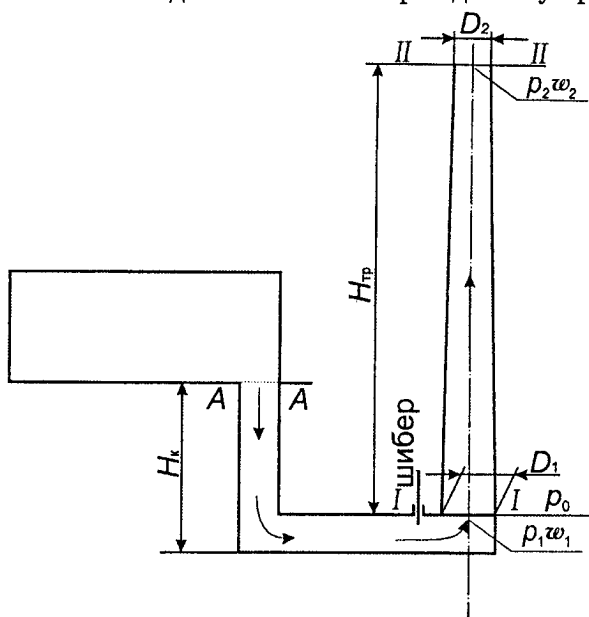


Рис. 8.4. Схема до розрахунку руху газів у печі

Розрідження, яке створюється димовою трубою в перерізі А—А, витрачається на подолання опору рухові газів на ділянці від перерізу А—А до перерізу І—І і визначається за формулою

$$\Delta p_1 = H_k(\rho_{\text{пов}} - \rho_r)g + h_{\text{тер}} + h_{\text{м}} + h_{\text{ш}}, \text{ Н/м}^2, \quad (8.5)$$

де $H_k(\rho_{\text{пов}} - \rho_r)g$ — втрати при низхідному русі газів у вертикальному каналі, Н/м^2 ; $h_{\text{тер}}$ — втрати на тертя в газоходах, Н/м^2 ; $h_{\text{м}}$ — місцеві втрати в газоходах (повороти, зміни перерізу газоходу та ін.), Н/м^2 ; $h_{\text{ш}}$ — втрати у вихідному шибері, Н/м^2 .

Змінюючи положення шибера (перетин для проходу газів), добиваються того, щоб встановився необхідний позитивний тиск на під печі.

Для визначення розрідження, що створюється димовою трубою, використовують рівняння Бернуллі. Розрахунок ведеться для ділянки між перерізом I—I при основі труби та перерізом II—II в її усті (рис. 8.4). Для вказаних умов рівняння Бернуллі має вигляд

$$p_1 + \frac{w_1^2}{2} \rho_r = p_2 + \frac{w_2^2}{2} \rho_r + H_{\text{тр}} \rho_r g + h_{\text{тер}}, \quad (8.6)$$

де p_1, p_2 — тиск газів при основі труби (переріз I—I) та в її усті (переріз II—II), Н/м²; w_1 та w_2 — швидкості руху газів в основі та усті труби, м/с; $\rho_{\text{пов}}$ та ρ_r — густина повітря та газів, кг/м³; $H_{\text{тр}}$ — висота димової труби, м; g — прискорення вільного падіння, м/с²; $h_{\text{тер}}$ — втрати напору на подолання тертя в трубі, Н/м².

Із рис. 8.4 маємо

$$p_2 = p_0 - H_{\text{тр}} \rho_{\text{пов}} g, \quad (8.7)$$

де p_0 — тиск атмосферного повітря на рівні перерізу I—I, Н/м².

Підставивши значення p_2 в рівняння (8.6) і провівши прості перегрупування членів цього рівняння, одержимо величину розрідження, яке створюється димовою трубою в її основі (переріз I—I):

$$\Delta p_1 = p_0 - p_1 = H_{\text{тр}} (\rho_{\text{пов}} - \rho_r) g - \frac{w_2^2 - w_1^2}{2} \rho_r - h_{\text{тер}}. \quad (8.8)$$

Щільність газів ρ_r необхідно брати при відповідній температурі T_r

$$\rho_r = \rho_r^0 \frac{273}{T_r^{\text{сер}}} \quad (\text{кг/м}^3), \quad (8.9)$$

де ρ_r^0 — щільність газу при $t_r^{\text{сер}} = 0^\circ\text{C}$ ($T_r = 273\text{K}$); $T_r^{\text{сер}}$ — середня температура газів на розрахунковій ділянці труби, К.

Для димової труби

$$T_r^{\text{сер}} = \frac{T'_r + (T'_r - C) H_{\text{тр}}}{2}, \quad (8.10)$$

де T'_r — температура газів у основі труби (переріз I—I), К;

C — зниження температури газів на 1 м висоти труби, для цегляних труб — $C = 1,5...2,5$ К/м, для металевих — $C = 3,0...4,0$ К/м.

Під час розрахунків значення $\rho_{\text{пов}}$ — необхідно брати для літнього періоду; w_1 — рекомендується приймати 2,5...4,0 м/с; D_1 — діаметр основи труби, приймається не менш, як 0,8 м і розраховується за w_1 ; діаметр устя труби визначають із співвідношення $D_1 = 1,5D_2$.

Висоту димової труби визначають з рівняння (8.8). Висоту труби збільшують на 15...25% порівняно з розрахунковою для створення запасу з тяги.

Втрати напору на тертя та місцеві опори визначають, використовуючи відомі методики.

У сучасних ВУ для створення необхідної тяги застосовують димососи, тому що при установці за робочою камерою підігрівника повітря та парогенератора на відхідних газах опір газового тракту суттєво зростає.

Вентилятори та димососи добирають за їхньою продуктивністю (V , м³/год) та напором (h , Па), який вони мають розвивати.

При температурі відхідних газів, що надходять у димову трубу, $t_r = 250^\circ\text{C}$ можна застосовувати штучну тягу непрямой дії. При цьому гази ежектуються вентиляторним чи компресорним повітрям, іноді паром.

8.1.5. Порядок розрахунку теплообміну. Аналізуючи будь-який вид теплообміну в робочій камері ВУ, необхідно розглянути такі проблеми:

- 1) характеристика теплопередачі, її розрахунок;
- 2) вибір палива та методу його спалювання для забезпечення такого виду теплообміну;
- 3) рух газів у робочій камері, що забезпечує найбільшу ефективність теплообміну;
- 4) галузі народного господарства, де використовують печі з даним видом теплообміну;
- 5) порядок розрахунку печі.

Контрольні запитання

1. Які фактори обмежують (лімітують) зовнішній чи внутрішній теплообмін у ВТУ? Яким чином на них можна впливати?

2. Які режими зовнішнього теплообміну можуть мати місце в плавильних та нагрівальних ВТУ?

3. Значення аеродинаміки руху пічних газів у робочій камері ВТУ для організації теплообміну.

4. Методика розрахунку висоти труби для створення необхідного напору, що витрачається на подолання опору руху газів у робочій камері та каналах ВТУ.

5. Методика розрахунку теплообміну для конкретних умов робочої камери ВТУ.

8.2. Рівномірно розподілений радіаційний теплообмін

Рівномірно розподілений режим радіаційного теплообміну (рис. 8.5) характеризується такими умовами:

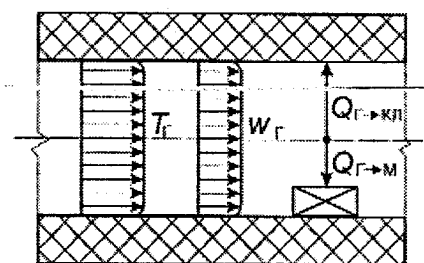


Рис. 8.5. Схема рівномірно розподіленого радіаційного теплообміну

1) рівномірне поле температур ($T_r = \text{const}$, $T_{\text{кл}} = \text{const}$, $T_m = \text{const}$);

2) оптичні константи полум'я постійні $\epsilon_v = \text{const}$;

3) симетричне розміщення випромінювачів, тобто $Q_{r \to \text{кл}}^p = Q_{r \to m}^p$.

8.2.1. Теплопередача. Для вказаних умов у замкнутому просторі печі вираз для сумарного радіаційного теплового потоку від факела (газу)

та кладки на матеріал, що нагрівається $Q_{r, \text{кл} \to m}^p$, можна привести до класичного закону Стефана—Больцмана

$$Q_{r, \text{кл} \to m}^p = C_0 \epsilon_v H_{\text{пр}} \xi \left[\left(\frac{T_r}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_m}{100} \right)^4 \right]_{\text{сер}} = C_v H_{\text{пр}} \xi \Delta_{\text{сер}}, \quad (8.11)$$

де C_0 — коефіцієнт випромінювання абсолютно чорного тіла, $C_0 = 5,67 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$; ϵ_v — видимий ступінь чорноти пічного (топкового) простору; $C_v = C_0 \epsilon_v$ — видимий коефіцієнт випромінювання топкового простору, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$; $H_{\text{пр}}$ — променесприймаюча поверхня нагріву виробів, що

нагріваються в печі, визначається із співвідношення $H_{\text{пр}} = \varphi F_{\text{м}} m^2$ ($F_{\text{м}}$ — поверхня виробів, що нагріваються, m^2 ; φ — середній кутовий коефіцієнт, або коефіцієнт опроміненості, віднесений до повної бічної поверхні виробів, що нагріваються); ξ — умовний коефіцієнт забруднення променесприймаючої поверхні технологічним виносом, окалиною тощо (практично $\xi=0,60\dots0,75$); $T_{\text{г}}$ — абсолютна температура газів (для електричних печей опору замість $T_{\text{г}}$ приймається температура випромінювача $T_{\text{в}}$), К; $T_{\text{м}}$ — абсолютна температура матеріалу, К; $\Delta_{\text{сер}}$ — усереднене значення різниці четвертих степенів абсолютних температур, K^4 .

Видимий ступінь чорноти топкового простору залежить від поля оптичних констант і поля кутових коефіцієнтів (геометричних характеристик системи):

$$\epsilon_{\text{в}} = f(\epsilon_{\text{г}}, \epsilon_{\text{м}}, \psi), \quad (8.12)$$

де $\epsilon_{\text{г}}$, $\epsilon_{\text{м}}$ — ступінь чорноти газів та матеріалу, що нагрівається; $\psi = H_{\text{пр}}/F_{\text{кл}}$ — середній кутовий коефіцієнт випромінювання поверхні кладки на поверхню матеріалу, що нагрівається; $F_{\text{кл}}$ — внутрішня поверхня кладки. Величина $\omega = F_{\text{кл}}/H_{\text{пр}}$, обернена ψ (тобто $\omega = 1/\psi$) і називається мірою розвитку обмуровки печі.

Значення $\epsilon_{\text{в}}$ розраховують за формулою, запропонованою В. Н. Тимофеевим:

$$\epsilon_{\text{в}} = \frac{\epsilon_{\text{м}} \epsilon_{\text{г}} \psi (1 - \epsilon_{\text{г}}) + 1}{\psi (1 - \epsilon_{\text{г}}) (\epsilon_{\text{м}} + \epsilon_{\text{г}} - \epsilon_{\text{м}} \epsilon_{\text{г}}) + \epsilon_{\text{г}}}. \quad (8.13)$$

Використовуються й інші формули для визначення $\epsilon_{\text{в}}$.

За реальних умов перша характеристика рівномірно розподіленого режиму радіаційного теплообміну ($T_{\text{г}} = \text{const}$ і $T_{\text{м}} = \text{const}$) на практиці не виконується. Температура газів у печі змінюється від найвищої (теоретичної) до температури технологічних газів на виході з печі $T_{\text{т.г}}$. У нагрівальній печі температура нагріву матеріалів також змінюється від початкової температури $T_{\text{м}}'$ до кінцевої $T_{\text{м}}$.

У нагрівальній печі змінюються температури і газів, і

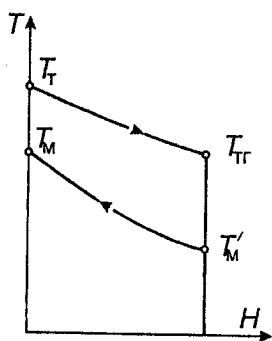


Рис. 8.6. Зміна температур у нагрівальній печі

матеріалу (рис. 8.6). Тому під час розрахунку теплообміну в нагрівальних печах температури усереднюють за квадратичним законом, тобто

$$\Delta_{\text{Icep}} = \left[\left(\frac{T_{\Gamma}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{\text{M}}}{100} \right)^4 \right] = \sqrt{\left[\left(\frac{T_{\Gamma}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{\text{M}}}{100} \right)^4 \right] \cdot \left[\left(\frac{T_{\Gamma.Г}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T'_{\text{M}}}{100} \right)^4 \right]} \quad (8.14)$$

Якщо ввести безрозмірні температури

$$\Theta_{\Gamma} = \frac{T_{\Gamma}}{T_{\tau}}; \quad \Theta_{\tau} = \frac{T_{\tau}}{T_{\tau}} = 1; \quad \Theta_{\text{M}} = \frac{T_{\text{M}}}{T_{\tau}}; \quad \Theta_{\Gamma.Г} = \frac{T_{\Gamma.Г}}{T_{\tau}}; \quad \Theta'_{\text{M}} = \frac{T'_{\text{M}}}{T_{\tau}}$$

і прийняти $\Theta'_{\text{M}} = 0$, то рівняння (8.14) можна записати у вигляді

$$\begin{aligned} \Delta_{\text{Icep}} &= \left[\left(\frac{T_{\tau}}{100} \right)^4 \cdot \left(\frac{100}{T_{\tau}} \right)^4 \right] \cdot \left[\left(\frac{T_{\Gamma}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{\text{M}}}{100} \right)^4 \right] = \left(\frac{T_{\tau}}{100} \right)^4 \left[\left(\frac{T_{\Gamma}}{100} \right)^4 \left(\frac{100}{T_{\tau}} \right)^4 - \right. \\ &\quad \left. - \left(\frac{T_{\text{M}}}{100} \right)^4 \left(\frac{100}{T_{\tau}} \right)^4 \right] = \left(\frac{T_{\tau}}{100} \right)^4 [\Theta_{\Gamma}^4 - \Theta_{\text{M}}^4]_{\text{Icep}} = \left(\frac{T_{\tau}}{100} \right)^4 \sqrt{(1 - \Theta_{\text{M}}^4) \cdot (\Theta_{\Gamma}^4 - 0)} = \\ &= \left(\frac{T_{\tau}}{100} \right)^4 \cdot \Theta_{\Gamma}^2 \sqrt{1 - \Theta_{\text{M}}^4} \\ \Delta_{\text{Icep}} &= \left(\frac{T_{\tau}}{100} \right)^4 \cdot \Delta'_{\text{Icep}} \quad (8.15) \end{aligned}$$

$$\text{де} \quad \Delta'_{\text{Icep}} = (\Theta_{\Gamma}^4 - \Theta_{\text{M}}^4) = \Theta_{\Gamma.Г}^4 \sqrt{1 - \Theta_{\text{M}}^4} \quad (8.16)$$

При розрахунку теплообміну в плавильних печах змінюється тільки T_{Γ} , а $T_{\text{M}} = \text{const}$ (рис. 8.7), тоді усереднення проводять за формулою

$$\left(\frac{T_{\Gamma}}{100} \right)^4 = n \left(\frac{T_{\tau}}{100} \right)^2 \cdot \left(\frac{T_{\Gamma.Г}}{100} \right)^2 \quad (8.17)$$

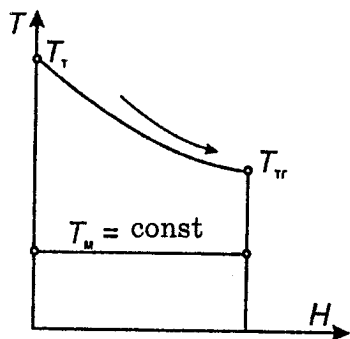


Рис. 8.7. Зміна температур у плавильній печі

або $\Theta_r^4 = n \cdot 1 \cdot \Theta_{T,r}^2$,
де $n \approx 0,744$ — коефіцієнт, що враховує об'ємне тепловідлення факела.

Тоді

$$\Delta'_{2\text{сер}} = (\Theta_r^4 - \Theta_m^4) = n \Theta_{T,r}^2 - \Theta_m^4. \quad (8.18)$$

Узагальнена розрахункова формула (8.11) набуває вигляду

$$Q_{r,kl \rightarrow m}^p = C_v H_{\text{пр}} \xi \left(\frac{T_r}{100} \right)^4 \Delta'_{\text{сер}}, \quad (8.19)$$

де $\Delta'_{\text{сер}} = \Delta'_{1\text{сер}} = \Theta_{T,r}^2 \sqrt{1 - \Theta_m^4}$ — для нагрівальних печей;

$\Delta'_{\text{сер}} = \Delta'_{2\text{сер}} = n \Theta_{T,r}^2 - \Theta_m^4$ — для плавильних печей.

У формулі (8.19) враховується тепловіддача лише випромінюванням, що є основним для високотемпературних установок.

Конвективна тепловіддача визначається з формули

$$Q_{r \rightarrow m}^k = \alpha_k F_m (t_r - t_m). \quad (8.20)$$

Повна кількість теплоти, що передається на поверхню матеріалу в печі, визначається за формулою

$$Q_{r,kl \rightarrow m} = Q_{r,kl \rightarrow m}^p + Q_{r \rightarrow m}^k = C_v H_{\text{пр}} \xi \beta_{\text{конв}} \left(\frac{T_r}{100} \right)^4 \Delta'_{\text{сер}}, \quad (8.21)$$

де $\beta_{\text{конв}}$ — коефіцієнт, що враховує частку конвективної частини теплоти, який передається на поверхню матеріалу, що нагрівається.

При розрахунках теплообміну в печах часто користуються поняттям температури печі ($T_{\text{п}}$). Вона визначає температуру одного випромінюючого джерела, який замінює всі фактично існуючі в печі випромінюючі джерела (факел, кладка та ін.) при умові передачі однієї і тієї самої кількості теплоти. За цієї умови

$$T_r > T_{\text{п}} > T_{\text{кл}}.$$

Ці температури зв'язані між собою співвідношенням

$$\left(\frac{T_{\text{п}}}{100}\right)^4 \approx \varepsilon_{\text{г}} \left(\frac{T_{\text{г}}}{100}\right)^4 + (1 - \varepsilon_{\text{г}}) \left(\frac{T_{\text{кл}}}{100}\right)^4. \quad (8.22)$$

Використання поняття $T_{\text{п}}$ спрощують приблизні розрахунки теплообміну, тому що простіше визначити $T_{\text{п}}$ ніж $T_{\text{г}}$ та $T_{\text{кл}}$, використовуючи співвідношення

$$C_{\text{зв}} \underbrace{\left[\left(\frac{T_{\text{п}}}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_{\text{м}}}{100}\right)^4 \right]}_{\Delta_{\text{п}}} = C_{\text{в}} \underbrace{\left[\left(\frac{T_{\text{г}}}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_{\text{м}}}{100}\right)^4 \right]}_{\Delta_{\text{г}}} \quad (8.23)$$

або $C_{\text{зв}} \Delta_{\text{п}} = C_{\text{в}} \Delta_{\text{г}}, \quad (8.24)$

де $C_{\text{зв}}$ — зведений коефіцієнт випромінювання. На практиці приймають $C_{\text{зв}} = 3 \dots 4$. Точніше $C_{\text{зв}}$ визначається із співвідношення

$$C_{\text{зв}} = C_{\text{в}} \frac{\Delta_{\text{г}}}{\Delta_{\text{п}}}. \quad (8.25)$$

Для реальних умов з геометричними розмірами робочого простору зв'язані товщина — полум'я s та міра розвитку кладки $F_{\text{кл}}/F_{\text{м}} = \omega$.

З основного рівняння

$$Q_{\text{п} \rightarrow \text{кл.м}}^{\text{р}} = f(\varepsilon_{\text{п}} T_{\text{п}}^4), \quad (8.26)$$

впливає, що з точки зору інтенсифікації теплообміну в умовах рівномірно розподіленого радіаційного режиму головними факторами є температура печі чи полум'я $T_{\text{п}}$ та ступінь чорноти полум'я $\varepsilon_{\text{п}}$, причому вплив $T_{\text{п}}$ більший.

Як видно з рис. 8.8, у межах низьких значень ступеня чорноти полум'я збільшення $\varepsilon_{\text{п}}$ впливає сильніше на теплообмін, ніж у діапазоні високих значень $\varepsilon_{\text{п}}$. Наприклад, для падаючого потоку $Q_{\text{п} \rightarrow \text{кл.м}} = 600 \text{ МДж}/(\text{м}^2 \cdot \text{год})$ збільшення $\varepsilon_{\text{п}}$ з 0,2 до 0,4 дає змогу знизити $T_{\text{п}}$ на $\Delta t' \cong 320^\circ\text{C}$, тоді як при збільшенні $\varepsilon_{\text{п}}$ від 0,8 до 1,0 це зниження становитиме всього $\Delta t'' \cong 75^\circ\text{C}$.

Таким чином, для інтенсифікації теплообміну в печі з рівномірною температурою в робочому просторі необхідно прагнути до підвищення температур полум'я $T_{\text{п}}$, поверхні

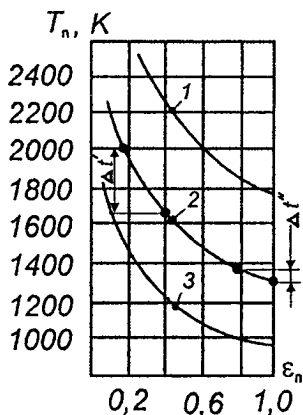


Рис. 8.8. Залежність

$T_n = f(\epsilon_n)$ при $Q_n = \text{const}$:

- 1 — $Q_n = 2100 \text{ МДж} / (\text{м}^2 \cdot \text{год})$
 2 — $Q_n = 600 \text{ МДж} / (\text{м}^2 \cdot \text{год})$
 3 — $Q_n = 160 \text{ МДж} / (\text{м}^2 \cdot \text{год})$

згоряння в інтервалі температур $T_T - T_{T,r}$, $\text{кДж}/(\text{м}^3 \cdot \text{К})$,

$$\bar{c}_r = \frac{c_r t_T - c_{T,r} t_{T,r}}{t_T - t_{T,r}} ; \quad (8.28)$$

η_k — ККД камери згоряння.

Рівняння (8.27) запишемо в такому вигляді:

$$\frac{B v_r \bar{c}_r \eta_k (T_T^4 - T_M^4) \cdot 10^{-8}}{C_0 \epsilon_B H_{\text{пр}} \xi} = \frac{\left[\left(\frac{T_r}{T_T} \right)^4 - \left(\frac{T_M}{T_T} \right)^4 \right]_{\text{сер}} T_T^4 \cdot 10^{-8}}{\left(\frac{T_T}{T_T} - \frac{T_{r,T}}{T_T} \right) T_T} = \frac{(\Theta_r^4 - \Theta_M^4)_{\text{сер}} T_T^3 \cdot 10^{-8}}{(1 - \Theta_{T,r})} \quad (8.29)$$

$$\text{або} \quad \frac{B v_r \bar{c}_r \eta_k}{10 \cdot C_0 H_{\text{пр}} \left(\frac{T_T}{1000} \right)^3} = \frac{(\Theta_r^4 - \Theta_M^4)_{\text{сер}}}{(1 - \Theta_{T,r})} \epsilon_B \xi . \quad (8.30)$$

Ліва частина рівняння (8.30) являє собою топковий критерій (критерій Больцмана, Bo):

кладки $T_{\text{кл}}$ та ступеня чорноти полум'я $\epsilon_{\text{п}}$.

Для критеріального розрахунку зовнішнього теплообміну в робочих камерах високотемпературних печей на основі рівняння (8.11) складемо рівняння теплового балансу

$$C_0 \epsilon_B H_{\text{пр}} \xi \left[\left(\frac{T_r}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_M}{100} \right)^4 \right]_{\text{сер}} = B v_r \bar{c}_r (T_T - T_{T,r}) \eta_k, \quad (8.27)$$

де B — витрата палива, $\text{кг}/\text{с}$; v_r — об'єм продуктів згоряння на одиницю палива, $\text{м}^3/\text{кг}$; \bar{c}_r — середня об'ємна теплоємність продуктів згоряння

$$B_0 = \frac{Bv_{\Gamma} \bar{c}_{\Gamma} \eta_{\kappa}}{10 \cdot C_0 H_{\text{пр}} \left(\frac{T_{\Gamma}}{1000} \right)^3}. \quad (8.31)$$

Прийнявши квадратичний закон усереднення температури за формулою (8.16), маємо

$$(\Theta_{\Gamma}^4 - \Theta_{\text{М}}^4)_{\text{сеп}} = \Theta_{\text{Т.Г}}^2 \sqrt{1 - \Theta_{\text{М}}^4} = m \Theta_{\text{Т.Г}}^2,$$

де $m = \sqrt{1 - \Theta_{\text{М}}^4}$.

Тепер рівняння (8.30) можна записати у вигляді

$$B_0 = \frac{m \Theta_{\text{Т.Г}}^2}{1 - \Theta_{\text{Т.Г}}} \varepsilon_{\text{в}} \xi, \quad (8.32)$$

звідки

$$\left(\frac{m}{B_0} \varepsilon_{\text{в}} \xi \right) \Theta_{\text{Т.Г}}^2 + \Theta_{\text{Т.Г}} - 1 = 0. \quad (8.33)$$

Рівняння (8.33) є квадратним рівнянням типу

$$ax^2 + bx + c = 0,$$

де $a = \frac{m}{B_0} \varepsilon_{\text{в}} \xi$; $b = 1$; $c = -1$; $x = \Theta_{\text{Т.Г}}$.

Визначивши витрату палива з теплового балансу робочої камери печі та користуючись наведеною методикою, можна визначити температуру відхідних газів (спочатку $\Theta_{\text{Т.Г}}$, а потім і $T_{\text{Т.Г}}$) чи $H_{\text{пр}}$.

8.2.2. Вибір палива та методу його спалювання. Рівномірно розподілений теплообмін легше здійснити в паливних печах, тому що в них джерела випромінювання теплої можуть бути рівномірно розподілені в робочому просторі. В електричних печах опору досягти цього важко.

Найважливішим критерієм для добору палива є його здатність давати полум'я тієї чи іншої світності. Чим вище світність полум'я, тим нижчою може бути його температура для забезпечення заданої інтенсивності тепловіддачі, або при $T_{\text{п}} = \text{const}$ збільшення $\varepsilon_{\text{п}}$ викликає зростання інтенсивності тепловіддачі радіацією.

Найширше використовуються: рідке паливо (мазут, смоли), природний газ, а також тверде паливо в пилоподібному стані.

Усі види рідкого палива забезпечують високу природну світність факела, а значить і високу ефективність теплообміну. При спалюванні рідкого палива є небезпека утворення в полум'ї частиночок нафтового коксу, що може свідчити про відчутний хімічний недопал. Найдоцільніше в цих умовах використовувати форсунки низького тиску, які забезпечують добре розпилювання та високу світність полум'я за рахунок виділення сажистого вуглецю. Спалювання газоподібного палива має бути організоване таким чином, щоб сприяти природній карбюрації полум'я або її самокарбюрації та водночас одержати максимальну температуру згоряння. Природній карбюрації полум'я сприяє попередній нагрів газу та повітря, а попереднє змішування газу та повітря, навпаки, гальмує цей процес. Максимальну світність можна одержати при мінімальному значенні коефіцієнта витрати повітря. Процес перемішування газу та повітря має здійснюватись за межами пальника в робочому просторі і досить швидко, щоб забезпечити спалювання палива в малому об'ємі. За цих умов вуглеводні швидко нагріваються до $t > 1000^{\circ}\text{C}$ і частково розкладаються з виділенням сажистого вуглецю, який поступово згоряє в об'ємі печі, підвищуючи світність полум'я. Попередній нагрів газу практично може здійснюватись у регенеративних печах типу мартенівських та скловарних. Тому в окремих установках підведення газу в робочу камеру здійснюється так, щоб певна його частина явно недостатньо змішувалася з повітрям і тому нагрівалась би до $1000 \dots 1100^{\circ}\text{C}$, не запалюючись. Це супроводжується виділенням сажистого вуглецю.

Пилоподібне паливо, також як і рідке, може бути досить ефективним, тому що дає сильне світне полум'я. Антрацити та пісне вугілля менше підходять для цих умов теплообміну.

8.2.3. Рух газів у печі. Рух газів (механіка газів) є засобом керування процесами горіння і теплообміну в паливних печах. У робочому просторі печі рух газів визначається динамічною характеристикою пальників чи форсунок та їх розміщенням у печі.

Для забезпечення рівномірної (по об'єму) температури необхідне інтенсивне перемішування газів у робочому просторі та створення умов, за яких окремі факели від пальників якнайскоріше втрачали б свою індивідуальність, об'єднуючись у загальну масу полум'я, яке заповнює всю робочу камеру.

Для цього необхідно, щоб паливо подавалося через велику кількість малих за потужністю пальників, рівномірно розміщених на стінах робочої камери. Маленькі факели начебто барботують полум'я, що заповнює робочий простір, тому допалювання сажистого вуглецю та частини газу здійснюється по всьому об'єму камери, забезпечуючи рівномірну температуру та світність полум'я. Враховуючи, що в нижню частину робочого простору завжди легше проникає холодне повітря, треба нижні пальники розміщувати частіше або робити їх потужнішими.

Форма факела (рис. 8.9) має велике значення. Порівняно із замкнутим, розімкнутий факел для даного режиму теплообміну кращий, тому що підсмоктування продуктів згоряння здійснюється як по зовнішній, так і по внутрішній поверхні факела. Такий факел швидше втрачає свою індивідуальність і розчиняється в масі полум'я.

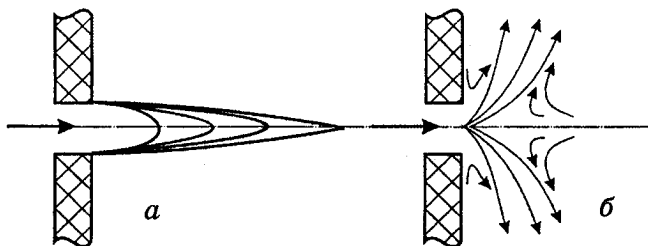


Рис. 8.9. Схематичне зображення замкнутого (а) та розімкнутого (б) факелів

Характер руху газів залежить від розміщення отворів для відведення продуктів згоряння з робочої камери (рис. 8.10). Для даного виду теплообміну найбільш сприятливими видами руху газів у робочому просторі є рециркуляційний та змішаний.

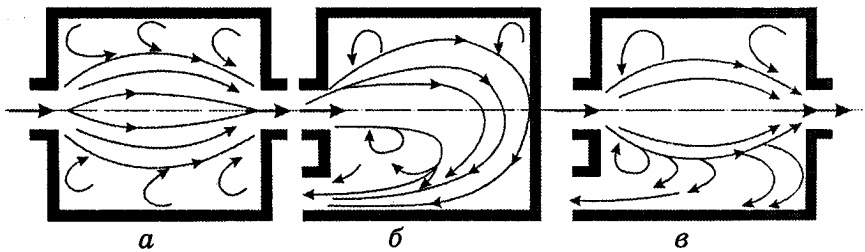


Рис. 8.10. Види руху газів у робочому просторі печі:
 а — прямиоточний; б — рециркуляційний; в — змішаний

Іноді (при $t \leq 1000^\circ\text{C}$) вдаються до штучно створеної рециркуляції зовнішнього типу. Регулювати температуру газів певною мірою можна, змінюючи положення пальників (напрямок факелів).

8.2.4. Сфера застосування та принципи розрахунку. Рівномірно розподілений радіаційний теплообмін є найдоцільнішим при нагріванні масивних виробів, тому що швидкість їх нагріву визначається умовами внутрішньої задачі, тобто факторами, які сприяють теплообміну всередині тіла, що нагрівається. Найбільший ефект від нагрівання тіла досягається за умови рівномірного опромінювання їх поверхні з боку полум'я та кладки. Від кладки рівномірне опромінювання одержати практично неможливо, тому розв'язати таку задачу можна двома способами:

- 1) зменшуючи в загальній тепловіддачі частку випромінювання кладки за рахунок частки випромінювання полум'я (збільшуючи ступінь чорноти полум'я);
- 2) інтенсифікуючи випромінювання з боку полум'я з метою збільшення сумарного випромінювання

$$\Sigma\alpha_p = \alpha_p^{kl} + \alpha_p^n . \quad (8.34)$$

Практично це досягається збільшенням товщини шару полум'я в тих місцях поверхні нагріву, де опромінювання з боку кладки менше. Таке вирівнювання досягається тим легше, чим вищий ступінь чорноти полум'я.

Наведені вище положення ілюструються умовами теплообміну в нагрівних колодязях для зливків.

Рівномірно розподілений теплообмін характерний також для таких печей, як обертові трубчасті для випалювання сипучих матеріалів, багатьох типів печей для випалювання цегли (камерні, кільцеві, тунельні) та інших установок, коли масивні вироби, що нагріваються, розміщуються в камері так, що є поверхні малодоступні для сприйняття випромінювання від кладки.

Порядок розрахунку печі:

1. Попередньо вибирається режим зміни температури поверхні матеріалу та його центру в процесі нагрівання і тим самим визначається час нагріву матеріалу чи виробів τ .
2. Весь процес нагрівання розбивається на низку інтервалів (зон), для кожного з яких визначають величину теплоглини матеріалу Q_m .
3. Для кожного інтервалу усереднюється T_m .
4. За величиною Q_m та $T_m^{сер}$ знаходять T_n та ϵ_n , які забезпечують нагрів за обраним графіком температур.
5. Знаючи T_n та ϵ_n , добирають паливо та параметри процесу його спалювання.

Контрольні запитання

1. Дайте коротку характеристику рівномірно розподіленого режиму радіаційного теплообміну в робочих камерах ВТУ. Для яких технологічних процесів він найдоцільніший? Як його створити?
2. Наведіть формулу для визначення сумарного радіаційного теплового потоку від газів факела та кладки на матеріал, що нагрівається в робочій камері ВТУ.
3. Викладіть методику визначення усередненого значення різниці четвертих степенів абсолютних температур нагрівальних газів та поверхні матеріалу

$$\left[\left(\frac{T_g}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_m}{100} \right)^4 \right]_{сер}$$

для нагрівальної установки.

4. Викладіть методику визначення усередненого значення різниці четвертих степенів абсолютних температур нагрівальних

газів та поверхні матеріалу $\left[\left(\frac{T_r}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_m}{100} \right)^4 \right]_{\text{ср}}$

для плавильної печі.

5. Поясніть поняття температури печі $T_{\text{п}}$. Для якої мети використовується $T_{\text{п}}$?

6. Наведіть методику розрахунку рівномірно розподіленого режиму радіаційного теплообміну з використанням критеріального рівняння.

7. Вибір палива та методу його спалювання для організації рівномірно розподіленого режиму радіаційного теплообміну.

8. Організація руху продуктів згоряння в робочому просторі печі, що забезпечує створення відносно рівномірної температури газів у камері печі.

9. Наведіть приклади використання рівномірно розподіленого режиму теплообміну в промислових ВТУ. Порядок розрахунку такого режиму теплообміну.

8.3. Спрямований прямий радіаційний теплообмін

8.3.1. Теплопередача. Цей вид теплообміну має місце при нерівномірних полях температур та фізичних властивостей полум'я, коли область максимальних температур полум'я розміщується ближче до поверхні матеріалу, що нагрівається (рис. 8.11), і характеризується співвідношенням

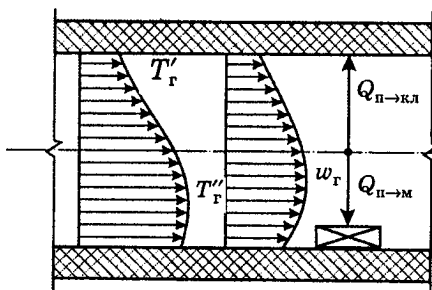


Рис. 8.11. Схема направленої прямої радіаційної теплообміну

$$Q_{\text{п} \rightarrow \text{кл}} < Q_{\text{п} \rightarrow \text{м}}$$

При цьому шари полум'я з нижчою температурою частково затримують випромінювання гарячіших шарів і таким чином екранують кладку печі та поверхню матеріалу. Отже, для одержання найефективнішого прямої спрямованого теплообміну не-

обхідно, щоб максимум температури полум'я розміщався ближче до поверхні матеріалу, що нагрівається і був по можливості найбільшим. На величину теплоти, що передається на матеріал, найбільш впливає світність тих шарів полум'я, які мають максимальну температуру.

Аналіз умов теплообміну в даному разі досить складний і потребує, щоб були задані форма факела та інші його характеристики, які в свою чергу залежать від багатьох факторів, що впливають на теплообмін. Тому вдаються до таких спрощених схем аналізу теплообміну.

А. Випромінювання плоского шару газів. М. О. Глінков розглядає факел як систему, що складається з кількох шарів і кожен з них має одну і ту саму променепрозорість, але різні температури.

Для характеристики спрямованого випромінювання необмеженого плоского шару напівпрозорого середовища А. В. Кавадеров використав коефіцієнт ефективності спрямованого випромінювання

$$\Psi = \frac{Q_{п \rightarrow м}}{Q_{п \rightarrow м}^0}, \quad (8.35)$$

де $Q_{п \rightarrow м}$ — інтенсивність спрямованого випромінювання неоднорідного і неізотермічного полум'я на матеріал, що нагрівається; $Q_{п \rightarrow м}^0$ — інтенсивність випромінювання однорідного ізотермічного полум'я на матеріал, що нагрівається, при максимальній температурі полум'я $T_{п}$ (під $T_{п}$ розуміють максимальну температуру шару неоднорідного полум'я, тепловіддача якого порівнюється з однорідним полум'ям при температурі $T_{п}$).

Для характеристики неоднорідного температурного поля досліджуваного полум'я в розрахунках вводиться відношення $\Delta T/T_{п}$, де ΔT — максимальна різниця температур в шарі неоднорідного полум'я.

Для інтенсифікації спрямованого прямого радіаційного теплообміну велике значення має оптична щільність полум'я, під якою розуміють величину $k_{\lambda} p s$, де k_{λ} — коефіцієнт випромінювання чи поглинання середовища, для даної довжини хвилі, p — парціальний тиск даного газу та

s — середня довжина шляху променя. Для спрощення розрахунків прийнято $k_\lambda = \text{const}$ і $p = \text{const}$, тому оптична щільність полум'я характеризується його товщиною s_0 і виражається через ks_0 .

На рис. 8.12 показано

$$\text{залежність } \Psi = f\left(\frac{\Delta T}{T_n}, ks_0\right),$$

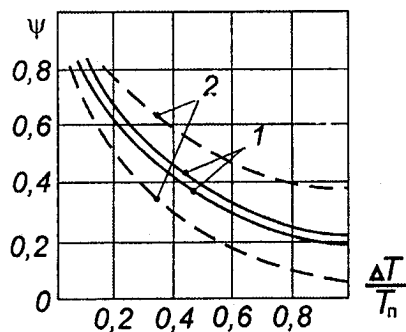


Рис. 8.12. Залежність $\Psi = f(\Delta T/T_n; ks_0)$

звідки випливає, що $\Psi < 1$, тобто $Q_{n \rightarrow m}^0 > Q_{n \rightarrow m}$. Це означає, що тепловий потік на матеріал, який нагрівається, від однорідного полум'я з температурою T_n більший за тепловий потік від неоднорідного полум'я такої самої товщини з нижнім шаром, нагрітим до температури T_n , та з холоднішими верхніми шарами.

Із зростанням оптичної щільності полум'я (ks_0) тепловий потік на матеріал, що нагрівається, збільшується досить помітно: порівняйте розбіг кривих 1 ($ks_0 = 0,1$) та 2 ($ks_0 = 0,2$).

Б. Випромінювання шару газів, що обмежений поверхнями. Дослідження випромінювання в замкнутому просторі підтвердили вплив на теплообмін відносно холодного шару газів, який розташовується між шаром полум'я та поверхнею нагріву, знижуючи результуючий тепловий потік на поверхню нагріву.

Розрахунки показують, що вплив шарів над та під факелом (відносно холодних) на теплообмін тим сильніший, чим менший ступінь чорноти полум'я ϵ_n та чим вища температура T_m поверхні нагріву матеріалу.

Сумарне випромінювання Q_Σ на поверхню матеріалу складається з випромінювання шару газів та пропущеного ним випромінювання поверхні кладки і визначається із співвідношення, яке встановлюється дослідним шляхом:

$$\xi = \frac{Q_{\Sigma}}{Q_{\Pi \rightarrow \text{м}}} = \frac{Q_{\Sigma}}{Q_{\Pi \rightarrow \text{м}}^0} \psi \quad (8.36)$$

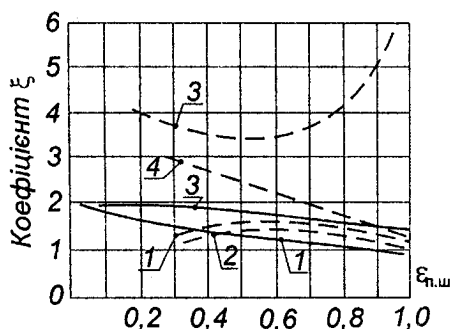


Рис. 8.13. Залежність

$$\xi = f(\epsilon_{\text{п,ш}})$$

- 1 — чорна адиабатна поверхня з боку високих температур;
 2 — те саме дзеркальна поверхня;
 3 — чорна адиабатна поверхня з боку низьких температур;
 4 — те саме дзеркальна поверхня.

Позначення:

————— заповнене сіре середовище
 - - - - - шар CO_2

На рис. 8.13 показана експериментальна залежність $\xi = f(\epsilon_{\text{п,ш}})$, де $\epsilon_{\text{п,ш}}$ — спектральний ступінь чорноти шару газів, віднесений до температури $T_{\text{п}} = \text{const}$ та до чорного спектрального випромінювання при $\Delta T/T_{\text{п}} = 0,5$ і $T_{\text{п}} = 2000\text{K}$.

Наведені експериментальні дані дають підставу зробити певний висновок. Наявність захисної поверхні, що обмежує робочий простір печі, дає змогу збільшити сумарне випромінювання ($\xi > 1$):

1) з боку низьких температур в 1,5...2,0 рази ($\epsilon_{\text{п,ш}}$ майже не впливає);

2) з боку високих температур (випромінювання

в бік низьких температур) вплив значно сильніший і дуже залежить від властивостей середовища, тобто від $\epsilon_{\text{п,ш}}$, а для трьохатомних газів і від властивостей поверхонь.

Зниження висоти склепіння печі сприяє збільшенню передачі теплоти на поверхню матеріалу, що нагрівається.

8.3.2. Вибір палива та методу його спалювання. На відміну від рівномірно розподіленого режиму теплообміну, режим прямого спрямованого теплообміну легко здійснюється як у паливних, так і в електричних печах. Наприклад, в дугових електричних печах створюється типовий спрямований теплообмін, який визначається місцем розташування дуги.

Для організації спрямованого прямого радіаційного теп-

лообміну в паливних печах при доборі палива, по можливості, перевагу слід надавати таким видам палива, які дають світне полум'я внаслідок його природної карбюрації (газоподібне паливо, що містить вуглеводні, смоли, а також мазути).

Печі, в яких здійснюється спрямований прямий теплообмін, є типовими печами з факельним режимом організації горіння, тому що по самій природі своїй створення факела, в якому згоряє паливо, являє собою процес організації розтягнутого горіння. Як відомо, при цьому практична температура горіння суттєво відхиляється від теоретичної.

Ця обставина примушує добирати більш калорійне паливо. У робочу камеру доцільно подавати підігріте паливо та повітря. Пальники мають бути достатньо потужними, в протилежному разі факел швидко розчиняється в навколишньому середовищі.

При спалюванні рідкого палива слід надавати перевагу форсункам високого тиску, які дають довге зосереджене полум'я. Вибір типу форсунки та параметрів розпилювача (пара, повітря, стиснутий газ) визначається довжиною робочого простору печі. Наприклад, для великих мартенівських печей більш ефективні форсунки, в яких досягаються надзвукові швидкості розпилювача.

Пилоподібне паливо, що дає сильне світне полум'я, безумовно, також задовольняє вимоги прямого спрямованого теплообміну.

Прямий спрямований теплообмін, як про це сказано вище, може мати місце і від слабо світного полум'я, якщо температура його особливо висока і воно спрямоване з великою швидкістю на поверхню матеріалу, що нагрівається.

Висока швидкість потоку, з одного боку, інтенсифікує радіаційну тепловіддачу внаслідок досконалого видалення з поверхні нагріву шару холодних газів, а з іншого — збільшує тепловіддачу конвекцією, величина якої в подібних випадках може досягати 50%.

8.3.3. Рух газів у печі. Для режиму спрямованого прямого радіаційного теплообміну необхідно, щоб факели зберіга-

ли свою індивідуальність по всій довжині робочого простору або в тій його зоні, де створюється спрямований теплообмін. Щоб задовольнити цю вимогу, необхідно віддавати перевагу замкнутим факелам (див. рис. 8.9, а), тому що вони мають меншу поверхню контакту з навколишнім середовищем. Через те що кожний пальник має давати далекобійний факел, доводиться обмежуватись невеликою кількістю порівняно потужних пальників, які встановлюються з одного боку печі. Це робиться з метою не допустити руйнування факелів при їх співдарах. Слід наголосити, що тут доцільніше застосовувати пальники зовнішнього змішування.

Таким чином, механіка газів (рух газів) у робочому просторі печей, що працюють за принципом прямого спрямованого теплообміну, має характеризуватися наявністю точної частини (факела) та циркуляційних зон.

Підсмоктування газів у факел із навколишнього середовища діє на теплообмін в печі двояко. З одного боку, через підсмоктування збіднюється горюча суміш і в результаті цього подовжується факел. Цей фактор не є особливо негативним у печах цього типу. З іншого боку, підсмоктування навколишнього середовища в факел вирівнює температуру між факелом та середовищем, порушуючи таким чином умови, що забезпечують спрямований прямий теплообмін.

Щоб задовольнити згадані вимоги, необхідно, щоб в печах цього типу в циркуляційних зонах рух газів був, по можливості, більш повільним. Для цього необхідно забезпечити дотримання таких умов:

1) відносна поверхня факела має бути мінімальною. Це досягається вибором форми факела та його початкового діаметра. Зімкнутий факел краще розімкнутого, круглий краще плоского тощо;

2) кількість руху, що вноситься струминами палива та повітря

$$m\omega = m_{\text{пал}}\omega_{\text{пал}} + m_{\text{пов}}\omega_{\text{пов}}, \quad (8.37)$$

треба по можливості зменшити за рахунок зниження швидкостей палива ($\omega_{\text{пал}}$) та повітря ($\omega_{\text{пов}}$). Однак виконан-

ня цієї умови обмежується вимогами формування факела необхідної далекобійності;

3) необхідно забезпечити правильний вибір співвідношення швидкостей палива та повітря у початковому отворі пальника;

4) треба правильно вибрати місце виводу продуктів згоряння з робочої камери. Довжина факела має приблизно дорівнювати довжині робочого простору, а відводяться гази з протилежного боку, де розміщуються пальники.

У плавильних печах факел треба спрямувати під певним кутом на поверхню нагріву, щоб біля поверхні нагріву досягти максимальної температури.

Таким чином, для випадку прямого спрямованого радіаційного теплообміну прямоточний характер руху газів у печі є найсприятливішим (див. рис. 8.10, а).

8.3.4. Сфера застосування та принципи розрахунку. Направлений прямий радіаційний теплообмін дуже поширений. Це пов'язано з тим, що факельне згоряння палива є процесом керованим і можна, змінюючи положення факела, його світність та поле температур, у широких межах регулювати спрямований теплообмін.

При нагріванні тонких виробів доцільно між їх поверхнею та факелом мати шар більш холодних газів (екрануючий шар) для захисту тонких виробів від перегрівання. Одночасно факел повинен мати якомога вищу температуру. Висота робочого простору повинна бути такою, щоб у ній вільно розміщувався факел.

При нагріванні масивних виробів можна допускати, щоб факел розміщувався ближче до поверхні нагріву, ніж при нагріві в камерних печах тонких виробів. У звичайних печах не рекомендується спрямувати факел на поверхню при нагріві всіх видів металів (щоб не допустити його перегріву) за винятком випадків, коли нагрів ведеться з метою плавлення. Якщо не вдається забезпечити рівномірний нагрів масивного виробу з усіх боків, використовуючи спрямований прямий теплообмін, то він за своєю ефективністю майже завжди поступається рівномірно розподіленому.

У полум'яних печах для плавлення матеріалів, наприклад, мартенівських чи склоплавильних, спрямований радіаційний теплообмін є найбільш раціональним.

Так, у мартенівських печах температура кладки робочого простору (після утворення дзеркала рідкої ванни) наближається до допустимої межі. Тому в цих печах необхідно мати настільний факел, що добре нагріває ванну, в той самий час цей факел має бути відокремленим від склепіння тепловим екраном із шару холоднішого газу.

Яскраво виражене пряме радіаційне нагрівання має місце при газовому різанні та зварюванні металу.

Розрахунок печей при нерівномірному розподілі температур у полум'ї (факелі) дуже складний. Правильніше сказати, що достатньо точних теоретичних методів такого розрахунку немає.

Основним питанням є визначення розрахункової температури полум'я, необхідної для розрахунку випромінювання шару газів. Визначити цю температуру за наявності теплосприймаючої поверхні та тепловиділення при згорянні палива практично неможливо. А це, в свою чергу, не дає змоги хоча б наближено знайти ефективну температуру, за якою можна було б розраховувати нагрів тіла. Тому при заданому режимі теплообміну як для масивних, так і для тонких тіл температурний графік нагріву матеріалу (T_m) слід добирати з технологічних міркувань.

Методика розрахунку таких печей полягає в тім, що робочий простір поділяється на кілька радіаційно-взаємодіючих зон. У кожній з них температура та інші параметри радіаційного теплообміну приймаються незмінними, виходячи із загальних та практичних міркувань. На практиці часто проводять дослідження печей, щоб одержати необхідні дані для розрахунків параметрів процесу теплообміну.

Контрольні запитання

1. Назвіть умови, необхідні для створення режиму спрямованого прямого радіаційного теплообміну.
2. Проаналізуйте вплив захисної огорожі, що обмежує

робочий простір печі, на сумарне випромінювання теплоти на поверхню матеріалу, що нагрівається.

3. Вибір палива та методу його спалювання для організації режиму спрямованого прямого радіаційного теплообміну в камері печі.

4. Організація руху продуктів згоряння, який забезпечує створення в робочому просторі печі режиму спрямованого прямого радіаційного теплообміну.

5. В яких промислових ВТУ використовується режим спрямованого прямого радіаційного теплообміну? Основні переваги цього режиму. Порядок розрахунку такого режиму теплообміну.

8.4. Спрямований непрямий радіаційний теплообмін

Спрямованим непрямым (опосередкованим) радіаційним теплообміном називають такий теплообмін, при якому питомий радіаційний потік теплоти від полум'я, що спрямовується на кладку, більший, ніж потік, що спрямовується на поверхню матеріалу, що нагрівається, тобто $Q_{п \rightarrow кл} > Q_{п \rightarrow м}$.

8.4.1. Теплопередача. Режим теплообміну, що розглядається, характеризується

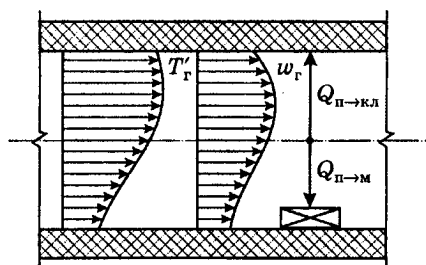


Рис. 8.14. Схема направленного непрямого радиационного теплообмена

нерівномірним полем температур та фізичних властивостей полум'я. При цьому область максимальних температур розташована ближче до поверхні кладки, ніж до поверхні нагріву матеріалу, що нагрівається (рис. 8.14).

Аналіз умов цього виду теплообміну показує, що для забезпечення максимального теплового потоку на матеріал

ступінь чорноти газів (полум'я) доцільно добирати в межах 0,5...0,6. Оптимальне значення ступеня чорноти газів залежить від температури кладки $T_{кл}$ та матеріалу $T_{м}$, що нагрівається $\epsilon_{г}^{opt} = f(T_{кл}, T_{м})$. Схеми печей, в яких викорис-

товується спрямований непрямий радіаційний теплообмін, показано на рис. 8.15, 8.16.

На рис. 8.15 дано схему типової конструкції прохідної печі з вказаним режимом теплообміну, призначенням якої є нагрівання заготовок кольорових металів. Пальники розміщуються так, що факел, максимально наближений до склепіння, нагріває його до температури ($T_{кл} > T_m$), що і створює градієнт температур по товщині полум'я і забезпечує умови цього режиму теплообміну.

На склепінні печі (рис. 8.16) встановлено вискоефективні плоскополум'яні пальники (див. п.3.3, рис. 3.8). Факели (продукти згоряння) рухаються плоскими струминами з великою швидкістю вздовж поверхні склепіння. Цим самим створюються сприятливі умови для інтенсивної конвективної тепловіддачі від газів на кладку склепіння. Одночасно, добрий контакт факела з керамічною поверхнею

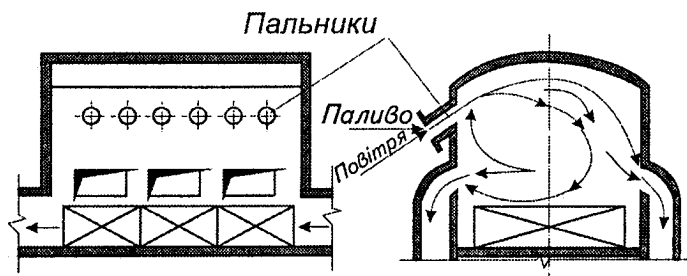


Рис. 8.15. Схема прохідної нагрівальної печі для нагріву заготовок з кольорового металу (із звичайними пальниками)

пальника, нагрітою до високої температури, забезпечує швидке і повне згоряння палива. Теплота, яка сприймається кладкою склепіння, передається на поверхню матеріалу, що нагрівається, практично повністю через випромінювання.

Таким чином, непрямий спрямований теплообмін є суттєвим методом інтенсифікації зовнішнього теплообміну в нагрівальних печах.

При розрахунку цього режиму теплообміну можна знехтувати тепловими втратами в зовнішнє середовище і вважати що пряма конвективна тепловіддача від факела на поверхню, що нагрівається, відсутня.

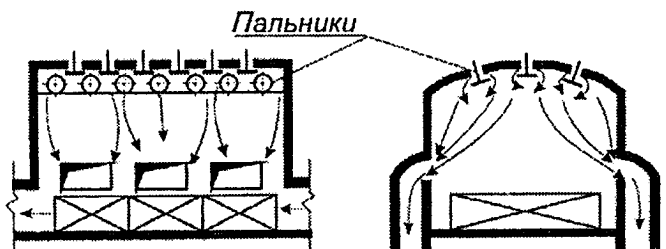


Рис. 8.16. Схема прохідної нагрівальної печі для нагріву заготовок з кольорового металу (з пальниками поверхневого горіння)

Тоді результативна теплота, яку сприймає поверхня матеріалу при стаціонарному режимі (рис. 8.17), визначається так:

$$Q_m = \varepsilon_m H_{\text{пр}} \left\{ \underbrace{C_{\text{зв}} \left(\frac{T_{\text{кл}}}{100} \right)^4 - C_0 \left(\frac{T_m}{100} \right)^4}_{+1} - \varepsilon''_r \left[\underbrace{C_{\text{зв}} \left(\frac{T_{\text{кл}}}{100} \right)^4 - C_0 \left(\frac{T''_r}{100} \right)^4}_{-2} + \underbrace{\varepsilon''_r (1 - \varepsilon''_r) \left[C_0 \left(\frac{T'_r}{100} \right)^4 - C_{\text{зв}} \left(\frac{T_{\text{кл}}}{100} \right)^4 \right]}_{+3} \right] \right\}, \quad (8.38)$$

де ε_m — ступінь чорноти матеріалу, що нагрівається; $H_{\text{пр}}$ — променесприймаюча поверхня матеріалу, що нагрівається; $C_{\text{зв}}$ — зведений коефіцієнт випромінювання

$$C_{\text{зв}} = f(C_0, \varepsilon'_r, \varepsilon''_r, \varepsilon_{\text{кл}}, \varphi_{\text{кл} \rightarrow \text{м}}, T'_r, T''_r, T_{\text{кл}}, \alpha_{\text{к}}), \quad (8.39)$$

тут C_0 — коефіцієнт випромінювання абсолютно чорного тіла; $\varepsilon'_r, \varepsilon''_r$ — ступені чорноти газів при температурах T'_r і T''_r , відповідно; T'_r, T''_r — абсолютні температури газів у зоні горіння (власне гарячий або палаючий факел) і в зоні теплообміну (шар газів між факелом та матеріалом, що нагрівається); $\varphi_{\text{кл} \rightarrow \text{м}}$ — кутовий коефіцієнт випромінювання від кладки на матеріал; $T_{\text{кл}}, T_m$ — абсолютні температури кладки і матеріалу, що нагрівається, відповідно; $\alpha_{\text{к}}$ — ко-

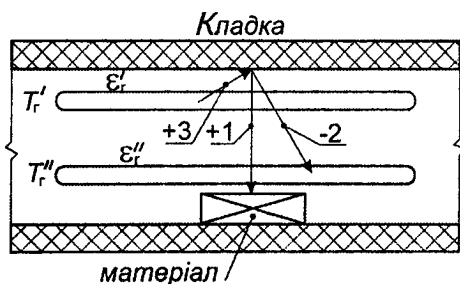


Рис. 8.17. До розрахунку теплоти, що передається на матеріал при направленому непрямому режимі теплообміну

ефіцієнт тепловіддачі конвекцією від факела на кладку.

Складові потоки теплоти в формулі (8.38) (виділені як +1, -2, +3) відповідають таким самим позначенням на рис. 8.17.

У даному режимі теплообміну кладка відіграє найбільш активну роль як посередник у передачі теплоти від джерела випромінювання. Температура кладки вища, а умови її роботи важчі, ніж при прямому спрямованому чи рівномірно розподіленому режимі теплообміну.

Непрямий спрямований теплообмін може бути організований і при заміні кладки холодною поверхнею з дуже високим коефіцієнтом відбивання — 0,95...0,97. Внутрішня поверхня кладки при цьому має бути полірованою. Печі, що працюють за цим принципом, називаються рефлекторними. Рефлекторні печі мають стінки, які охолоджуються водою і їх температура підтримується на рівні 25...30°C.

Серед рефлекторних печей вирізняються сонячні печі, в яких системою дзеркал сонячна енергія концентрується в фокусі, де можна отримати дуже високу температуру (до 4000...4300°C).

8.4.2. Вибір палива та методу його спалювання. При спрямованому непрямому радіаційному теплообміні світність полум'я відіграє суттєву роль, окрім випадку спалювання палива за методом поверхневого згоряння. Рекомендується застосовувати паливо, яке дає світне полум'я, ступінь чорноти якого була β у межах 0,5...0,6. Однак, вимоги до світності при спрямованому непрямому теплообміні значно менші, ніж при інших режимах радіаційного теплообміну і тим менші, чим вища калорійність палива. Це по-

яснюється тим, що у верхній частині робочого простору печі може бути досягнута дуже висока температура полум'я, недопустима (через небезпеку перегріву металу) у нагрівальних печах при інших режимах теплообміну.

У зв'язку з цим в даному випадку можуть успішно використовуватись різні види рідких та газоподібних палив, а також тверде паливо. Вимоги до пальників та форсунок із цих причин також досить обмежені. Можуть застосовуватись пальники найрізноманітніших типів та конструкцій, починаючи з простих полум'яних і закінчуючи тунельними безполум'яними. При цьому чим нижче Q_H^p , тим вищі мають бути вимоги до конструкції пальника як до обладнання для змішування компонентів згоряння.

Дещо інші вимоги до палива ставляться при використанні поверхневого спалювання, коли роль кладки як посередника при теплообміні підвищується. Здійснити спалювання палива в найтоншому шарі поблизу поверхні кладки (кераміки) можна лише при використанні висококалорійного газоподібного палива ($Q_H^p > 16000$ кДж/м³), попередньо добре очищеного та перемішаного з повітрям. У цьому разі виключається застосування важкого рідкого палива (мазуту), а також газоподібного палива, яке містить значну кількість важких вуглеводнів (пропан C_3H_8 , бутан C_4H_{10}), оскільки швидке їх спалювання суттєво утруднюється.

При поверхневому спалюванні палива майже вся теплота сприймається склепінням і передається випромінюванням на матеріал. Тому продукти згоряння, які заповнюють робочий простір, повинні мати якнайменший ступінь чорноти, що знижує їх роль як теплового екрана перед поверхнею нагріву матеріалу, що нагрівається.

8.4.3. Рух газів у печі. При спрямованому непрямому теплообміні відносно високі температури формуються у верхній частині робочого простору, якщо звичайно там сконцентрувати пальники. У нижній частині робочого простору (див.рис. 8.15) при цьому утворюється циркуляційна зона, де температура газів має бути трохи вищою за температуру поверхні матеріалу, що нагрівається. У цій

зоні бажано мати продукти повного згоряння палива з мінімальним ступенем чорноти.

Канали для відведення газів розташовуються рівномірно і завжди в цій циркуляційній зоні, тому продукти згоряння відводяться з відносно низькою температурою.

У печах, де спалювання палива здійснюється за принципом поверхневого горіння (див.рис. 8.16), характер руху газів у самому робочому просторі суттєвого значення не має. Однак, внаслідок значних швидкостей руху газів, які обумовлені відносно малими розмірами робочого простору, вплив тепловіддачі конвекцією стає відчутним не тільки на кладку, а й на поверхню нагріву матеріалу. Відведення продуктів згоряння, як і в першому випадку (див. рис. 8.15), слід розміщувати поблизу поверхні нагріву.

Дуже важливу роль відіграє механіка (рух) газів поблизу керамічної поверхні пальника, де відбувається процес по-верхневого горіння. Необхідно, щоб в шар біля цієї поверхні, де згоряє паливо, не потрапляли відносно холодні продукти згоряння із зони, що прилягає безпосередньо до керамічної поверхні. Як видно з рис. 3.8, циркуляційні зони дуже малі і живляться за рахунок газів досить високої температури, які повертаються в зону горіння відразу ж при виході їх за межі керамічної поверхні пальника.

8.4.4. Сфера застосування та принципи розрахунку. Спрямований непрямий режим теплообміну застосовується досить широко, за винятком таких двох випадків:

1) коли нагріваються масивні тіла, через труднощі в організації рівномірного опромінювання поверхні виробів (наприклад, печі для випалювання цегли);

2) коли температура поверхні матеріалу, що нагрівається (визначена технологією), наближається до граничної температури служби кладки (кераміки). За таким режимом працюють електричні нагрівальні колодязі.

Окреме місце посідають муфельні печі. Роль кладки тут дуже важлива, тому що вона є випромінювачем. При цьому кладка сприймає теплоту зовні або працює як теплогенератор при проходженні електричного струму.

Для деяких технологічних процесів застосовуються печі

двостадійного спалювання палива. Такі печі іноді називаються півмуфельними. Можливі два варіанти їх виконання:

а) перша стадія спалювання палива здійснюється зовні півмуфеля, а допалювання — у півмуфелі;

б) перша стадія спалювання палива здійснюється у півмуфелі, а допалювання — зовні його.

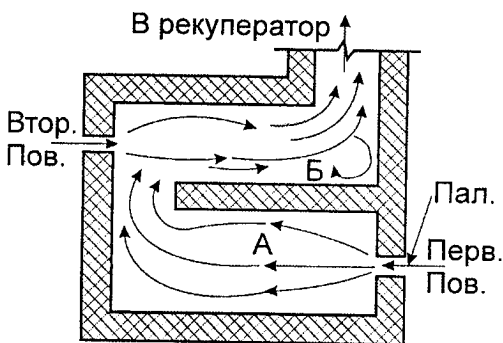


Рис. 8.18. Схема камерної печі двостадійного спалювання палива для безокисного нагрівання металу

У разі безокисного нагріву матеріалу застосовується другий варіант півмуфельних печей (рис. 8.18).

У внутрішньому просторі А півмуфеля спалюється газоподібне або рідке паливо при коефіцієнті витрати повітря $\alpha=0,4\dots0,5$. Це робиться для того, щоб створити атмосферу в просторі А, що характеризується таким співвідношенням компонентів пічних газів, які

при робочій температурі $1250\dots1350^{\circ}\text{C}$ не приводять до помітного окиснення металу. Ці співвідношення вибирають такого порядку: $\text{CO}_2 : \text{CO}=0,3$ і $\text{H}_2\text{O} : \text{H}_2=0,8$. Щоб забезпечити вказану високу температуру в півмуфелі навіть при використанні коксівного чи природного газу, необхідний високотемпературний нагрів повітря ($850\dots900^{\circ}\text{C}$) або використання повітря, збагаченого киснем (до $40\dots60\%$).

Продукти неповного згоряння при $t=1250\dots1350^{\circ}\text{C}$ надходять в одну або кілька камер допалювання Б, які розміщуються зовні півмуфеля. Туди також подається додаткове повітря. В камерах допалювання температура вища, ніж у півмуфелі. Тому стінки, що відділяють півмуфель від камер допалювання, нагріваються до вищої температури, ніж температура газів у півмуфелі. Чим вище теплопровідність цих стінок, тим відчутніший вказаний ефект.

Принципи розрахунку печей, де реалізується спрямований непрямий режим теплообміну, аналогічні тим, які використовуються для печей з прямим спрямованим режимом теплообміну. Головним питанням тут є визначення величини випромінювання шару полум'я. Розрахунок особливо ускладнюється під час нагрівання масивних виробів.

Для умов, що аналізуються, застосовують розрахунки позонного радіаційного теплообміну, приймаючи температури та оптичні характеристики в межах кожної зони сталими. Допускаються і деякі спрощення, які не дають великої похибки в розрахунках. Широко використовуються експериментальні дані. Порядок розрахунку відповідає викладеному в 8.2.4 та 8.3.4.

Стінка муфеля розділяє муфельну піч на дві (три) самостійні теплообмінні зони, в межах яких теплообмін відбувається відповідно до наведених вище принципів. Тому для муфельних печей застосовуються такі самі принципи розрахунку, як наведено вище.

Контрольні запитання

1. Дайте характеристику спрямованого непрямого (опосередкованого) режиму радіаційного теплообміну в робочих камерах ВТУ.

2. Напишіть формулу для визначення результативного потоку теплоти, яку сприймає поверхня матеріалу, що нагрівається при стаціонарному режимі спрямованого непрямого радіаційного теплообміну.

3. Вибір палива та методу його спалювання для організації режиму спрямованого непрямого радіаційного теплообміну.

4. Організація руху продуктів згоряння, що забезпечує створення в робочому просторі печі режиму спрямованого непрямого радіаційного теплообміну.

5. В яких високотемпературних процесах використовується режим спрямованого непрямого радіаційного теплообміну? Порядок розрахунку такого режиму теплообміну.

8.5. Конвективний та конвективно-радіаційний режими теплообміну

Конвективним режимом роботи печей вважають такий режим, при якому тепловіддача конвекцією має переважне значення. Тому тепловіддачею випромінюванням як від полум'я, так і від кладки можна знехтувати. Теплоносієм при конвективному теплообміні може бути газ або рідина.

Конвективний режим роботи печей з газоподібним теплоносієм застосовується найчастіше в сушильних установках, які працюють, як правило, при температурі теплоносія не вище як 500...600°C. У печах з конвективним теплообміном нагрівають метали, поверхня яких має високий коефіцієнт відбивання, коли радіаційний коефіцієнт тепловіддачі є досить низьким.

Конвективні печі з використанням рідкого теплоносія застосовуються для нагріву металевих виробів при їх термічній обробці. Через те що рідкі теплоносії є здебільшого непрозорою, то конвективна тепловіддача при їх використанні є переважною і за досить високих температур (до 1350 °C для соляних ванн і навіть до 3500°C для магматичних печей).

8.5.1. Теплопередача. Конвективний режим теплообміну. Розрахунки конвективного теплообміну детально розглядаються в курсі "Тепломасообмінні процеси". Тут же розглянемо окремі особливості, притаманні високотемпературним процесам та установкам.

Теплообмін конвекцією описується відомою формулою Ньютона

$$Q = \alpha_k \Delta t F_m \tau, \quad (8.40)$$

де α_k — коефіцієнт тепловіддачі конвекцією, кДж/(м² · К); $\Delta t = t_\tau - t_m$; t_τ — температура теплоносія, °C; t_m — температура матеріалу, °C; F_m — поверхня нагріву матеріалу; τ — час, с.

У нагрівальних печах тепловіддача сильно залежить від характеру взаємного руху теплоносія та матеріалу, що нагрівається (прямотечія, протитечія, перехресний рух), а також від температурного напору Δt . Характер зміни величини Δt вздовж поверхні нагріву наведений на рис. 8.19.

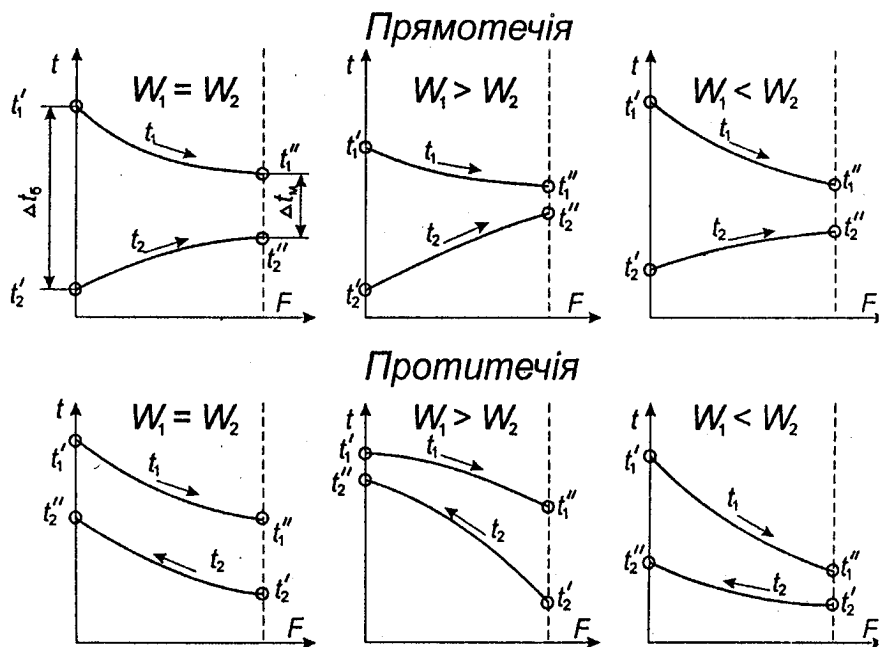


Рис. 8.19. Залежність $\Delta t = f(W_1 / W_2)$:
 t_1, W_1 та t_2, W_2 — температури та водяні еквіваленти
(числа) відповідно теплоносія та матеріалу

Для загальної оцінки теплообміну в робочій камері важливо знати, як змінюються температури теплоносія і матеріалу, що нагрівається. Це можна легко зробити, використовуючи таке поняття, як водяний еквівалент компонентів теплообміну. Водяний еквівалент середовища, або водяне число W — це витрата води, яка для свого нагрівання на 1°C потребує саме стільки теплоти, скільки і дане середовище для такого ж нагрівання (на 1°C) і визначається з рівняння $W_{c_b} = Gc$, (8.41) де G — витрата речовини; c — теплоємність речовини; c_b — теплоємність води.

Величина середнього логарифмічного температурного напору при прямотечії та протитечії визначається за формулою:

$$\Delta t = \frac{\Delta t_\delta - \Delta t_m}{\ln \frac{\Delta t_\delta}{\Delta t_m}}, \quad (8.42)$$

де Δt_{δ} , Δt_m — більше (менше) із значень температурного напору (незалежно від місця його дії — на початку чи наприкінці поверхні нагріву теплообмінника).

Коефіцієнт конвективної тепловіддачі α_k залежить від режиму руху та теплофізичних властивостей нагрівального середовища і зокрема пограничного шару безпосередньо на поверхні нагріву. Розрізняють теплообмін в умовах вільної та вимушеної конвекції для газоподібного та рідкого теплоносія.

Для газоподібного теплоносія теплообмін в умовах вільної конвекції характеризується рівнянням виду

$$Nu=f(Gr,Pr), \quad (8.43)$$

а в умовах вимушеної конвекції

$$Nu=f(Re,Pr), \quad (8.44)$$

де $Nu = \frac{\alpha_k d}{\lambda}$ — критерій Нусельта; $Gr = \frac{g l^3}{\nu^2} \beta \Delta t$ — критерій Грасгофа; $Pr = \frac{\nu}{a}$ — критерій Прандтля; $Re = \frac{w d}{\nu}$ — критерій Рейнольдса.

Тут d — визначальний розмір, м; λ — коефіцієнт теплопровідності, кВт/(м·К); ν — коефіцієнт кінематичної в'язкості, м²/с; g — прискорення сили тяжіння, м/с²; l — визначальний розмір поверхні нагріву, м; β — коефіцієнт об'ємного розширення, град⁻¹; Δt — різниця температур між теплоносієм та поверхнею нагріву, від якої залежить тепловіддача, К; a — коефіцієнт температуропровідності, м²/с; w — швидкість руху теплоносія, м/с.

Для рідкого теплоносія конвективна тепловіддача підпорядковується тим самим закономірностям, які існують і для газоподібного теплоносія, однак вплив природи рідкого теплоносія досить значний.

Якщо теплоносієм є розплавлений метал, то в підсумковому переносі теплоти значну роль відіграє електронна провідність металу, а турбулізація потоку металу слабо впливає на α_k . Тому тепловіддача конвекцією в цих умовах значно нижча, ніж при застосуванні газоподібного теплоносія.

Якщо в рідку ванну розплавленої солі вводиться холод-

ний метал для нагріву, то на його поверхні створюється кірка застиглого рідкого теплоносія. До розплавлення цієї кірки теплопередача на поверхню нагріву визначається товщиною кірки та коефіцієнтом її теплопровідності.

Конвективно-радіаційний режим теплообміну. Якщо говорити точно, то в будь-яких печах здійснюється одночасно радіаційний (променевий) та конвективний зовнішній теплообмін. До цього розглядалися випадки, коли переважав один з двох видів теплообміну. Однак, у печах із температурою в робочому просторі від 500 до 1400°C доцільно враховувати обидва види теплообміну (радіаційний та конвективний). Таким чином, сумарний потік теплоти від випромінювання та конвекції дорівнюватиме

$$Q_{\text{сум}} = Q^p + Q^k. \quad (8.45)$$

Підставивши в рівняння (8.45) значення Q^p та Q^k з формул радіаційної (променевої) та конвективної величини теплоти, одержимо

$$Q_{\text{сум}} = C_{\text{зв}} F(T_{\text{Г}}^4 - T_{\text{М}}^4) + \alpha_{\text{к}} F(T_{\text{Г}} - T_{\text{М}}) \quad (8.46)$$

або

$$Q_{\text{сум}} = \left[\frac{C_{\text{зв}}(T_{\text{Г}}^4 - T_{\text{М}}^4)}{T_{\text{Г}} - T_{\text{М}}} + \alpha_{\text{к}} \right] F(T_{\text{Г}} - T_{\text{М}}). \quad (8.47)$$

Величина $C_{\text{зв}}$ — це зведений коефіцієнт випромінювання, а $\frac{C_{\text{зв}}(T_{\text{Г}}^4 - T_{\text{М}}^4)}{T_{\text{Г}} - T_{\text{М}}} = \alpha_{\text{р}}$ називається коефіцієнтом тепловіддачі радіацією (випромінюванням).

Тому сумарний тепловий потік визначається за формулою

$$Q_{\text{сум}} = (\alpha_{\text{р}} + \alpha_{\text{к}}) F(T_{\text{Г}} - T_{\text{М}}). \quad (8.48)$$

Вигляд формули дуже простий, однак необхідно пам'ятати, що тут $\alpha_{\text{р}}$ — величина штучна, введена для спрощення вигляду формули сумарного теплового потоку. Якщо $\alpha_{\text{к}}$ порівняно мало залежить від температури, то $\alpha_{\text{р}}$ значно залежить від температури.

8.5.2. Вибір палива та методу його спалювання. Конвективний режим теплообміну при використанні газо-

подібного теплоносія застосовується в установках, які працюють при відносно низьких температурах (нижчих від температури займання палива). Тому спалювання палива в таких установках здійснюється поза робочим простором в особливій камері, де створюються всі умови для повного згоряння палива. Відповідно розвивається і достатньо висока температура (1000°C і вище).

Якщо конвективна піч облаштовується окремою топкою, то на вибір палива практично не накладається ніяких обмежень, тому що об'єм топки визначається з умов спалювання необхідної кількості палива. Пальники та форсунки рекомендується добирати найсучасніші — короткополум'яні. При цьому об'єм топкової камери буде мінімальним, а повне згоряння палива здійснюватиметься при найменшому коефіцієнті витрати повітря.

При спалюванні рідкого палива перевагу слід віддавати форсункам низького тиску. Теплота згоряння палива практично не має значення, тому можливе використання низькосортних палив.

Розміщення сопел чи пальників у конвективних печах має бути таким, щоб безпосередня радіація факелів на поверхню нагріву матеріалу була мінімальною та щоб по можливості забезпечувалась енергійна циркуляція газів у робочому просторі. В результаті цього окремі факели швидко втрачають свою індивідуальність.

Для формування необхідної температури теплоносія, перед виходом в робочий простір топкові газу необхідно змішати з повітрям або частиною повернених димових газів, що виводяться з робочого простору.

Витрати повітря для змішування з продуктами згоряння можна визначити з балансового рівняння

$$v_{п.з.} c_{п.з.} t_{п.з.} + v_{пов} c_{пов} t_{пов} = (v_{п.з.} + v_{пов}) c_{сум} t_{сум} , \quad (8.49)$$

де $v_{п.з.}$, $v_{пов}$ — кількість продуктів згоряння та повітря (або повернених газів), відповідно, м³/с; $c_{п.з.}$, $c_{пов}$ — питома теплоємність продуктів згоряння та повітря (або повернених газів), відповідно, кДж/(м³ · К); $t_{п.з.}$, $t_{пов}$ — температура продуктів згоряння та повітря (або повернених газів)

відповідно, °С; $c_{\text{сум}}$ — теплоємність суміші газів, кДж/(м³ · К); $t_{\text{сум}}$ — температура суміші газів, °С.

При змішуванні продуктів згоряння з повітрям зростають втрати теплоти з відхідними газами, що знижує коефіцієнт корисного використання теплоти.

При змішуванні продуктів згоряння з поверненими димовими газами, втрати з відхідними газами зменшуються.

Рециркуляція продуктів згоряння палива широко розповсюджена в практиці сучасного теплообмінного обладнання. Кратність циркуляції визначається з формули

$$K = \frac{v_{\text{п.з}} + v_{\text{р.г.}}}{v_{\text{п.з}}}, \quad (8.50)$$

де $v_{\text{р.г.}}$ — об'єм рециркуляційних газів, м³/с.

За наявності зовнішньої рециркуляції коефіцієнт тепловіддачі конвекцією збільшується, тому що швидкість газового потоку зростає. Можна вважати, що

$$\frac{\alpha_k^p}{\alpha_k} < K^{0,8}, \quad (8.51)$$

де α_k^p — коефіцієнт тепловіддачі конвекцією за наявності рециркуляції, кВт/(м² · К); α_k — коефіцієнт тепловіддачі конвекцією без рециркуляції, кВт/(м² · К).

Однак, при рециркуляції газів дещо знижується температурний натиск, що приводить до зменшення інтенсивності теплообміну. Тому умови вигоди від рециркуляції з точки зору зовнішньої тепловіддачі визначаються нерівністю

$$K^{0,8} > \frac{\Delta t}{\Delta t^{\text{рец}}}, \quad (8.52)$$

де Δt — середня різниця температур між теплоносієм та матеріалом при режимі роботи без рециркуляції газів, °С; $\Delta t^{\text{рец}}$ — те саме при наявності рециркуляції газів, °С.

Змішування продуктів згоряння палива з повітрям завжди призводить до погіршення умов теплообміну.

З точки зору теплообміну зовнішня рециркуляція вигідна, коли лімітується внутрішній теплообмін, тобто коли за рахунок збільшення рівномірності обігріву вдається одержати вигравш у швидкості нагрівання виробів.

8.5.3. Рух газів. При вільній конвекції рух газоподібного теплоносія залежить від взаємного розташування холодних та гарячих поверхонь і наявності вільного простору для розвитку конвекції, тобто при даних температурах визначається геометричними характеристиками системи.

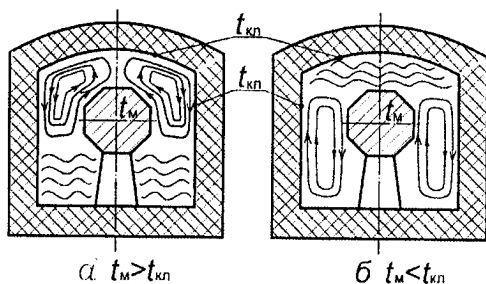


Рис. 8.20. Вільний рух газів у печі:

а — кладка холодна, зливок гарячий; б — кладка розігріта, зливок холодний

На рис. 8.20 схематично показана вільна конвекція в печі, яка створюється в результаті розташування в ній зливка, що має іншу температуру, ніж стінки. Процесу охолодження гарячого зливка відповідає рис. 8.20, *а*. Нижче від зливка знаходиться об'єм нерухомих холодних газів, тому конвективна тепловіддача через нижню грань зливка відбуватись не буде. На рис. 8.20, *б* показано холодний зливок, що знаходиться в нагрітій камері. Вище від зливка знаходиться об'єм нерухомих нагрітих газів, тому верхня грань зливка не сприйматиме теплоту конвекцією.

Для того щоб в нижній частині камери охолодження (рис. 8.20, *а*) не утворювалась застійна зона, необхідно, щоб в цій зоні охолодження стін не відбувалось зовсім, або було значно слабшим, ніж охолодження верхньої частини стін і особливо склепіння.

При посадці відносно холодного тіла в піч з нагрітими до вищої температури стінами (рис. 8.20, *б*), для того щоб забезпечити рівномірний нагрів цього тіла під дією вільної конвекції, необхідно температуру кладки в нижній частині печі підтримувати на більш високому рівні, ніж температу-

ру в верхній частині. Якщо склепіння і верхня частина кладки будуть нагріті сильніше, то в верхній частині печі виникне застійна зона.

Як переважне явище вільна конвекція відіграє в печач обмежену роль, головним чином в камерах охолодження і при відносно низьких температурах. Однак як сукупне явище вільна конвекція може мати відчутне значення, і тому на неї необхідно зважати, правильно розташовуючи поверхні нагріву в робочій камері печі.

В умовах вимушеної конвекції рух газів є засобом керування процесом конвективного теплообміну. Вирішальне значення тут має швидкість руху теплоносія відносно поверхні нагріву. Для забезпечення рівномірного нагріву матеріалу необхідно організувати в робочому просторі печі такий рух газів, який забезпечив би рівномірний розподіл швидкостей по площині перетину простору, де розташовується поверхня нагріву.

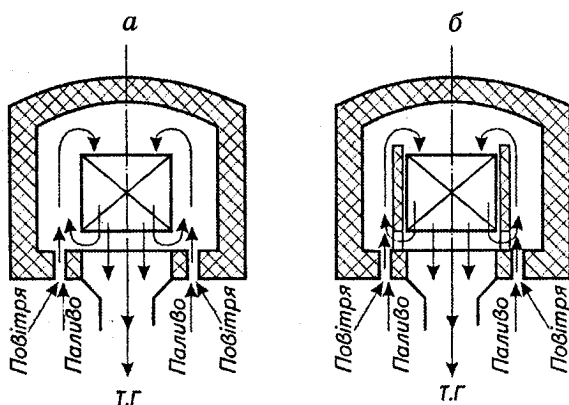


Рис. 8.21. Вимушений рух газів у печі під дією пальників:
 а — атмосферні пальники, розміщені в камері;
 б — пальники, розміщені в особливих топкових камерах.

Рециркуляція газів також суттєво впливає на характер руху газів в робочій камері печі. На рис. 8.21,а показана схема печі, обладнаної атмосферними пальниками.

Пальники підсмоктують певну кількість газів з нижньої частини робочого простору, в результаті чого утворюється рециркуляція газів.

На рис. 8.21, б показана схема печі, в якій за допомогою цегляних перегородок виділені топкові об'єми, де розміщуються пальники. У нижній частині цих об'ємів може створитися температура, достатня для здійснення процесу горіння (~1000 °С). У нижній частині розділюючої стінки зроблені отвори, через які гази після робочої камери підсмоктуються в камеру згоряння, змішуючись з продуктами згоряння, внаслідок чого вони набувають температури, необхідної за технологічним регламентом.

У тому разі, коли раціональне розміщення пальників та відповідних отворів не забезпечує достатньо рівномірної температури по об'єму та інтенсивної тепловіддачі, вдаються до створення енергійної штучної рециркуляції зовнішнього типу. При цьому частина продуктів згоряння забирається спеціальним вентилятором і подається на розбавлення газів, що надходять із топки (рис. 8.22).

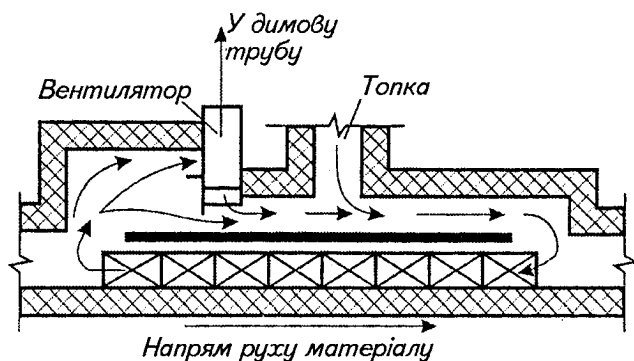


Рис. 8.22. Вимушений рух газів у печі під дією вентилятора, розташованого за межами робочого простору

8.5.4. Сфера застосування та принципи розрахунку.

Сфера застосування конвективного режиму роботи установок з газоподібним теплоносієм є досить обмеженою. Найчастіше цей режим застосовується в сушильних установках різного технологічного призначення, які працюють при температурах не вище як 400°С.

Конвективні печі використовуються при нагріванні ме-

талів, поверхня яких характеризується високим коефіцієнтом відбивання, наприклад, для алюмінієвих сплавів.

В окремих випадках нарівні з радіаційним теплообміном відчутну роль відіграє теплопередача конвекцією (робочі температури 500...900°C та високі швидкості руху теплоносія). При особливо високих швидкостях руху теплоносія конвективна теплопередача може бути відчутною навіть при температурах вище як 1200...1400°C, наприклад, в секційних печах швидкісного нагріву металу.

Конвективні печі з рідким теплоносієм досить поширені. Це, як правило, металеві та соляні ванни, які використовуються для нагрівання та охолодження при термічній обробці різних металів.

Складність розрахунку конвективних печей полягає, головним чином, у доборі найпридатнішої до конкретних умов теплообміну формули для визначення коефіцієнта тепловіддачі конвекцією, а також в правильному визначенні розрахункової поверхні нагріву. Розрахунок печей ускладнюється, коли нагріваються масивні вироби. Однак, проблема може суттєво спрощуватись, коли прийняти, що коефіцієнт тепловіддачі конвекцією не залежить від температури.

Контрольні запитання

1. Чим обґрунтовується організація конвективного режиму роботи ВТУ? Які теплоносії при цьому використовуються?
2. Методика розрахунку конвективного теплообміну. Основні розрахункові формули.
3. Умови, за яких створюється конвективно-радіаційний режим теплообміну в промислових ВТУ.
4. Методика розрахунку конвективно-радіаційного теплообміну.
5. Добір палива та методу його спалювання для організації конвективного та конвективно-радіаційного режиму теплообміну.
6. Організація руху газоподібного теплоносія в робочій

камері ВТУ при вільній та примусовій конвекції. Як впливає цей рух на конвективний теплообмін? Вплив рециркуляції газів у робочій камері ВТУ на теплообмін.

7. Сфера використання конвективного режиму теплообміну у ВТУ.

8.6. Печі зі щільним фільтрувальним шаром (шахтні печі)

8.6.1. Теплопередача. Шахтні печі для кускових матеріалів, які працюють у режимі зі щільним фільтрувальним шаром, є найпоширенішими печами шаруватого режиму. В них найчастіше використовується протитоківий рух теплоносія і матеріалу (див. рис. 5.15, 5.16, 5.17, 5.20).

Процеси теплообміну тут здійснюються за досить складних умов руху матеріалів, що підлягають тепловій обробці, й газоподібного теплоносія. Крім того, при деяких технологічних процесах у матеріалі під дією теплоти змінюються розміри та форма, а інколи він переходить в інший агрегатний стан. Таким чином, на процес руху матеріалу, газоподібного теплоносія і на теплообмін можуть впливати фактори технологічні. Аналізуючи теплообмін у шахтних печах, розглядають передусім ідеалізовані схеми названих вище процесів з тим, щоб в подальшому виявити їх взаємний вплив.

Як вказувалось вище, при шаруватому режимі мають місце всі три види теплообміну (радіації, конвекції та теплопровідності). Тому для розрахунку теплообміну в щільному фільтрувальному шарі вводиться поняття об'ємного коефіцієнта тепловіддачі α_v . Зв'язок цього коефіцієнта зі звичайним коефіцієнтом тепловіддачі на поверхню матеріалу α_F досить простий:

$$\alpha_v V_m = \alpha_F F_m, \quad (8.53)$$

звідки

$$\alpha_v = \alpha_F \frac{F_m}{V_m}, \quad (8.54)$$

де V_m — об'єм шару матеріалу, m^3 ; F_m — сумарна площа поверхні кусків матеріалу, m^2 .

Для шару, що складається з однакових куль діаметра d , з достатньою точністю можна прийняти співвідношення

$$\frac{V_m}{F_m} = \frac{d}{6(1-i)}, \quad (8.55)$$

де i — щільність (порізність) шару в частках одиниці.

Практично шар складається з кусків матеріалу невизначеної форми, тому величину i слід розраховувати, виходячи з насипної маси шару. При цьому необхідно задаватися середнім значенням діаметра куска.

При проектуванні об'єктів, коли насипна маса шару невідома, можна з достатньою точністю вважати, що поверхня кусків неправильної форми на 25% більша, ніж для куль такого самого діаметра. Тому

$$\frac{V_m}{F_m} = \frac{d}{7,5(1-i)}. \quad (8.56)$$

Для визначення об'ємного коефіцієнта тепловіддачі Б.І.Китаєв рекомендує користуватись формулою

$$\alpha_v = 186 \frac{w^{0,97} T^{0,3}}{d^{0,75}} M, \quad (8.57)$$

де T — температура теплоносія, К; w — швидкість газів (м/с), віднесена до повного перерізу шахти не заповненої шихтою, за нормальних умов ($t=0^\circ\text{C}$ та $p=760$ мм рт. ст.); M — коефіцієнт, що залежить в основному від рівномірності розподілу газів по поперечному перерізу шару шихти. Для ідеальних умов (калібрована шихта) $M=1,0$, для шихти з 20% дріб'язку $M=0,5$, для рядової шихти $M=0,3$.

За даними З.Ф.Чуханова нагрів кусків матеріалу в шарі можна розглядати як зовнішню задачу (нехтуючи при цьому тепловим опором кусків матеріалу) тільки при значеннях критерію Біо $Bi < 0,6 \dots 1,0$. Про це не слід забувати під час розрахунку теплообміну в шарі при $Bi > 1,0$.

Підсумковий коефіцієнт теплопередачі K_v , який враховує і внутрішній тепловий опір куска матеріалу, визначається з рівняння

$$\frac{1}{K_v} = \frac{1}{\alpha_v} + \frac{d^2}{72(1-i)\lambda_m} \quad (8.58)$$

При продуванні нерухомого фільтрувального шару матеріалу газами теплообмін здійснюється переважно конвекцією. Це відбувається тому, що через малу товщину шару газів у щілинах між кусками матеріалу роль випромінювання незначна. Враховуючи, що розмір щілин вздовж руху газів є величина змінна, швидкість газів буде пульсуючою, а це сприяє турбулізації потоку теплоносія.

Коефіцієнт тепловіддачі конвекцією α_F для зазначених умов визначається за формулами Тимофеева:

$$\left. \begin{aligned} Nu &= 0,106Re \text{ при } Re=20\dots200, \\ Nu &= 0,61Re^{0,67} \text{ при } Re>200, \end{aligned} \right\} \quad (8.59)$$

де $Nu = \frac{\alpha_F d_e}{\lambda_r}$ — критерій Нусельта, $Re = \frac{w_r d_e}{\nu_r}$ — критерій Рейнольдса.

При користуванні цими формулами швидкість газів w_r треба відносити до площі повного перерізу робочого простору печі, не зайнятого матеріалом. Еквівалентний діаметр кусків матеріалу d_e рекомендується приймати на 25% більше від середнього розміру кусків. Через λ_r та ν_r позначено відповідно коефіцієнти теплопровідності та кінематичної в'язкості газу.

Визначивши α_F , знаходимо α_v за формулою (8.54).

За умови руху щільного шару матеріалу та протитокового продування теплоносія через цей шар теплообмін описується рівняннями

$$\left. \begin{aligned} Nu &= 0,014RePr^{0,33} \text{ при } Re<200, \\ Nu &= 0,056Re^{0,67} \text{ при } Re=200\dots700 \\ &\text{та } Pr=0,68\dots1,1. \end{aligned} \right\} \quad (8.60)$$

Порівнюючи формули (8.59) та (8.60), слід зазначити зниження ефективності теплообміну для умов роботи, коли шихта рухається. Це пояснюється гіршим газорозподілом у рухомому шарі матеріалу.

Розв'язання задачі теплообміну в шарі матеріалу суттєво

спрощується, якщо знехтувати тепловим опором, що відповідає внутрішній задачі, тобто прийняти $R/\lambda=0$, або $Bi=0$.

Прийнято також, що процес передачі теплоти теплопровідністю через шар за рахунок контакту між кусками не відбувається. Для щільного шару з кусків малотеплопровідного матеріалу (руда, вапняк, глина) прийняті припущення в достатній мірі відповідають дійсності. Схематичний розподіл температур газу та матеріалу при їх протитоковому русі та при різних співвідношеннях водяних чисел газу та матеріалу, враховуючи наведені припущення, показаний на рис. 8.23 та 8.24.

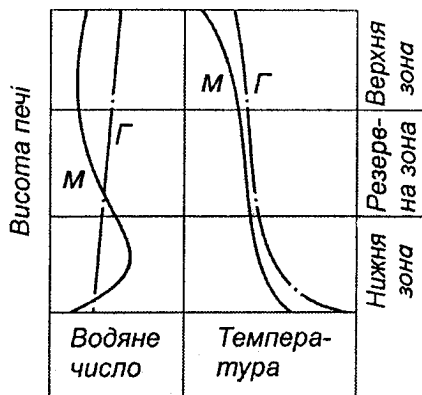


Рис. 8.23. Графік зміни температур технологічного матеріалу (M) та технологічних газів (Γ) по висоті реальної шахтної печі

Б.І.Китаєв вважає, що в шахтних печах можна виділити три характерні зони (ступені) теплообміну (рис. 8.24). Співвідношення водяних еквівалентів (водяних чисел) матеріалу та газів (теплоносія) дають змогу визначити зміну температур матеріалу і газів по висоті печі.

Верхня зона теплообміну доменних, вапняково—випалювальних, газогенераторних та інших печей характеризується режимом $W_{\Gamma} > W_M$, а висота її може бути визначена за формулою

$$H_{\text{в}} = \frac{3w_{\text{м}}c_{\text{в}}}{K_{\text{в}} \left(1 - \frac{W_{\text{м}}}{W_{\Gamma}}\right)} \quad (8.61)$$

де $K_{\text{в}}$ — підсумковий об'ємний коефіцієнт теплопередачі, кВт/($\text{м}^3 \cdot \text{К}$); $w_{\text{м}}$ — швидкість руху (опускання) матеріалу в

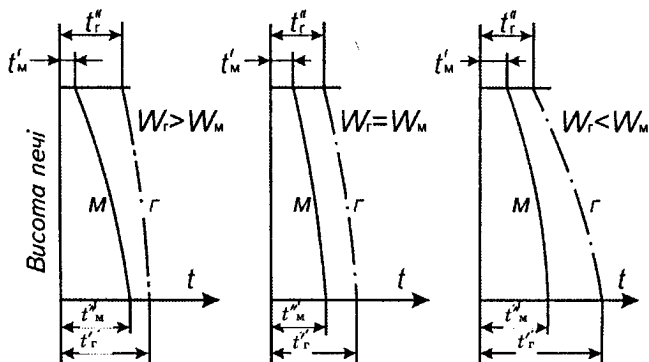


Рис. 8.24. Вплив водяних еквівалентів (чисел) технологічних газів (W_r) та технологічних матеріалів (W_m) на графік зміни температур в шахтних печах

печі, м/с; c_v — питома теплоємність насипного матеріалу шихти, кДж/($\text{м}^3 \cdot \text{К}$).

Нижня зона теплообміну характеризується режимом $W_r < W_m$, а висота її може бути визначена за формулою

$$H_n = \frac{3w_m c_v}{K_v \left(\frac{W_m}{W_r} - 1 \right)}, \quad (8.62)$$

Для шахтних вапняково-випалювальних печей відпрацьовано методику розрахунку висоти зон.

Зону підігріву в шахтній печі зручно розглядати як притоковий теплообмінник, для якого рівняння теплопередачі має вигляд

$$Q_{з.п} = K_{з.п} F \bar{\Delta} t, \quad (8.63)$$

звідки

$$F = \frac{Q_{з.п}}{K_{з.п} \bar{\Delta} t}. \quad (8.64)$$

Для визначення висоти зони підігріву зручно під $Q_{з.п}$ вважати кількість теплоти, переданої в зоні підігріву шихти, що проходить через 1 м^2 площі поперечного перерізу шахти за одиницю часу. Тоді F буде сумарною поверхнею шихти, яка знаходиться в об'ємі, що має площу поперечно-

го перерізу 1 м^2 і висоту $H_{з.п.}$. При цьому

$$H_{з.п.} = F/f, \quad (8.65)$$

де f — площа поверхні кускового матеріалу в одиниці об'єму, яку можна знайти із співвідношення

$$\rho_{к.с.}^{\text{нас}}/f = (d_{к.с.}^{\text{сер}} \rho_{к.с.}^{\text{об}})/(2\Phi), \quad (8.66)$$

де $\rho_{к.с.}^{\text{нас}}$, $\rho_{к.с.}^{\text{об}}$ — насипна та об'ємна густина карбонатної сировини відповідно, які визначаються фізичними властивостями вапняку, $\text{кг}/\text{м}^3$; $d_{к.с.}^{\text{сер}}$ — середній лінійний розмір куску сировини (вапняку), м ; Φ — фактор форми, для вапняку можна приймати $\Phi = 2,75$.

Тоді
$$f = 5,5 \rho_{к.с.}^{\text{нас}} / (d_{к.с.}^{\text{сер}} \rho_{к.с.}^{\text{об}}). \quad (8.67)$$

Значення $Q_{з.п.}$ можна визначити також із рівняння

$$Q_{з.п.} = M_{\text{CaO}} c_{\text{ш}} t_p, \quad (8.68)$$

де M_{CaO} — питома продуктивність печі по вапну (100% CaO) з площі 1 м^2 поперечного перерізу печі, $\text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{год})$; $c_{\text{ш}}$ — теплоємність шихти, $\text{кДж}/(\text{кг CaO} \cdot \text{К})$; t_p — температура, до якої нагрівається шихта в зоні підігріву, тобто до температури розкладу вапняку $t_p = 900^\circ\text{C}$.

Коефіцієнт теплопередачі в зоні підігріву шихти, використовуючи експериментальні дані, можна визначити за формулою

$$K_{з.п.} = \alpha_{з.п.} / [1 + 0,112 \alpha_{з.п.} (d_{к.с.}^{\text{сер}} / \lambda_{к.с.})], \quad (8.69)$$

де $\alpha_{з.п.}$ — коефіцієнт тепловіддачі в зоні підігріву шихти визначається з рівнянь (8.59).

У результаті висота зони підігріву визначиться за формулою

$$H_{з.п.} = \frac{F}{f} = \frac{Q_{з.п.}}{K_{з.п.} \bar{\Delta} t \cdot f} \text{ м}. \quad (8.70)$$

Рівняння для розрахунку теплообміну в зоні підігріву шихти справедливі й для зони охолодження, де теплообмін відбувається між вапном і повітрям, що подається знизу печі.

Висота зони випалювання $H_{з.в.}$ визначається часом, необхідним для повного розкладу вапняку, із співвідношення

$$H_{з.в} = \tau_{п.р} w_{ш}^{ср} \quad (8.71)$$

де $\tau_{п.р}$ — час повного розкладу вапняку максимального розміру, год; $w_{ш}^{ср}$ — середня швидкість руху шихти в зоні випалювання, м/год; $\tau_{п.р}$ та $w_{ш}^{ср}$ визначають за методикою, яка наводиться в спеціальній літературі.

Виходячи з експериментальних досліджень, у зоні випалювання сумарний коефіцієнт тепловіддачі від газів на поверхню вапняку визначають за формулою

$$\alpha_{\Sigma} = \alpha_{к} + \alpha_{р} \approx 4\alpha_{к}, \quad (8.72)$$

де $\alpha_{к}$ — коефіцієнт тепловіддачі конвекцією; $\alpha_{р}$ — коефіцієнт тепловіддачі радіацією (випромінюванням).

8.6.2. Вибір палива та методу його спалювання. Вибір палива здебільшого залежить від технологічних особливостей процесу, що здійснюється в шахтних печах, та способу введення палива в піч.

Можливі такі три способи введення палива в піч:

- 1) безпосередньо в зону високих температур;
- 2) у найхолоднішу частину шару разом з матеріалами, що підлягають тепловій обробці;
- 3) змішаний спосіб, що являє собою комбінацію двох перших способів.

Перший спосіб застосовують шахтних пересипних печах (наприклад, для випалювання вапна). Тут практично можна застосовувати будь-який вид палива — тверде, рідке або газоподібне.

Другий спосіб притаманний для печей з використанням твердого палива (вапняково-випалювальні, доменні та інші шахтні печі).

Спалювання твердого палива в шахтних вапняково-випалювальних печах має деякі специфічні особливості:

- 1) шихта печей містить 7...10% палива, решта являє собою інертну до горіння масу. Тому в печі замість суцільного шару палива утворюються окремі осередки горіння, розділені між собою матеріалом, що обпалюється, формуючи збіднений шар;
- 2) теплота, що виділяється внаслідок згоряння палива,

витрачається на здійснення реакції розкладу CaCO_3 безпосередньо в зоні горіння;

3) повітря, що використовується на процес горіння, попередньо нагрівається в зоні охолодження вапна;

4) кусковий матеріал, який виконує функції колосникової решітки, безпосередньо переміщається. Цей рух суттєво впливає на процес горіння в цілому.

Процес горіння збідненого шару палива так само, як і при горінні суцільного шару, складається з кількох стадій. Спочатку з палива виділяється волога, леткі речовини, паливо нагрівається до температури загоряння (зона підгріву шихти). Коксовий залишок згоряє в зоні випалювання вапна.

Використання газоподібного палива для випалювання карбонатної сировини має низку переваг: низька вартість палива, зручність та легкість дозування газу та регулювання процесу випалювання, спрощення технологічної схеми, а значить скорочення виробничих витрат, отримання більш чистого продукту, що особливо важливо для виробництва карбіду, гіпохлориту кальцію тощо.

Недоліками використання газоподібного палива є: труднощі рівномірного розподілу газу по поперечному перерізу печі, погані умови для перемішування газу з повітрям і як результат — неповнота згоряння газу, відносно низька концентрація CO_2 у пічних газах, що утруднює подальше їх використання в технологічних процесах (наприклад, цукрового виробництва).

Використання рідкого палива потребує спорудження окремої топки, де здійснюється спалювання палива. Продукти згоряння подаються в зону випалювання, що потребує складної системи розподілу їх по поперечному перетину печі.

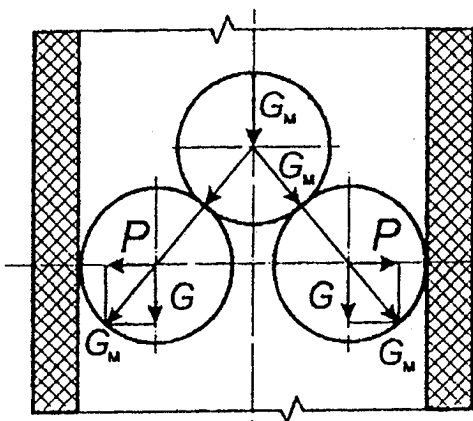
У доменних печах як основне паливо використовується кокс. У верхню частину горна печі через фурми подається повітря, нагріте до високої температури і збагачене киснем. В сучасних доменних печах у верхню частину горна подається також природний газ та водяна пара. У результаті взаємодії всіх цих компонентів з рудою та флюсами утворюється чавун і шлаки, що виводяться з горна через

спеціальні отвори. Гази, що виводяться з верхньої частини доменної печі, називаються доменними. В їх складі достатньо горючих газів, в основному CO і H₂, тому вони використовуються як паливо в технологічному процесі металургійного комплексу.

8.6.3. Рух матеріалів та газів. Рух матеріалів у шахтних печах, що відбувається під дією сили тяжіння, характеризується закономірностями механіки сипучого середовища, тому що відношення діаметра шахти D до діаметра кусків d має значну величину — порядку 100 і більше.

Маса матеріалу шару, що лежить вище, передається на куски матеріалу, а від них на шари, що лежать нижче (G), і на стінки печі (P) — рис. 8.25.

У реальному сипучому середовищі, внаслідок внутрішнього



тертя, в міру збільшення висоти шару матеріалу, маса його передається від куска до куска і потім на стінки печі. Розпірні зусилля зростають настільки, що після того як висота шару H набуває певного значення, вертикальний тиск G зовсім не зростає. Якщо позначити через G_m насипну масу матеріалу в шарі, то величина активної маси становитиме

Рис. 8.25. Розкладання сил, що характеризує передачу тиску в сипучому матеріалі

$$G = K_a \frac{G_m}{F} \quad (\text{т/м}^2), \quad (8.73)$$

де F — поперечний переріз шахти; K_a — так званий коефіцієнт активної маси, який по числовому значенню менше одиниці і різний для різних умов. Коефіцієнт активної маси істотно залежить від форми нижньої частини шахти:

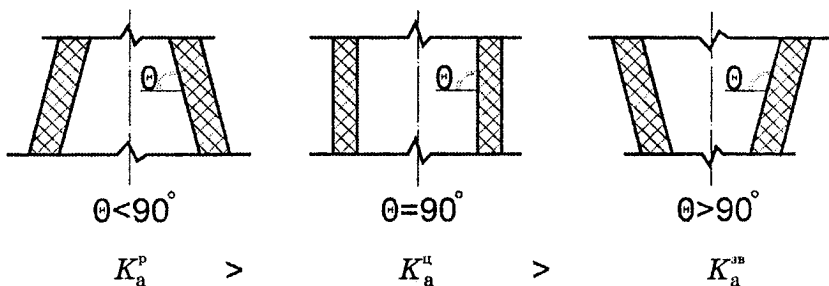


Рис. 8.26. Залежність коефіцієнта активної маси K_a від форми шахти печі $K_a = f(Q)$

розширена до низу, циліндрична, звужена до низу (рис. 8.26). Природно, що K_a залежить також від форми і розмірів кусків та їхніх фізичних властивостей, і визначається дослідним шляхом. Наприклад, активна маса шихти на рівні фурм доменної печі за даними безпосередніх замірів становить приблизно 20%, або $K_a \approx 0,2$ від загальної маси шихти. Це означає, що близько 80% маси шихти сприймається стінками шахти печі.

Спеціальні дослідження показали, що K_a залежить від конфігурації профілю шахти та від величини основного параметра H/D (відношення висоти шахти до її діаметра) і для різних дільниць шахти лежить у межах $0,07 \dots 0,30$.

Величина активної маси G різна для стану спокою, осідання чи витіснення матеріалу вгору. Останнє може мати місцевий характер, наприклад, внизу шахти при накопиченні там рідкого розплаву.

Розподіл активної маси нерівномірний по поперечному перерізу шахти. Наприклад, для циліндричної форми шахти значення G у центрі більше, ніж біля стінок. При осіданні шихти характер розподілу тиску інший, ніж для стану спокою, а саме — тиск у центрі знижується, що спричиняє зменшення G .

Рух матеріалу може проходити безперервно або періодично, плавно або з обвалюванням (за наявності склепінного утворення), але у всіх випадках рух виникає вслід за видаленням матеріалу з нижньої частини шахти. Причини

видалення матеріалу, або зменшення його в об'ємі (розушільнення шару) можуть бути різними, наприклад, зміна структури матеріалу при його термічній переробці, утворення розплаву, вигорання горючих складових та інші.

Для забезпечення нормального руху матеріалів у шахтній печі, крім оптимальних розмірів кусків шихти і рівномірного розподілу їх по перерізу печі, необхідно визначити оптимальні умови засипки та відбору матеріалів, які найбільше відповідають даному профілю шахтної печі. Використання складних профілів шахтних печей (замість циліндричного) служить важливим фактором у вирішенні досить складної задачі про рівномірну роботу шахтної печі в різних її перерізах по висоті.

Рух газів у шарі матеріалу суттєво залежить від того, чи перебуває шар у спокої, чи рухається назустріч газовому потоку. Розподіл газів по перерізу шару визначається силами опору. Опір шару визначається, в основному, місцевими опорами, які істотно залежать від гранулометричного складу матеріалу.

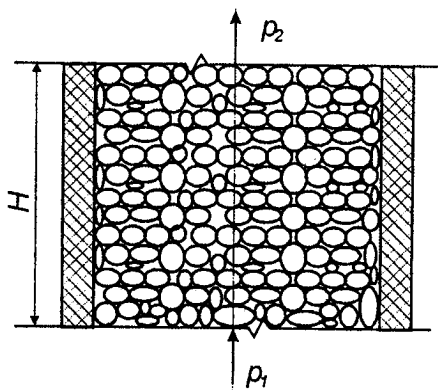


Рис. 8.27. Вплив тиску газу на його перепад у шарі матеріалу

Враховуючи турбулізацію потоку газу при раптових розширеннях чи звуженнях та при різких поворотах, турбулентний режим настає при досить низьких значеннях Re . Наприклад, при $p=2$ бар, $t=1000^{\circ}C$, $d_m=0,05$ м турбулентний режим виникає за швидкості газу $w_T=1,0$ м/с.

Характер руху газів суттєво залежить від перепаду їх тисків на вході та на виході з шару матеріалу в печі $\Delta p=p_1-p_2$ (рис. 8.27).

Зменшення Δp (за рахунок зростання p_2) означає, що знижується опір шару матеріалу в шахтній печі. Це пояснюється тим, що при незмінній масі витрати газу змен-

шується його об'єм, а значить і швидкість руху. Підвищення p_2 (тиск у колошнику доменної печі) відіграє позитивну роль і щодо технології, тому що тривалість перебування газів у шахті збільшується і тим самим зростає тривалість для здійснення технологічних процесів. Умови входу газів у шар та виходу з шару практично можуть впливати на розподіл газів у перерізі шару матеріалу. Наявність порожнього простору над шаром завантаженого матеріалу полегшує розв'язання задачі рівномірного відбору газу.

Більш складним є питання про раціональну подачу в шар дуття. У цьому відношенні шахтні печі поділяються на дві принципово різні групи:

1) печі, в яких агрегатний стан сипучих матеріалів не змінюється;

2) печі, в яких змінюється агрегатний стан сипучих матеріалів, завантажених в шахту.

У печах першого типу подача дуття залежить від способу вивантаження випаленого матеріалу, особливо в старих печах, які працюють на природній тязі. Тут створюються особливо несприятливі умови для розподілення дуття по перерізу шахти. Такі печі схильні до так званого периферійного ходу (коли газу рухаються в основному вздовж стінок печі, тобто по периферії), тому що опір руху газам біля стінок печі менший, ніж на будь-якій відстані від неї.

Пом'якшення ефекту периферійного ходу можна досягти шляхом добору належного профілю шахти, а саме улаштуванням "заплечиків" у нижній частині шахти (звуження) з метою зменшення площі перерізу шахти в місці вивантаження матеріалу, що значно полегшує розподіл повітря по перерізу шахти.

У сучасних печах застосовується, головним чином, центральне вивантаження матеріалу за допомогою механізованих решіток. Це дає змогу забезпечити як рівномірне вивантаження матеріалу, так і рівномірний розподіл дуття по перерізу шахти.

У печах другого типу (доменних печах) у нижній частині шахти розміщується горно-накопичувач для рідких продуктів шахтної плавки, тому тут застосовується виключно периферійне дуття.

Для забезпечення рівномірного розподілу дуття і, як наслідок, рівномірного розподілу газів по поперечному перерізу внизу шахти, дуття подається через кілька фурм, рівномірно розміщених в один чи кілька рядів по колу нижнього перерізу шахти. Із фурм повітря має виходити з швидкістю, яка забезпечує надходження його в центральні зони поперечного перерізу шахти. За цих умов струмина розсовує сипучі матеріали в нижній частині шахти доти, доки тиск струмини не зрівноважиться опором сипучого матеріалу, що витісняється до центру та в різні боки. Таким чином, поблизу фурм утворюється певний об'єм, вільний від щільного шару, який називається фурменою зоною (рис. 8.28, а, б).

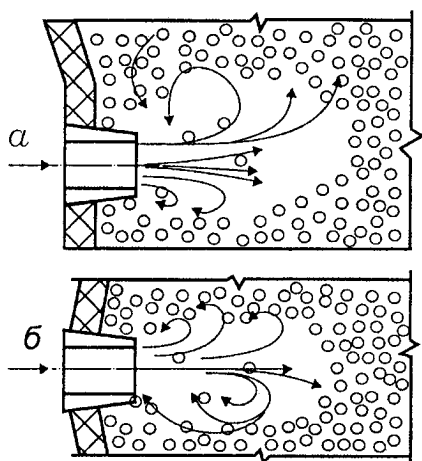


Рис. 8.28. Схема руху газів у фурменій зоні печі:

а — вертикальний переріз по фурмі;
б — горизонтальний переріз

Практично залежно від розмірів перерізу шахти швидкість (дійсна) дуття в фурмах вибирається в межах від 5...8 м/с (вагранки), до 300 м/с (великі доменні печі).

Дуття для доменної печі характеризується параметрами, якими є: швидкість, температура, вміст кисню та води в дутті. Вплив параметрів дуття на процес у шарі визначається, насамперед, впливом на температуру і поширення в шарі кисневої зони.

Нагрів та збагачення дуття киснем підвищує, а

введення води (H_2O) та вуглекислого газу (CO_2) знижує температуру в окисній зоні.

Якщо дуття відносно низького тиску входить у шар із малою швидкістю і тому не порушує структури шару, то вказаний вплив в основному проявляється в дії температур-

ного фактора та складу газової фази на кінетику процесу горіння в шарі.

Процес значно ускладнюється при застосуванні дуття високого тиску, коли утворюється фурмена зона і здійснюється циркуляція газів та твердого палива в межах цієї зони. У даному разі на перебіг процесу, крім температури та складу газової фази, сильніше впливає аеродинамічний фактор.

Збільшення кількості та швидкості дуття, сприяючи збільшенню фурменої зони, позитивно впливає на динаміку матеріалів і газів у шахті.

При нагріванні дуття підвищується температурний рівень шаруватого процесу і скорочується об'єм продуктів згорання на одиницю підведеної теплоти, тому що підвищення фізичної теплоти не зв'язано із збільшенням витрати теплоносія (дуття). Витрата палива скорочується.

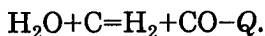
Внаслідок нагріву дуття відбувається деяке скорочення окисної частини фурменої зони, але повний об'єм цієї зони збільшується за рахунок збільшення швидкості дуття. Нагрів дуття істотно впливає на процес теплообміну по всій висоті шару. Пояснюється це зміною водяного числа газів. З ростом температури дуття, при постійній генерації теплоти, в окисній зоні значення W_r зменшується, що приводить до зниження температури у верхніх горизонтах шару, тобто до похолодання колошника печі.

Вплив збагачення дуття киснем на процеси в шарі та в фурменій зоні досить складний і торкається як теплового, так і аеродинамічного факторів. При збагаченні дуття киснем підвищується температура на поверхні гарячого коксу, тому при окисному та нейтральному процесах на холодному дутті підвищується температурний рівень шаруватого процесу. З іншого боку, за незмінної подачі кисню скорочується кількість дуття. Тому середня температура у фурменій зоні практично не змінюється, але змінюється розподіл температур, причому максимальна температура наближається до фурм, а температура наприкінці фурменої зони знижується.

Кількість продуктів згорання на одиницю підведеної

теплоти скорочується за рахунок зниження вмісту азоту в дутті та в продуктах згоряння. Таким чином, збагачення дуття киснем впливає на температурний рівень у певній мірі аналогічно підігріву дуття.

Дія вологи, яка міститься в дутті, протилежна порівняно з нагрівом дуттям. Волога необхідна для створення відповідного середовища за рахунок реакції



Тому для компенсації витрати теплоти на розклад вологи та для збереження попереднього об'єму фурменної зони при збільшенні в дутті вологи підвищують температуру нагріву дуття.

8.6.4. Область застосування та принципи розрахунку. Шахтні печі поширені в промисловості і використовуються для різноманітних технологічних процесів, як нагрівальних, так і плавильних:

1) *нагрівальні печі* — випалювання вапняку, магнезиту, цементного клінкеру, магнітного залізняку, доломіту, глини на шамот;

2) *плавильні печі* — плавка чавуну, чорнової міді з окиснених мідних руд, чорнового свинцю з окиснених свинцевих руд, переплавка чавуну в вагранках.

Технологічні процеси певним чином впливають на теплообмін, спалювання палива, рух газів та матеріалів, а також на конструкцію установки, але не змінюють основ роботи шахтних печей. Важливим, з точки зору загального аналізу, є поділ режимів роботи шахтних печей на три групи: нейтральні (нагрівальні шахтні печі для випалювання нерудних матеріалів, вагранки); відновлювальні (відновлювальна зона в горні доменної печі) та окисні (окисна зона поблизу фурм доменної печі).

За принципом розрахунку шахтні печі поділяються на три групи:

1) печі з окремою топкою чи топковим об'ємом (окисна зона), де паливо згорає повністю; в самій печі екзо- та ендотермічні реакції відсутні (піритна плавка мідних руд, обпалювання шамотної глини);

2) печі з окремою топкою чи топковим об'ємом (окисна зона), де паливо згоряє повністю; у самій печі відбуваються екзо- та ендотермічні реакції технологічного призначення (обпалювання нерудних матеріалів, виплавка штейну з окиснених нікелевих, мідних та свинцевих руд, доменна плавка);

3) печі, в яких теплотехнічний процес і горіння палива протікають в часі та просторі одночасно з екзо- та ендотермічними реакціями технологічного призначення (напівпіритна плавка).

Розрахунок першої групи печей найпростіший і зводиться до розрахунку окремо топки та протитокowego теплообмінника (власне робочого простору печі).

Розрахунок другої групи печей складніший, тому що необхідно враховувати екзо- та ендотермічні реакції, які відбуваються в матеріалі. Б. І. Китаєв удосконалив методику розрахунку шахтних печей, запропонував при розрахунках теплопередачі враховувати внутрішній опір кусків шихти та метод розрахунку по зонах.

Розрахунок третьої групи печей найскладніший і потребує значних експериментальних досліджень.

Контрольні запитання

1. Дайте коротку характеристику роботи ВТУ, в яких використовується режим теплообміну в щільному фільтрувальному шарі.

2. Методика визначення коефіцієнта тепловіддачі для умов теплообміну при продуванні теплоносієм нерухомого та рухомого фільтрувального шару.

3. Методика розрахунку висоти зони підігріву та зони охолодження шахтної вапняково-випалювальної печі.

4. Методика розрахунку висоти зони випалювання вапняку шахтної вапняково-випалювальної печі.

5. Вибір палива та методу його спалювання для шахтних вапняково-випалювальних печей.

6. Як рух матеріалу в шахтній печі та профіль шахтної печі впливають на рух газів у шарі шихти?

7. Як змінюється активна маса матеріалу в шахтній печі

залежно від конфігурації профілю шахти та величини основного параметра печі H/D (відношення висоти печі до її діаметра)?

8. Дайте характеристику подачі дуття в шахтні печі, в яких агрегатний стан сипучих матеріалів не змінюється.

9. Дайте характеристику подачі дуття в шахтні печі, в яких агрегатний стан сипучих матеріалів змінюється.

10. Сфери застосування шахтних печей в промисловості.

8.7. Печі з псевдозрідженим (киплячим) шаром

Псевдозріджений або кипячий шар характеризується особливим станом, при якому частиночки (зерна) зустрічними потоками газу піднімаються і знаходяться неначе всередині шару зі зниженою щільністю. Тут вплив сил тертя між частиночками значно слабкіший, ніж у нерухомому щільному шарі. Це забезпечує рухомість частиночок та можливість їх енергійного перемішування (рис. 5.21).

В установках, які працюють за принципом кипячого шару, велике значення мають швидкість початку псевдозрідження (w'_k) та швидкість витання частиночок (w''_k).

Під швидкістю початку псевдозрідження розуміють ту мінімальну швидкість газу, що проходить через шар зернистого матеріалу, при якій останній починає рухатись ("кипіти"). Її можна визначити за формулою

$$w'_k = \frac{v}{d} \frac{Ar}{1400 + 5,22 \sqrt{Ar}}, \quad (8.74)$$

$$\text{де } Ar = \frac{gd^3(\rho_m - 1)}{v^2(\rho_r)} \text{ — критерій Архімеда;} \quad (8.75)$$

d — діаметр частиночок матеріалу, м; ρ_m , ρ_r — щільність твердих частиночок матеріалу та газу відповідно, кг/м^3 ; v — коефіцієнт кінематичної в'язкості газу, $\text{м}^2/\text{с}$; g — прискорення сили тяжіння, м/с^2 .

Під швидкістю витання розуміють ту максимальну швидкість, при якій частиночки матеріалу будуть виноситися з кипячого шару. Її можна визначити за формулою

$$w''_k = \frac{v}{d} \frac{Ar}{18 + 0,61 \sqrt{Ar}}. \quad (8.76)$$

Швидкість початку зрідження та витання визначається як витратна швидкість, що дорівнює відношенню об'ємної витрати газу ($\text{м}^3/\text{с}$) до площі перерізу камери з киплячим шаром (м^2).

Для сталої роботи псевдозрідженого шару необхідно, щоб витратна швидкість газу знаходилась в межах від w'_k до w''_k . Для практичних аналізів процесу користуються числом псевдозрідження $K=w''_k/w'_k$. Як правило, для дрібних частинок $K=50\dots70$, для крупних — $K=9\dots10$.

8.7.1. Теплопередача. При термічній обробці дрібнозернистих матеріалів у киплячому шарі відбуваються процеси тепло- та масообміну.

При періодичному завантаженні матеріалу в робочу камеру, завдяки хорошему перемішуванню та великій поверхні матеріалу, температура частиночок устанавлюється приблизно однаковою у всьому об'ємі псевдозрідженого шару, а температура гріючого газу поступово знижується по висоті шару. По мірі нагрівання зернистого матеріалу різниця температур між гріючим газом і матеріалом зменшується і в кінці процесу наближається до нуля. Процес нагріву матеріалу при періодичному завантаженні проілюстровано на рис. 8.29, а, де t'_r, t''_r — температура газу

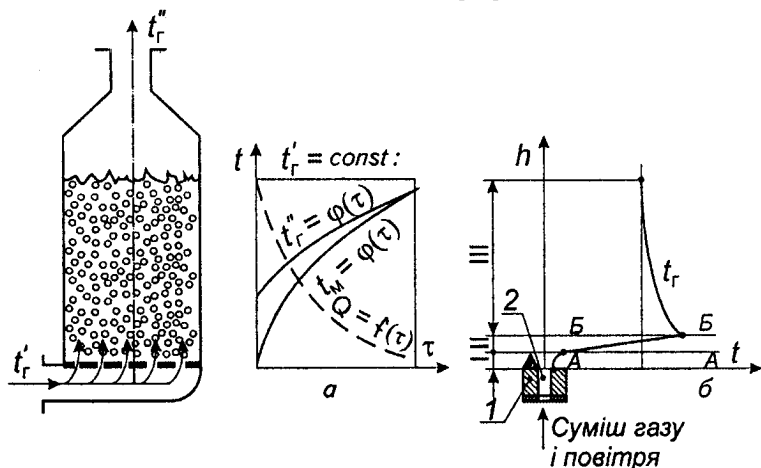


Рис. 8.29. Зміни температур у киплячому шарі:
а — при періодичному завантаженні матеріалу; б — при безперервному завантаженні матеріалу; 1 — решітка; 2 — сопла

відповідно на вході в киплячий шар і на виході з киплячого шару, t_m — кінцева температура матеріалу, Q — кількість теплоти, що передається від газу до матеріалу, τ — тривалість процесу.

При безперервному завантаженні матеріалу температура частиночок по всьому об'єму не однакова, а процес нагріву складніший (рис. 8.29, б). Однак у практичних розрахунках температуру всіх частиночок приймають однаковою. Середню температуру газу визначають як середньоарифметичну температур вхідного і вихідного газів. Різниця температур стає помітною лише в місцях введення теплоносія. Це пояснюється турбулентністю потоку, інтенсивністю циркуляції частиночок та великою площею поверхні контакту з теплоносієм при високій їх теплоємності. Все це приводить до того, що теплообмін закінчується на малій висоті від паликових пристроїв. Тому тут теплообмін не лімітує технологічного процесу. Технологічні параметри псевдозрідженого шару (температура газів та матеріалу) визначаються з рівнянь теплового та матеріального балансів.

Для визначення кількості теплоти, що передається від газу (теплоносія) зернистому матеріалу в киплячому шарі, використовуюється рівняння

$$Q = \alpha F_m \Delta t, \quad (8.77)$$

де α — коефіцієнт тепловіддачі, Вт/(м²·К); F_m — сумарна поверхня теплообміну частиночок матеріалу, що нагрівається, м²; Δt — різниця температур між грійним газом та зернистим матеріалом, °С.

Розрахунок температурного напору Δt виконується на ділянках I, II, III кривої t_r (рис. 8.29, б), з подальшим усередненням.

Визначення поверхні матеріалу в зоні теплообміну здійснюється таким чином. В об'ємі 1 м³ псевдозрідженого шару знаходиться $(1-i)$ м³ матеріалу у вигляді частиночок (i — степінь пористості), число яких дорівнює

$$N_{\text{част}} = \frac{6(1-i)}{\pi d^3};$$

звідки, питома поверхня становить

$$F_{\text{пит}} = N_{\text{част}} \pi d^2 = \frac{6(1-i)}{d}. \quad (8.78)$$

При обчисленні поверхні частиночок неправильної форми замість d слід користуватись еквівалентним його значенням $d_e = \phi d$, де ϕ — фактор форми, який визначається експериментально.

Експериментальні дані для визначення коефіцієнта тепловіддачі α представлені, як правило, у вигляді $Nu = f(Re)$. Наближено його можна визначити з емпіричної формули

$$Nu = 0,316 Re^{0,8} \text{ при } Re = 40 \dots 500; \quad (8.79)$$

$$Re = \frac{w_r d_e}{\nu_r}, \quad (8.80)$$

де w_r — швидкість газів (теплоносія), віднесена до площі решітки, на якій розміщується шар матеріалу, м/с; d_e — еквівалентний діаметр частиночки матеріалу, м; ν_r — кінематична в'язкість газу, м²/с.

Завдяки інтенсивному теплообміну в псевдозрідженому шарі замість рівняння теплообміну, обумовленого значенням α , можна обмежитись розрахунком теплообміну по тепловому балансу.

Киплячий шар є дуже хороший проміжний теплоносіє; завдяки цьому він застосовується для інтенсивного нагріву та охолодження матеріалу.

Механізм теплообміну в такому киплячому шарі уявляється таким чином: частиночки твердого матеріалу стикаються з нагрітою поверхнею, забирають від неї теплоту і переносять в об'єм киплячого шару. Тут ця теплота передається від частиночок матеріалу в газ і виводиться з шару. Постійне оновлення частиночок біля нагрівальної поверхні, внаслідок їх інтенсивного перемішування, висока об'ємна теплоємність і велика поверхня частиночок в одиниці об'єму киплячого шару обумовлюють високе значення коефіцієнта тепловіддачі від поверхні в киплячий шар.

Дослідженнями встановлено, що 80...95% всієї теплоти переноситься зернистими частиночками, що циркулюють, і лише 5...20% передається безпосередньо від поверхні в газ. Добираючи розміри та густину частиночок матеріалу, можна в широких межах регулювати коефіцієнт тепловіддачі.

На рис. 8.30 показана залежність коефіцієнта теп-

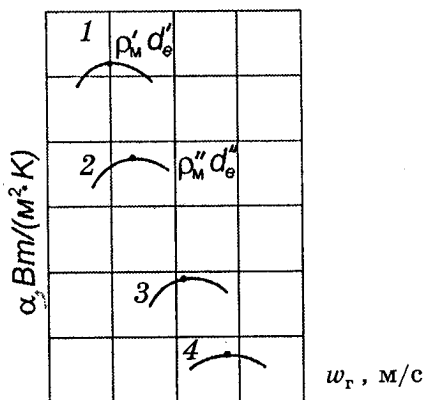


Рис. 8.30. Залежність $\alpha = f(w_r, \rho_m \cdot d_e)$

ловіддачі від киплячого шару на поверхню матеріалу α , від густини ρ_m і розмірів частиночок d_e (лінії 1, 2, 3, 4) при різних швидкостях газового потоку w_r

$$\alpha = f(w_r, \rho_m d_e).$$

Із графіка видно, що зі зростанням w_r для всіх видів частиночок (для різних ρ_m, d_e) величина α проходить через максимум.

Це пояснюється тим, що при збільшенні швидкості газу на α впливають два протилежні фактори: зі зростанням швидкості газу w_r прискорюється зміна частиночок на поверхні (це збільшує α) та одночасно зменшується концентрація частиночок в одиниці об'єму (це зменшує α).

Звідси випливає, що існує певна оптимальна швидкість газу $w_{\text{опт}}$, при якій α набуває максимального значення. Орієнтовно оптимальне значення швидкості газового потоку, що забезпечує максимальну величину коефіцієнта тепловіддачі, можна визначити за формулою

$$w_{\text{опт}} = \frac{v}{d} \frac{Ar}{18+5,22 \sqrt{Ar}}. \quad (8.81)$$

Максимальний коефіцієнт тепловіддачі від киплячого шару на поверхню зануреного в нього тіла можна визначити з рівняння

$$\alpha_{\text{max}} = 35,7 \rho_m^{0,2} \lambda_r^{0,6} d^{-0,36} \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}), \quad (8.82)$$

де ρ_m — густина твердих частиночок матеріалу, $\text{кг}/\text{м}^3$; λ_r — коефіцієнт теплопровідності газу, $\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$; d — діаметр частиночок матеріалу, м.

8.7.2. Вибір палива та методу його спалювання. Для печей, що працюють у режимі псевдозрідження, може застосовуватись тверде, рідке або газоподібне паливо.

Найзручнішим є газоподібне паливо. Газоподібне паливо переважно подають разом з повітрям через решітку, яка розміщується під шаром матеріалу. Попереднього змішування газу та повітря не потрібно, тому що при $\alpha=1,05\dots 1,10$ перемішування забезпечується в шарі, поблизу решітки, через яку поступають компоненти горіння.

Рис. 8.29, б ілюструє процес горіння газу в камері печі киплячого шару, коли кожний отвір у решітці (1) являє собою пальник (2), в який знизу надходить газоповітряна суміш. Після виходу з пальника ця суміш інтенсивно підігривається частиночками матеріалу. Подальше підвищення температури суміші проходить за рахунок згорання газу в межовому шарі, що оточує частиночки матеріалу. Коли температура газів досягає певного рівня, відбувається запалювання суміші (рівень А—А). Висота цього рівня над зрізом пальників визначається інтенсивністю теплообміну між частиночками матеріалу та газоповітряною сумішшю, а також кінетикою реакції. Вище від рівня А—А відбувається горіння газу і одночасно поглинання теплоти частиночками матеріалу. На рівні В—В процес горіння закінчується. Вище від нього знаходиться зона теплообміну між газовим середовищем та частиночками матеріалу. Вказаний спосіб дає змогу організувати процес горіння при мінімально можливих висотах шару. Однак, зона підвищених температур розміщується досить близько до решітки, що може спричинити ускладнення під час експлуатації установки.

Рідке паливо подається в розпиленому стані разом з повітрям через решітку, або інjektується в нижню частину шару. Краплі рідкого палива потрапляють у шар матеріалу, де частково газифікуються і, змішавшись із повітрям, швидко згоряють. Залишки рідкої фракції адсорбуються твердими частинками і згоряють на їх поверхні. Завдяки інтенсивній циркуляції зернистого матеріалу в робочій камері горіння здійснюється у всьому об'ємі кипля-

чого шару. Досвід підтверджує, що при дотриманні коефіцієнта витрати повітря $\alpha=1,15\dots 1,20$ вдається спалювати без недопалу навіть досить важкі сорти рідкого палива, наприклад, мазут.

Тверде паливо можна застосовувати тільки в подрібненому (зернистому) стані. Подають тверде паливо разом з матеріалом, що підлягає тепловій обробці. Розмір частинок палива має бути не дуже малим (щоб вони не виносились з потоку), але й не дуже великим (щоб повністю могли згоріти за час перебування їх у киплячому шарі). Використання вологого палива не бажано не тільки через низьку теплоту згоряння, але також через схильність частинок такого палива до злипання. Рекомендується витримувати $\alpha=1,20\dots 1,30$.

У киплячому шарі можна здійснити повне згоряння палива, регулюючи відповідним чином його витрати.

8.7.3. Рух газів та матеріалу. Процес теплопередачі як всередині киплячого шару, так і від нього до захисних стін камери, повністю залежить від поведінки частинок у шарі. Тепловіддача від частинок до псевдозріджувального середовища і навпаки залежить від реальної різниці температур частинок матеріалу та прилеглих потоків газу, а також швидкості їх руху в об'ємі киплячого шару. Теплообмін киплячого шару із захисними поверхнями залежить від кута, під яким частинки падають на вказані поверхні. Тому знати закономірності руху газів та матеріалів дуже важливо для розуміння процесів у киплячому шарі.

Рух газів і матеріалів у псевдозрідженому шарі вкрай складний і недостатньо досліджений. Щоб одержати характеристичні величини (w'_k, w''_k , опір киплячого шару $\Delta p_{k,ш}$, час перебування частинок матеріалу в киплячому шарі τ), виходять з певної моделі руху в цих умовах.

Перша можлива модель передбачає, що після переходу шару в зріджений стан частинки матеріалу в певній мірі індивідуально реагують з потоком газу. Тоді граничні умови на межі киплячого шару можна записати в такому вигляді:

$$K_d \cdot \frac{\Delta w_{г.в}^2}{2} \rho_r F_M \leq M_{м.в} g + S_{т.в} ; \quad (8.83)$$

для верхньої межі

$$\text{для нижньої межі} \quad \underbrace{K_d \cdot \frac{w_{г.в}^2}{2} \rho_{г.}}_1 F_M \leq \underbrace{M_{м.в} g}_2 + \underbrace{S_{т.н}}_3, \quad (8.84)$$

де 1 — сила тиску потоку газу на частиночку, Н; 2 — сила тяжіння частиночок, Н; 3 — сила тертя частиночки під час її руху, Н; K_d — коефіцієнт динамічного тиску ($K_d = f(\text{Re})$), для плоскої поверхні $K_d = 2$; $\Delta w_{г.в} = w_{г.в} - w_m$ — відносна швидкість потоку газу і частиночки матеріалу на верхній межі шару, м/с; тут $w_{г.в}$, $w_{г.н}$ — швидкість газу відповідно для верхньої та нижньої межі киплячого шару, w_m — швидкість частиночки матеріалу, м/с; $\rho_{г.}$ — густина газу, кг/м³; F_M — "Міделевий" перетин частиночки матеріалу (перпендикулярно до напрямку її руху), м²; $M_{м.в} = M_m - M_{г.}$ — відносна маса частиночки матеріалу, кг; тут M_m — маса частиночки; $M_{г.}$ — маса газу в об'ємі частиночки, кг; g — прискорення вільного падіння, м/с².

Частиночки киплячого шару не утримуються на межі шару, де гравітаційні сили урівноважуються динамічним тиском потоку, а енергійно переміщуються по всьому об'єму шару. Очевидно, причиною цього є пульсації швидкостей і тисків у шарі, що пов'язано з постійною зміною площі перерізу для проходу газів між частиночками. Конкретніше можна сказати, що інтенсивність перемішування в киплячому шарі визначається багатьма обставинами і перш за все тим, що центр дії сили тиску не збігається з центром тяжіння частиночки і остання починає обертатися і цим самим змінює положення поверхні опору. Наявність різниці швидкостей потоку з різних боків частиночки спричинює силу тиску, яка може бути спрямована в будь-який бік. Дія цих сил найбільш відчутна для частиночок неправильної форми.

Користуючись формулами (8.83) та (8.84), не можна визначити характеристичні швидкості w'_k та w''_k через невизначеність величин $S_{т.в}$ та $S_{т.н}$.

Доводиться звертатись до іншої, більш грубої моделі, яка умовно розглядає киплячий шар у цілому як єдине тіло, крізь яке по каналах рухається газ (рис. 8.31).

При швидкостях потоку $w < w'_k$ шар матеріалу залишається нерухомим. Його опір потоку газу зростає з підви-

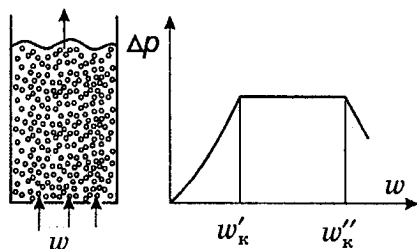


Рис. 8.31. Схема псевдозрідженої системи

щенням швидкості, підкоряючись степеневому закону

$$\Delta p_{\text{к.ш}} = A w^{2-n}, \quad (8.85)$$

де n — показник режиму руху, $n=f(\text{Re})$.

Якщо швидкість газу набуває величини $w'_\text{к}$, то рівновага щільного шару порушується, частиночки матеріалу починають рухатися, а висота та щільність

(порізність) шару збільшуються порівняно з нерухомим шаром. Опір такого псевдозрідженого шару в числовому виразі дорівнює масі матеріалу, що припадає на одиницю площі решітки:

$$\Delta p_{\text{к.ш}} = G_{\text{ш}}/F = (1-i)\rho_{\text{м}}gh, \quad (8.86)$$

де $G_{\text{ш}}$ — сила тяжіння, яка діє на шар матеріалу, що знаходиться у камері, Н; F — площа поперечного перерізу камери, м^2 ; i — порізність шару, тобто відношення об'єму порожнини до об'єму киплячого шару; $\rho_{\text{м}}$ — густина матеріалу, Н/м^3 ; h — висота киплячого шару, м.

Збільшення швидкості потоку не приводить до зростання опору шару, але спричинює подальшу зміну його висоти і щільності. Їх значення змінюється таким чином, щоб добуток $(1-i)h$ залишався сталим. За швидкості потоку $w''_\text{к}$ шар матеріалу виноситься з камери.

Формули (8.74) та (8.76) для визначення швидкостей $w'_\text{к}$ та $w''_\text{к}$, було запропоновано за даними досліджень наведеної моделі.

Час перебування частиночок у киплячому шарі залежить в основному від об'єму цього шару. Якщо позначити через G_0 кількість матеріалу, що надходить у шар, кг/с , $f^{\text{сер}}$ — середнє значення площі перерізу (м^2), $\rho_{\text{м}}$ — густину матеріалу, кг/м^3 , то середню тривалість перебування частиночок у псевдозрідженому стані можна визначити за формулою

$$\tau^{\text{cep}} = \frac{hf^{\text{cep}}(1-i)\rho_{\text{м}}}{G_0 K_v} \text{ (с)}, \quad (8.87)$$

де K_v — коефіцієнт, що враховує зміну об'ємної маси частиночок в процесі теплової обробки матеріалу.

8.7.4. Сфера застосування та принципи розрахунку. Процеси у псевдозрідженому шарі (як теплотехнічні, так і технологічні) відбуваються з дуже великою швидкістю. Температура в усьому шарі практично однакова і легко регулюється.

Режим киплячого шару конструктивно може здійснюватись як в одноподовому так і в багатоподовому варіанті (див. рис. 5.21), коли матеріал перетікає з одного поду на інший і таким чином проходить послідовно декілька стадій обробки. Псевдозріджений шаровий режим застосовується найчастіше у високотемпературних установках, де тепла енергія поглинається під час ендотермічних реакцій матеріалів, що обробляються. У багатьох випадках тепла енергія в таких печах виділяється за рахунок хімічної енергії самого матеріалу, що обробляється (обпалювання концентратів нікелевого фاینштейну, піритних хвостів тощо). Плавлення матеріалів дуже ускладнює конструкцію печей.

Цей вид шарового режиму застосовується в нагрівальних печах для теплової обробки нерудних матеріалів (випалювання вапняку, магнезиту, доломіту), а також деяких концентратів, руд, колчеданів тощо.

Принцип киплячого шару застосовується також і для нагріву виробів із сталі та кольорових металів. Для цього використовується зернистий матеріал, інертний щодо виробів, що нагріваються.

Недоліком нагрівання у псевдозрідженому шарі є винос твердої фази за межі киплячого шару, а також неможливість здійснення протитокового руху матеріалу і газу.

Достатньо точний розрахунок процесу теплообміну у псевдозрідженому шарі поки що здійснити важко, тому користуються узагальненими емпіричними формулами.

Контрольні запитання

1. Дайте означення режиму теплообміну в псевдозрідже-

ному (киплячому) шарі. Роль швидкості руху газів (теплоносія) у створенні такого режиму.

2. Методика розрахунку теплообміну в умовах псевдозрідженого (киплячого) шару.

3. Як впливає швидкість руху теплоносія на коефіцієнт тепловіддачі від киплячого шару на поверхню матеріалу? Якими факторами пояснюється існування оптимальної швидкості газового потоку в киплячому шарі?

4. Вибір палива та методу його спалювання для створення режиму псевдозрідження.

5. Визначення часу перебування частиночки матеріалу в киплячому шарі.

6. Сфери застосування теплообміну в умовах псевдозрідженого шару в ВТУ.

8.8. Печі для процесу в завислому (псевдогазовому) шарі

Завислий стан дрібнозернистого (чи пилоподібного) матеріалу може бути створений при швидкостях газового потоку, що перевищують швидкість витання частиночок даного матеріалу w''_k . На практиці режим завислого шару починається при значеннях числа псевдозрідження $K = w''_k / w'_k = 50 \dots 100$.

Режим завислого шару організують так, щоб час перебування частиночок у реакційній зоні робочого простору печі був не менше часу, необхідного для завершення технологічного процесу теплової обробки. Це однаково стосується як частиночок, що сепаруються в межах робочого простору, так і частиночок, що виносяться з нього. Тому поле швидкостей газу та частиночок в робочому просторі із завислим шаром може бути досить складним.

8.8.1. Теплопередача. Теплообмін у потоці завислого шару матеріалу та газового середовища відбувається інтенсивніше, ніж у псевдозрідженому, а тим більше у нерухомому шарі. На інтенсивність теплообміну дуже впливає швидкість потоку, концентрація частиночок матеріалу в потоці та їх розмір, випромінювання частиночок та стін камери, а також тепловиділення (чи теплопоглинання) в час-

тиночці. Гідродинамічний режим не стаціонарний. Завислі частиночки матеріалу, переміщуючись в газовому потоці, рухаються не тільки поступально, а й обертаються. Тому межовий шар переходить із ламінарного стану в турбулентний за порівняно невеликих значень Re .

Аналітичний розрахунок процесу теплообміну практично неможливий через складність процесу.

Тому теплообмін у завислому шарі розраховують за даними експериментальних досліджень у певному діапазоні початкових параметрів процесу. Наприклад, при $Re=30\dots480$ теплообмін між частиночками матеріалу та газом розраховується за формулою

$$Nu_m = 0,194 Re_m^{0,79}, \quad (8.88)$$

де $Nu_m = \frac{\alpha d_m}{\lambda}$; $Re_m = \frac{w_{г.в} d_m}{\nu}$.

У критеріях Nu_m та Re_m діаметри частиночок d_m приймаються за їхнім еквівалентним діаметром. Швидкість газового потоку в критерії Re_m береться відносна (відносно частиночок матеріалу):

- для висхідного потоку $w_{г.в} = w_{г.} + w''_к$,
- для низхідного потоку $w_{г.в} = w_{г.} - w''_к$.

Тут $w_{г.}$ — абсолютна швидкість газового потоку, м/с; $w''_к$ — швидкість витання частиночок матеріалу, м/с.

При нагріві в завислому шарі полідисперсного матеріалу кожна його фракція буде нагріватись по-різному і до різної температури. При цьому дрібні фракції нагріватимуться до температури, близької до температури теплоносія, швидше, ніж великі.

8.8.2. Вибір палива та методу його спалювання. При тепловій обробці матеріалу в завислому стані може бути використане тверде, рідке та газоподібне паливо. Основні вимоги до палива випливають з того, що процеси в завислому шарі мають закінчитись у межах реакційного простору (їх тривалість вимірюється секундами).

Для спалювання газоподібного та рідкого палива досить забезпечити хороше перемішування палива та повітря в робочій камері. При спалюванні твердого палива (в пи-

лоподібному стані) розмір частиночок має бути таким, щоб забезпечувалось повне згоряння його за час, відведений для здійснення технологічного процесу. Розмір частиночок твердого палива залежить також від вмісту в ньому легких речовин. Чим більший вміст легких речовин у твердому паливі, тим крупніший може бути його фракційний склад. Виділення легких речовин спричинює розтріскування частиночок палива, що веде до збільшення їх реакційної поверхні.

Поєднання в реакційному просторі топкових та технологічних процесів можливе тоді, коли температура, потрібна для здійснення останніх, вища 900°C. Горіння палива в завислому шарі в принципі аналогічне згорянню в факелі.

Особливістю є те, що завислий шар характеризується величезною розжареною поверхнею твердих частиночок матеріалу, що піддаються тепловій обробці. Тому горіння відбувається не тільки в об'ємі, а й на поверхні частиночок, у результаті чого процеси горіння суттєво інтенсифікуються.

8.8.3. Рух матеріалів та газів. При тепловій обробці матеріалів у завислому стані рух газів та частиночок матеріалу пов'язані між собою і їх слід розглядати сумісно. Це впливає з двох основних умов, які визначають теплову роботу завислого шару:

1) тривалість перебування кожної частиночки матеріалу в робочій камері (на шляху від входу в камеру і до виходу з неї) має забезпечувати вимоги теплообміну та технологічного процесу;

2) наприкінці руху пилоподібного потоку в робочій камері мають бути створені умови для можливого найбільш повного видалення пилоподібного матеріалу з потоку.

Рух частиночки в робочій камері визначається комплексом сил, що діють на неї. Рівняння рівноваги цих сил у завислому потоці можна представити у такому вигляді:

$$\underbrace{M_m a}_{S_1} = \underbrace{M_{м.в} g}_{S_{тяж}} + \underbrace{K_d \frac{\Delta w_{г.в}^2}{2} \rho_g F_m + S_{г}}_{S_{п.г}} \geq 0, \quad (8.89)$$

де S_i — інерційна сила; $S_{\text{тяж}}$ — сила тяжіння; $S_{\text{п.г}}$ — тиск потоку газу на частиночку; $S_{\text{т}}$ — сила тертя частиночки; $a = \frac{dw_m}{d\tau}$ — прискорення частиночки. Всі інші величини — див. формулу (8.84).

За умови $a > 0$ частиночка матеріалу рухатиметься прискорено, при $a < 0$ — сповільнено, а при $a = 0$ — рівномірно.

Можливі різні поєднання руху газів та матеріалів: супутний, зустрічний, перехресний (рис. 8.32). У процесі теплової обробки можуть змінюватись розмір частиночок матеріалу та їхні фізичні властивості.

Тверда частиночка, що потрапляє в супутний низхідний потік (рис. 8.32, а, рівняння (8.89)), набуває прискорення ($a > 0$) за рахунок сили тяжіння та під дією тиску набігаючого потоку із тильного боку частиночки. У результаті набутого прискорення швидкість руху частиночки може перевищити швидкість основного газового потоку $w_m > w_g$. Однак, в процесі подальшого руху швидкість частиночки пілу стане постійною (рівноважною), тому що сила тяжіння буде зрівноважена силою опору рухові частиночки.

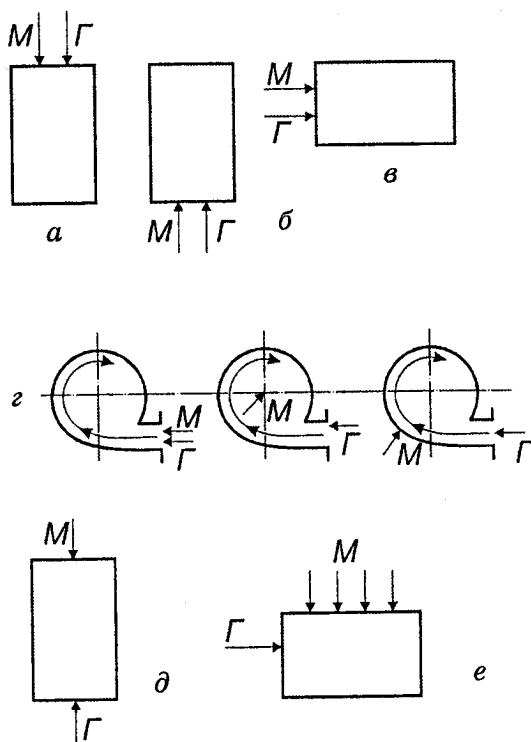


Рис. 8.32. Можливі сполучення руху газів та матеріалів: а — вертикальний низхідний; б — вертикальний висхідний; в — горизонтальний; г — спіралеподібний; д — зустрічний; е — перехресний

Частиночка, що потрапляє в супутний висхідний потік (рис. 8.32, б, рівняння (8.89)), уповільнюватиме свій рух, тому що сила тяжіння діє в напрямку, зворотному рухові потоку. За певного значення відносної швидкості $\Delta w_{г.в.}$ швидкість руху частиночки стане постійною ($w_m = \text{const}$), а прискорення зміниться від від'ємної величини до нуля.

Вертикальний супутний рух газів та матеріалів найчастіше застосовується при обробці відносно дрібного пилю.

Горизонтальний чи похилий рух характеризується початковим напрямком потоку. Кожна частиночка в цьому разі підпадає під вплив сил, що діють під певним кутом, а саме, сили тиску потоку газу, та сили тяжіння (рис. 8.33).



Рис. 8.33. Траєкторія руху частиночок матеріалу в супутному горизонтальному потоці

Швидкість руху матеріалу w_m залежить від розміру та маси частиночок, а також від параметрів середовища.

Тривалість опускання частиночок матеріалу на під печі має бути достатнім як за теплотехнічними, так і технологічними вимогами:

$$\tau = \frac{H}{w_m} \quad (8.90)$$

Горизонтальний чи похилий супутний рух матеріалу доцільно використовувати в плавильних печах.

Зустрічний рух газоподібного потоку та пиловидного матеріалу показано на рис. 8.32, д. Частиночка матеріалу рухається під дією сили тяжіння, зазнаючи гальмування з боку газового потоку, що рухається вгору. Результативна сила, під дією якої частиночка рухається вниз, визначається з рівняння

$$S_{з.р} = M_{м.в} g - \left(K_d \frac{\Delta w_{г.в}^2}{2} \rho_r F_m + S_T \right) \quad (8.91)$$

Під час такого руху можна з успіхом нагрівати більш

крупні частиночки матеріалу. Теплота відхідних газів використовується при цьому повніше, ніж у разі супутного руху. Тривалість осідання частиночок при цьому визначається за формулою

$$\tau = \frac{H}{w_m - w_r^{\text{сеп}}}, \quad (8.92)$$

де $w_r^{\text{сеп}}$ — середня по висоті камери швидкість потоку газу, що рухається вгору.

Можливі й складніші форми руху матеріалу в разі зустрічного руху газу та матеріалу.

Спіралеподібний супутний рух (у циклонній камері). Спіралеподібний супутний рух газу та завислого пилоподібного матеріалу виникає, якщо газовий потік підвести тангенційно в камеру циліндричної форми, яка може розташовуватись горизонтально, похило чи вертикально (див. рис. 8.32, з). При цьому потік твердих частиночок можна ввести з газовим потоком чи окремо від нього, не надаючи чи надаючи частиночкам початкової швидкості. Так, якщо частиночки ввести тангенційно (разом з газовим потоком), то радіальна складова початкової швидкості частиночки дорівнюватиме нулю. Якщо частиночки ввести вздовж осі циклона, то дорівнюватиме нулю тангенційна складова початкової швидкості частиночки. При введенні частиночки перпендикулярно до твірної циклонної камери, як тангенційна, так і радіальна складові початкової швидкості частиночки дорівнюватимуть нулю. За цього виду руху супутні потоки газу та матеріалу рухаються в камері одночасно обертово та поступально, тобто гвинтоподібно. Внаслідок обертового руху потоку тиск по перерізу камери не однаковий. Він зростатиме від осі до периферії, причому різниця тисків залежить від швидкості обертання потоку і може бути досить значною.

На частиночки, завислі в обертовому потоці, діють кілька сил (рис. 8.34):

- 1) тиск потоку газу в тангенційному напрямку $S_{п.г} = K_d \frac{\Delta w_{г.в}^2}{2} \rho_r F_m$;
- 2) відцентрова сила $S_b = \frac{M_m w_m^2}{R}$;

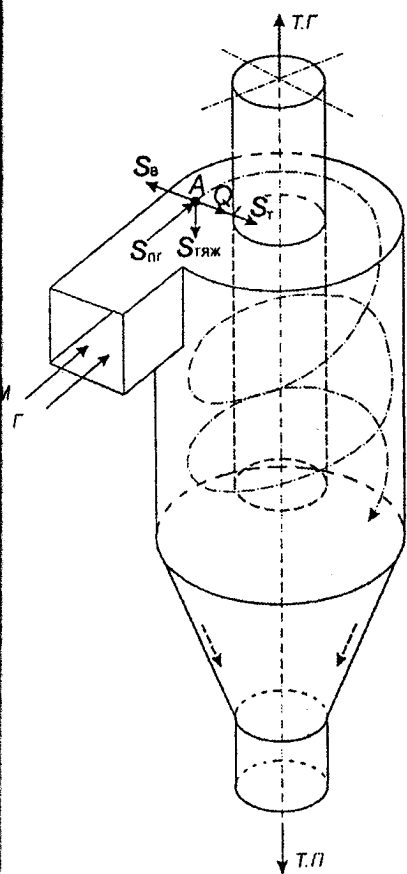


Рис. 8.34. Схема дії сил на частиночку матеріалу в обертovому потоці в циклонній печі

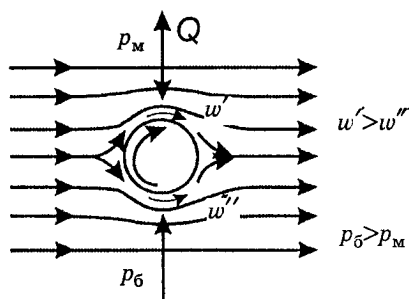


Рис. 8.35. Лінії току та напрямок поперечної сили Q при обтіканні обертovого кругового циліндра

3) поперечна сила (за рахунок ефекту Магнуса) Q ;

4) сила тяжіння частиночки $S_{\text{тяж}} = M_{\text{м.в}}g$;

5) сила опору при переміщенні частиночки в радіальному напрямку $S_{\text{т}}$.

Ефект Магнуса проявляється в тім, що виникає поперечна сила, яка діє на тіло, що обертається в набігаючому на нього потоці рідини чи газу (рис. 8.35). Наприклад, якщо обертovий нескінченно довгий круговий циліндр обтікається безвихровим потоком, спрямованим перпендикулярно до його твірних, то з урахуванням

в'язкості рідини швидкість течії з боку, де напрямок швидкості потоку та обертання циліндра збігаються, збільшується, а з боку, де вони протилежні, — зменшується. У результаті з того боку, де швидкість зменшується, тиск зростає, а з того боку, де швидкість течії збільшується, тиск знижується ($p_{\text{б}} > p_{\text{м}}$), що і створює поперечну силу Q . Значення

поперечної сили визначається з теореми М. Є. Жуковського.

Якщо знехтувати силою тяжіння та поперечною силою, прийняти поверхню частиночок сферичною, розміри їх незмінними, то тривалість проходження частиночкою шляху від осі циклона до його периферії визначається (за умови, що відцентрова сила зрівноважується силою опору середовища, тобто $S_B = S_T$) з формули:

$$\tau = \frac{9}{4} \left(\frac{D}{d} \right)^2 \frac{\rho_r v_r}{\rho_m w_r^2}, \quad (8.93)$$

де D — діаметр циклона, м; d — діаметр частиночки матеріалу, м; ρ_r, ρ_m — густина газового середовища та матеріалу частиночки відповідно, $\text{кг}/\text{м}^3$; v_r — кінематична в'язкість газу, $\text{м}^2/\text{с}$; w_r — швидкість газу, $\text{м}/\text{с}$.

Значення τ буде тим менше, чим менше відношення (D/d) та чим більша швидкість потоку w_r . Однак, досвід показує, що ця залежність справедлива тільки для певних значень швидкостей. При переході швидкості за межі 20...25 $\text{м}/\text{с}$, очевидно, починають впливати фактори, які не враховані під час виведення формули (8.93). Передусім це сили інерції руху частиночки та величини опору середовища. Згідно з рівнянням (8.93) остання підпорядковується не квадратичному закону, а закону Стокса, що справедливо лише для $\text{Re} < 1,5$.

За час τ потік в аксіальному напрямку переміщується на величину

$$x = w_x \tau \text{ (м)}, \quad (8.94)$$

де w_x — поступальна швидкість потоку, яка наближено може бути визначена як частка від ділення об'ємної витрати газу V_r ($\text{м}^3/\text{с}$) на площу радіального перерізу камери, заповненої обертовим потоком, $f_{\text{к.об}}$ (м^2):

$$w_x = V_r / f_{\text{к.об}}.$$

Величина x визначає довжину робочого простору циклона.

Як вказувалося вище, під час руху обертового потоку в циліндричній камері тиск зростає від центру до периферії, при цьому швидкість обертання зростає від периферії до центру, досягаючи максимальної величини на поверхні центральної зони $R_{\text{ц.з}}$ (рис. 8.36).

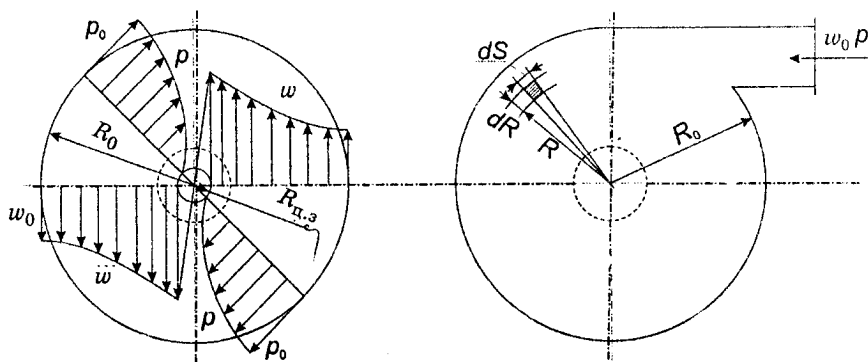


Рис. 8.36. Схема, що ілюструє розподіл швидкостей та тиску в обертовому потоці в циклонній камері

Розглядаючи обертовий потік як потенційний рух ідеальної рідини, можна знайти наближений кількісний зв'язок для зміни тиску в однофазному потоці.

Виділимо в обертовому потоці елементарний об'єм ($v=dR \cdot dS \cdot 1$), де dR , dS та 1 — розміри цього об'єму в радіальному напрямку по колу та в аксіальному напрямку відповідно (рис. 8.36). Виходячи з того, що при усталеному русі відцентрова сила для даного елементарного об'єму має бути рівною зміні тиску (реактивній силі), можна записати

$$m \frac{w_r^2}{R} = F dp, \quad (8.95)$$

де m — маса елементарного об'єму потоку $m = \rho_r v = \rho_r dR \cdot dS \cdot 1$; F — площа поверхні тиску на елементарний об'єм в радіальному напрямку $F = 1 \cdot dS$. Тоді формула (8.95) набуде вигляду

$$\rho_r dR \cdot dS \cdot 1 \frac{w_r^2}{R} = 1 \cdot dS \cdot dp$$

$$\text{звідки} \quad dp = \rho_r \frac{w_r^2}{R} dR \quad (8.96)$$

Одночасно для потенційного руху із закону збереження енергії впливає

$$dp = -\rho_r w_r dw_r. \quad (8.97)$$

Прирівнюючи рівняння (8.96) та (8.97), маємо

$$-Rdw_r = w_r dR,$$

звідки після інтегрування легко одержати так званий закон потенційного обертання:

$$w_r R = \text{const} = A, \quad (8.98)$$

з якого зрозуміло, що чим більша відстань даної точки від центру циклона, тим менша в ній швидкість. Якщо радіус циліндра камери R_0 , а швидкість на вході в камеру w_0 , то очевидно

$$w_r R = w_0 R_0 = \text{const}. \quad (8.99)$$

Підставивши значення w_r з рівняння (8.99) в рівняння (8.96), одержимо

$$dp = \rho_r \frac{w_0^2 \cdot R_0^2}{R^3} dR. \quad (8.100)$$

Початкова потенціальна енергія потоку p_0 в міру наближення до центру перетворюється на кінетичну енергію, причому на відстані $R_{ц.з}$ від центру це перетворення повністю завершується. Відстань $R_{ц.з}$ — радіус центральної зони, на поверхні якої надлишковий тиск дорівнює нулю ($p=0$). Центральна зона обертається як тверде тіло за рахунок сил тертя, що виникають на поверхні поділу. В цій зоні виникає потік у зворотному напрямку, тобто вздовж осі циклону. Рівень тиску в цій зоні залежить від тиску в просторі, з яким ця зона з'єднана.

Інтегруючи рівняння (8.100) в межах від R до R_0 , одержимо рівняння, справедливе при $R > R_{ц.з}$:

$$p = p_0 - \rho_r \frac{w_0^2}{2} R_0^2 \left(\frac{1}{R^2} - \frac{1}{R_0^2} \right). \quad (8.101)$$

Радіус центральної зони обертального потоку легко одержати, якщо у формулі (8.101) прийняти $R = R_{ц.з}$ і $p = 0$:

$$R_{ц.з} = \frac{R_0}{\sqrt{1 + \frac{p_0}{\rho_r \frac{w_0^2}{2} R_0^2}}}. \quad (8.102)$$

Якщо в обертальному потоці газу чи рідини знаходяться

тверді частиночки, то виникає ефект Магнуса, коли на них діє поперечна сила, напрямлена в центр. Згідно з теоремою М. Є. Жуковського ця сила може бути визначена за формулою

$$Q = 4\pi K \rho_r \frac{r^2 A^2}{R^2}, \quad (8.103)$$

де K — коефіцієнт, що визначається експериментально; r — радіус твердої частиночки, м; A — стала величина, визначається з рівняння (8.98).

Рух твердої частиночки в обертовому потоці залежатиме від знака та різниці між центральною силою T і поперечною силою Q :

$$T - Q = \frac{4}{3} \pi \rho_m \frac{r^3 A^2}{R^3} - 4\pi K \rho_r \frac{r^2 A^2}{R^2},$$

або

$$T - Q = 4\pi \left(\frac{rA}{R} \right)^2 \cdot \left(\frac{1r}{3R} \rho_m - K \rho_r \right). \quad (8.104)$$

Зрозуміло, що частиночки матеріалу відкидаються на поверхню циклона, коли виконується умова

$$T - Q > 0, \text{ тобто } \frac{r}{R} > 3K \frac{\rho_r}{\rho_m}.$$

Поперечна сила проявляє себе за малих значень r та ρ_m .

У реальних умовах сили внутрішнього тертя певно суттєво впливають на характеристику потоку, не змінюючи однак його природи.

Вплив ступеня запиленості на швидкість обертового потоку найзручніше оцінювати за допомогою коефіцієнта збереження швидкості

$$\varepsilon = \frac{w_r}{w_{r,вх}} = \frac{\text{швидкість газу в даній точці потоку}}{\text{швидкість газу на вході в потік}} \quad (8.105)$$

8.8.4. Сфера застосування та принципи розрахунку.

Високотемпературні установки із завислим шаром широко застосовуються в промисловості як для нагріву, так і для плавлення матеріалів. Так, в циклонних печах здійснюється спалювання стічних вод, токсичних відходів у

різних агрегатних станах. Циклонні печі використовуються для виробництва сажі, спалювання сірки. Аерофонтанна піч широко застосовується для обпалювання сірчастого колчедану. Вихрові печі є термореакторами загального призначення і використовуються для обпалювання, відновлення та окиснення сипучих матеріалів.

У Національному університеті харчових технологій під керівництвом автора виконано пошукові роботи з проблеми обпалювання фільтраційного осаду (відходи цукробурякового виробництва у вигляді CaCO_3 з органічними домішками). Такий осад після висушування являє собою пилоподібний матеріал і з успіхом може обпалюватись у циклонній печі з метою одержання CaO .

Використовуючи циклонний принцип руху, можна створити компактні за розмірами теплообмінні апарати. Циклонні теплотехнологічні установки мають надзвичайно привабливі перспективи в багатьох галузях народного господарства.

Розрахунки процесу теплообміну в завислому шарі здійснюють на базі дослідних даних, як це показано вище. Розрахунки у сфері термokinетики, з якими пов'язано і визначення необхідної тривалості перебування частинок матеріалу в реакційній зоні, дуже складні. Аналітичні залежності, одержані для одиночної частинки в завислому потоці теплоносія, суттєво змінюються для потоку частинок, які окрім зміни фізичних властивостей стикаються між собою і утворюють більші чи менші угруповання. Це ще більше утруднює виконання розрахунків. Тому при розрахунках теплообміну використовують експериментальні дані, що якнайбільше відповідають умовам роботи цих високотемпературних установок.

Контрольні запитання

1. Поясніть умови створення режиму теплообміну в завислому шарі.
2. Методика розрахунку теплообміну в завислому шарі.
3. Вибір палива та методу його спалювання для забезпечення режиму теплообміну в завислому шарі.

4. Рух газів та частиночок матеріалу за умов теплообміну в завислому шарі.

5. Аналіз комплексу сил, що діють на частиночки матеріалу і визначають характер їх руху в потоці теплоносія.

6. Проаналізуйте характер руху частиночок матеріалу в потоці газу (низхідний, висхідний, горизонтальний, зустрічний).

7. Умови створення спіралеподібного супутного руху газу та завислого матеріалу (в циклонній камері).

8. Проаналізуйте комплекс сил, що діють на частиночки в завислому обертовому потоці. Які з них найбільші і визначають напрямок руху частиночок матеріалу в потоці газу?

9. Методика визначення конструктивних розмірів циклону.

10. Як впливає ступінь запиленості потоку газу на швидкість обертового руху в циклоні?

11. Сфери застосування ВТУ, в яких використовується теплотехнічний принцип теплообміну в завислому шарі.

8.9. Внутрішній теплообмін

8.9.1. Основні поняття і визначення. Процес нагрівання матеріалу та виробів у нагрівальних установках складається із зовнішнього та внутрішнього теплообміну. Обидва процеси відбуваються одночасно і взаємно зв'язані. Задачу нагріву матеріалу можна розв'язати лише шляхом одночасного розгляду обох процесів.

Теплота, що сприймається зовнішньою поверхнею виробів, які нагріваються, поступово передається всередину матеріалу внаслідок його теплопровідності та різниці температур поверхні та внутрішніх шарів матеріалу. Поширення теплоти в твердих тілах, при їх нагріванні чи охолодженні, являє собою несталий (нестационарний) процес і описується рівнянням Фур'є. Це рівняння має найпростіший вигляд для випадку нагрівання нескінченної пластини, коли температурне поле визначається однією координатою x :

$$\frac{\partial t_{\text{м}}}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 t_{\text{м}}}{\partial x^2}, \quad (8.106)$$

де $a = \lambda / (c\rho)$ — коефіцієнт температуропровідності; (c — середня теплоємність матеріалу; ρ — густина матеріалу); t_x — температура матеріалу в точці x у даний момент.

Тепловий потік для пластини (рис. 8.37) визначається з рівняння основного закону теплопровідності:

$$q = -\lambda \frac{\partial t}{\partial x} = \lambda \frac{t_1 - t_2}{\delta}. \quad (8.107)$$

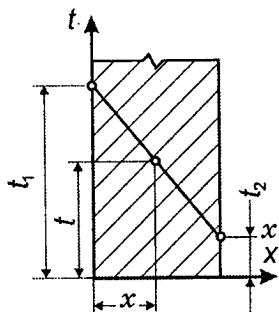


Рис. 8.37. Схема розподілу температури при передачі теплоти теплопровідністю через плоску стінку

Коефіцієнт температуропровідності $a = \lambda / (c\rho)$ характеризує теплоінерційні властивості тіла: чим вище λ , тим швидше підвищується температура при нагріві; чим більша об'ємна теплоємність ($c\rho$), тим повільніше підвищується температура.

Щоб визначити температурне поле для будь-якого моменту часу, тобто розв'язати рівняння (8.106), необхідно знати розподіл температури в початковий момент (початкові умови), геометричну форму тіла і закон теплової взаємодії між навколишнім середовищем та поверхнею тіла (граничні умови). Сукупність початкових та граничних умов називають крайовими умовами.

Розрізняють граничні умови: першого роду, коли задається розподіл температури на поверхні тіла, як функції координат та часу; другого роду, коли відома величина теплового потоку, що передається на поверхню тіла; третього роду, коли задається температурне середовище, що оточує тіло і відомий закон теплообміну між цим середовищем і поверхнею тіла.

Аналіз кондуктивного режиму внутрішнього теплообміну (домінує передача теплоти теплопровідністю) можна значно спростити та полегшити, якщо з'ясувати важливе для теорії печей питання про те, який теплообмін (зовнішній чи внутрішній) є лімітуючим для даного процесу.

8.9.2. Поняття про тонкі та масивні тіла. У теорії нагріву металів розглядається нагрів тонких та масивних

тіл. У тонких тілах перепад температур по перерізу матеріалу такий невеликий, що ним можна знехтувати. При нагріві масивних тіл перепад температур досягає значної величини і його необхідно враховувати в практичних розрахунках (рис. 8.38).

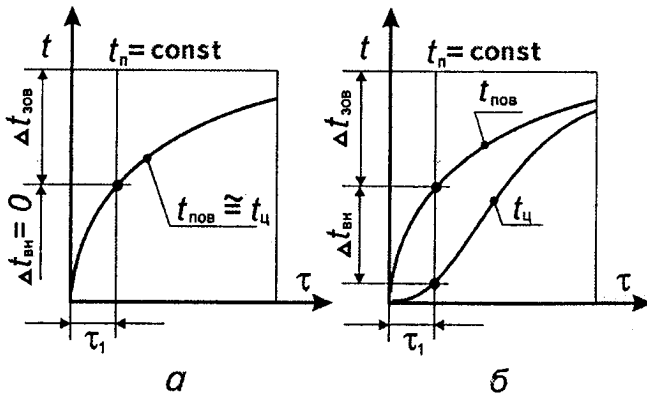


Рис. 8.38. Зміна температури матеріалу, що нагрівається в середовищі $t_n = \text{const}$: а — в тонкому тілі; б — в масивному тілі

Поділ тіл, що нагріваються, на тонкі та масивні є умовним, тому що визначається він не тільки розмірами, а й теплофізичними властивостями матеріалу та швидкістю їх нагрівання.

Тіло, що має великі розміри, при досить повільному нагріванні має незначні перепади температур і може розглядатись як тонке і навпаки.

Для встановлення межі між тонкими та масивними тілами, за рекомендацією Г.П.Іванцова, використовується критерій Біо:

$$Bi = \frac{\alpha}{\lambda} = \frac{\alpha S}{\lambda}, \quad (8.108)$$

де α — коефіцієнт тепловіддачі від навколишнього середовища на поверхню тіла, що нагрівається, Вт/(м²·К); s — товщина тіла, м; λ — коефіцієнт теплопровідності, Вт/(м·К).

Критерій Біо являє собою співвідношення між кількістю теплоти, що передається на поверхню тіла ($\alpha, \text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$), та кількістю теплоти, що відводиться з поверхні тіла вглиб ($\lambda/s, \text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$).

Розв'язання диференційного рівняння теплопровідності сумісно з рівнянням зовнішньої тепловіддачі за постійної температури середовища дає змогу одержати залежність

$$\frac{\Delta t_{\text{вн}}}{\Delta t_{\text{зовн}}} = f(Bi), \quad (8.109)$$

де $\Delta t_{\text{вн}}$ — різниця температур між поверхнею та серединою (центром) матеріалу, що нагрівається, °С (різниця температур внутрішнього теплообміну); $\Delta t_{\text{зовн}}$ — різниця температур між газовим середовищем та поверхнею тіла, що нагрівається (різниця температур зовнішнього теплообміну), див. рис. 8.38.

Якщо значення критерію Біо велике (процес тепловіддачі на поверхню тіла проходить більш інтенсивно, ніж відведення теплоти з поверхні всередину тіла), то процес нагрівання відбувається з великою різницею температур між поверхнею і центром тіла, тобто різниця $\Delta t_{\text{вн}}$ буде значною. Лімітуючим процесом у цьому разі буде внутрішній теплообмін.

Якщо значення критерію Біо мале (процес відведення теплоти всередину тіла інтенсивніший, ніж тепловіддача на поверхню тіла), то різниця температур по перерізу тіла $\Delta t_{\text{вн}}$ буде незначною. У цьому разі внутрішній теплообмін не лімітуватиме процес нагріву тіла.

Г.П.Іванцов запропонував називати тіла тонкими, якщо для нагріву в зазначених умовах $Bi < 0,25$, та масивними, якщо $Bi > 0,5$. Інтервал значень $Bi = 0,25 \dots 0,50$ являє собою перехідну область, котру за точних розрахунків слід віднести до масивних тіл, а за наближених розрахунків — до тонких.

Розрахунок нагрівання тонких тіл значно простіший, ніж масивних, тому що різницею температур по перерізу тіла можна знехтувати, тобто вважати, що в кожний момент температура по всій масі тіла однакова і дорівнює температурі поверхні, тобто $\Delta t_{\text{вн}} = t_{\text{пов}} - t_{\text{ц}} = 0$.

Слід ще раз зауважити, що критерій Біо визначається не тільки розмірами (s чи R) та фізичними властивостями тіла (λ , c , ρ), а й умовами тепловіддачі на поверхню тіла ($\alpha = \alpha_p + \alpha_k$). Тому одне й те саме тіло (зливок, заготовка) у разі нагрівання в середовищі з низькою температурою (тобто при малих значеннях α) може бути віднесене до тонких, а при нагріві в середовищі з високою температурою (при великих значеннях α) може виявитись масивним тілом стосовно нагріву.

За малих значень критерію Біо та звичайних значень $\Delta t_{\text{зовн}}$ перепад температур всередині тіла при нагріванні $\Delta t_{\text{вн}}$ буде незначним (див. рівняння (8.109)) і тіло нагріватиметься рівномірно по товщині. Тому, як зазначалось, внутрішній теплообмін не лімітуватиме процес нагрівання. Процес нагрівання таких тіл завжди лімітується умовами зовнішнього теплообміну. Тому величина F/M (поверхня одиниці маси тіла) відіграє роль головним чином інтенсифікатора зовнішнього теплообміну.

За великих значень критерію Біо перепад температур усередині тіла при його нагріванні ($\Delta t_{\text{вн}}$) може бути значним і залежить від абсолютного значення $\Delta t_{\text{зовн}}$. Рівномірний нагрів по товщині таких тіл можливий тільки за малих значень $\Delta t_{\text{зовн}}$; в усіх інших випадках неминуча значна різниця $\Delta t_{\text{вн}}$, котра при $q = \text{const}$ може зберігатись протягом всього процесу нагрівання. Чим більше q , тим більше $\Delta t_{\text{вн}}$, тому для характеристики даних умов нагрівання можна говорити про міру масивності тіла, як про деяку якісну характеристику. Чим більше Bi , тим більша, очевидно, міра масивності тіла. При $\alpha = \text{const}$ тіло нагріватиметься тим швидше, чим більше λ , та чим менша товщина нагріву s_0 , тобто чим менша міра його масивності, тому що при цьому повільніше зростатиме температура поверхні тіла і, отже, більше значення матиме $\Delta t_{\text{зовн}}$.

Коли величина теплового потоку змінюється ($q = \text{var}$), тоді нагрівання масивного тіла може відбуватися за різних умов, наприклад, на початку нагрівання при великих q тіло поводить себе як масивне ($\Delta t_{\text{вн}}$ — значне за величиною), але наприкінці процесу, коли $\Delta t_{\text{зовн}}$ стане малим, а величи-

на q незначною, тіло, залишаючись формально масивним (тому що при $\alpha = \text{const}$ $Bi > 0,5$), нагріватиметься при малому $\Delta t_{\text{вн}}$, що взагалі характерно для тонких тіл.

Таким чином, критерій Bi не є універсальна величина, що здатна у всіх випадках характеризувати міру масивності тіла. Однак, для випадку, коли $\alpha = \text{const}$, і при малій тривалості інерційного періоду порівняно із загальною тривалістю нагрівання, критерій Bi відповідає цьому призначенню.

Якщо під час нагрівання тіла значення α змінюється ($\alpha = \text{var}$), як це відбувається при радіаційному зовнішньому теплообміні, то замість критерію Bi слід застосовувати критерій Іванцова (або критерій Старка, що одне й те саме)

$$J = \frac{C_{\text{зв}} s}{100\lambda} \left(\frac{T_{\text{п}}}{100} \right)^3 = \frac{10 \cdot C_{\text{зв}} s}{\lambda} \cdot \left(\frac{T_{\text{п}}}{1000} \right)^3, \quad (8.110)$$

де $C_{\text{св}}$ — зведений коефіцієнт випромінювання. Інші величини відомі.

8.9.3. Нагрівання тонких тіл. Задачу про нагрівання тонких тіл розв'язав проф. Б. В. Старк. Диференціальне рівняння, що характеризує процес нагрівання тонкого тіла, має вигляд

$$q_{\text{г.кл} \rightarrow \text{м}} F_{\text{еф}} d\tau = M c dt, \quad (8.111)$$

де $q_{\text{г.кл} \rightarrow \text{м}}$ — сумарний тепловий потік від газу та кладки печі на поверхню тіла, що нагрівається, $\text{кВт}/\text{м}^2$; $F_{\text{еф}}$ — ефективна теплосприймальна поверхня тіла, м^2 ; M — маса тіла, що нагрівається, кг ; c — теплоємність матеріалу, $\text{кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$; τ — час, с ; t — температура, $^{\circ}\text{C}$.

Якщо величину теплового потоку на поверхню тіла виразити через рівняння, яке приводить теплообмін до закону конвекції, тобто

$$q_{\text{г.кл} \rightarrow \text{м}} = \alpha \Delta t = \alpha (t_{\text{п}} - t_{\text{м}}),$$

то одержимо

$$\alpha (t_{\text{п}} - t_{\text{м}}) F_{\text{еф}} d\tau = M c dt. \quad (8.112)$$

Інтегруючи це рівняння і розв'язуючи його відносно часу (рис. 8.39), матимемо

$$\tau = \frac{Mc}{F_{\text{эф}} \alpha} \ln \frac{t_{\text{п}} - t'_{\text{м}}}{t_{\text{п}} - t''_{\text{м}}} \text{ с.} \quad (8.113)$$

Якщо позначити масу тіла $M = V\rho$, кг (V — об'єм тіла, а ρ — густина матеріалу), то

$$\tau = \frac{V}{F_{\text{эф}}} \frac{\rho c}{\alpha} \ln \frac{t_{\text{п}} - t'_{\text{м}}}{t_{\text{п}} - t''_{\text{м}}} \text{ с.} \quad (8.114)$$

У критеріальному вигляді рівняння можна записати

$$\tau = \frac{s^2}{m\alpha \text{Bi}} \ln \frac{t_{\text{п}} - t'_{\text{м}}}{t_{\text{п}} - t''_{\text{м}}} \quad (\text{с}), \quad (8.115)$$

де m — коефіцієнт, $m = f(V/F_{\text{эф}})$; для пластини $m=1$, для циліндра $m=2$, для кулі $m=3$. Інші величини відомі.

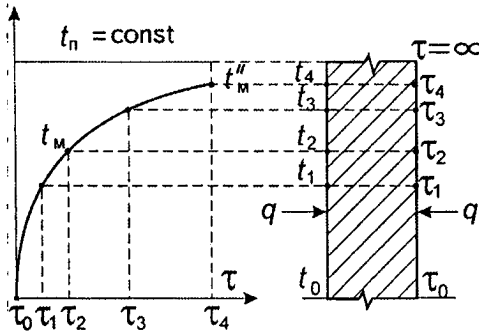


Рис. 8.39. Температурна діаграма нагрівання тонкого тіла при $t_n = \text{const}$

Для печей, що працюють в умовах високих температур, коли радіаційний теплообмін значно перевищує конвективний, приймають:

$$q_{\text{г.кл} \rightarrow \text{м}} = C_{\text{зв}} \left[\left(\frac{T_{\text{п}}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{\text{м}}}{100} \right)^4 \right]_{\text{сер}}. \quad (8.116)$$

Значення $q_{\text{г.кл} \rightarrow \text{м}}$ підставляють у рівняння (8.111), інтегрують і визначають τ . Рівняння для визначення τ при цьому ускладнюється, але значення τ точніше.

Г.П.Іванцов дає розв'язок рівняння (8.111) також для випадку, коли $t_{\text{п}} \neq \text{const}$ і змінюється за законом прямої лінії, тобто $t_{\text{п}} = A\tau + t_0$, °С. Коли $t_{\text{п}}$ змінюється по кривій

лінії, то при розрахунках криву замінюють усередненими прямими, використовуючи відомі розрахункові формули.

8.9.4. Нагрівання масивних тіл. При розв'язанні рівняння Фур'є для пластини (формула (8.106)) одержуємо розподіл температур у перерізі тіла для будь-якого часу, рахуючи від моменту подачі тіла в піч. Температура по товщині тіла розподіляється за законом параболи (рис. 8.40),

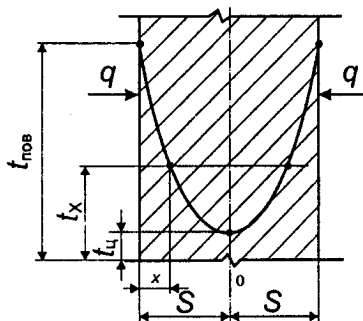


Рис. 8.40. Розподіл температур по перерізу тіла при симетричному нагріванні пластини при умові $t_n = \text{const}$

тому значення температури в будь-якій точці тіла, що знаходиться на відстані x від центра пластини, чи r від осі циліндра, можна визначити за формулою

$$\left. \begin{aligned} t_x &= t_{\text{ц}} + (t_{\text{пов}} - t_{\text{ц}}) \left(\frac{x}{S} \right)^2, \\ t_r &= t_{\text{ц}} + (t_{\text{пов}} - t_{\text{ц}}) \left(\frac{r}{R} \right)^2. \end{aligned} \right\} \quad (8.117)$$

Для практики особливий інтерес являє собою розв'язання задачі за таких крайових умов:

- 1) температура грійного середовища стала, $t_n = \text{const}$;
- 2) тепловий потік на поверхню тіла, що нагрівається, сталий, $q_n = \text{const}$.

8.9.4.1. Нагрівання тіла в середовищі зі сталою температурою $t_n = \text{const}$. Початкові умови: $\tau=0$; $t = t_{\text{поч}} = t_0 = \text{const}$. Граничні умови (третього роду): тепловий потік на поверхню тіла пропорційний різниці температур між грійним середовищем і поверхнею тіла:

$$q_{\text{пов}} \sim \Delta t = t_n - t_{\text{пов}}.$$

Для вказаних умов нагрівання тіл можливі два варіанти, коли теплота на поверхню тіла передається: а) конвекцією і б) випромінюванням.

а) При передачі теплоти на поверхню тіла конвекцією щільність теплового потоку

$$q_{\text{пов}} = \alpha(t_{\text{п}} - t_{\text{пов}}), \quad (8.118)$$

а тепловий потік, що надходить від поверхні всередину тіла, дорівнює

$$q = -\lambda \frac{\partial t}{\partial x}.$$

Граничні умови запишуться так:

$$\alpha(t_{\text{п}} - t_{\text{пов}}) = -\lambda \frac{\partial t}{\partial x} \text{ при } x = \pm s \quad (8.119)$$

Процес нагрівання пластини протікає так, як показано на рис. 8.41. На початку нагрівання температура на по-

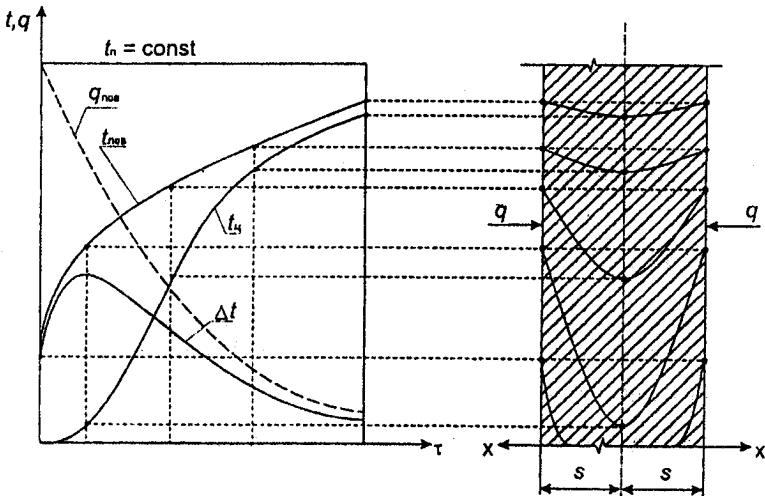


Рис. 8.41. Нагрівання пластини при передачі теплоти конвекцією від середовища з постійною температурою $t_n = \text{const}$

верхні піднімається швидше, ніж у центрі. У міру зменшення різниці температур середовища і поверхні тіла ($\Delta t = t_{\text{п}} - t_{\text{пов}}$) питомий тепловий потік $q_{\text{пов}}$ зменшується і нагрів уповільнюється. В результаті тривалої витримки температура по всьому перерізу пластини дорівнюватиме температурі середовища.

Розв'язання основного диференційного рівняння (рівняння Фур'є) при цих умовах в загальному вигляді дає залежність

$$\Theta_{\text{пов}} = \frac{t_{\text{п}} - t_{\text{пов}}}{t_{\text{п}} - t_0} f \left(\text{Bi}; \text{Fo} \frac{x}{s} \right), \quad (8.120)$$

$$\Theta_{\text{ц}} = \frac{t_{\text{п}} - t_{\text{ц}}}{t_{\text{п}} - t_0} f \left(\text{Bi}; \text{Fo} \frac{x}{s} \right), \quad (8.120')$$

де $\Theta_{\text{пов}}$, $\Theta_{\text{ц}}$ — відносні температури, або міри незавершеності нагріву поверхні і центру тіла;

Θ ще називають безрозмірною температурою будь-якої точки пластини завтовшки $2s$ при її двосторонньому нагріванні в середовищі $t_{\text{п}} = \text{const}$.

$\text{Bi} = \frac{\alpha s}{\lambda}$ — критерій Біо; $\text{Fo} = \frac{a\tau}{s^2}$ — критерій Фур'є, який характеризує подібність процесу поширення теплоти теплопровідністю всередині тіла. Критерій Фур'є є одним з критеріїв гомохромності і називається іноді відносним часом.

Для нагрівання тіл найпростішої форми (нескінченна пластина, нескінченний циліндр, куля) при граничних умовах третього роду є аналітичні розв'язання у вигляді залежності (8.120), але оскільки вони громіздкі, то в технічних розрахунках користуються спеціальними графіками (рис. 8.42, 8.43, 8.44, 8.45).

Порядок розрахунку часу нагріву тіла (τ) до заданої температури ($t_{\text{пов}}$) поверхні такий:

1) визначають величини a , $T_{\text{п}}$, α , Bi , $T_{\text{пов}}$, $\Theta_{\text{пов}}$;

2) користуючись графіком (див. рис. 8.42 — 8.45), при відомих Bi та Θ знаходять критерій Fo ;

3) знаючи $\text{Fo} = \frac{a\tau}{s^2}$, визначають τ :

$$\tau = \text{Fo} \frac{s^2}{a} \text{ с.} \quad (8.121)$$

б) При передачі теплоти на поверхню тіла випромінюванням умови теплообміну між грійним середовищем та поверхнею тіла називаються нелінійними граничними умовами третього роду і записуються так:

$$c_{\text{зв}} \left[\left(\frac{T_{\text{п}}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{\text{пов}}}{100} \right)^4 \right] = -\lambda \frac{\partial t}{\partial x_{\text{при } x=s}}. \quad (8.122)$$

Тут зручніше користуватись абсолютною температурою T .

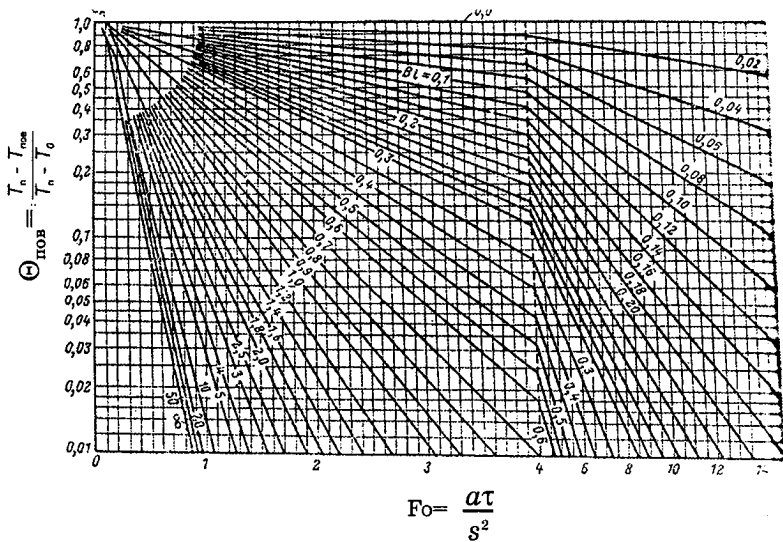


Рис. 8.42. Залежність безрозмірної температури від критеріїв Bi та Fo при нагріванні поверхні пластини для приграничних умов III роду

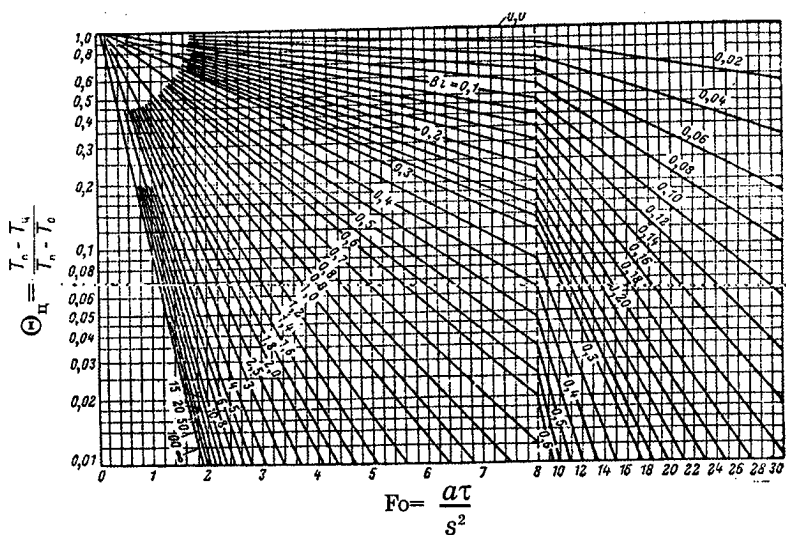


Рис. 8.43. Залежність безрозмірної температури від критеріїв Bi та Fo при нагріванні центра пластини для приграничних умов III роду

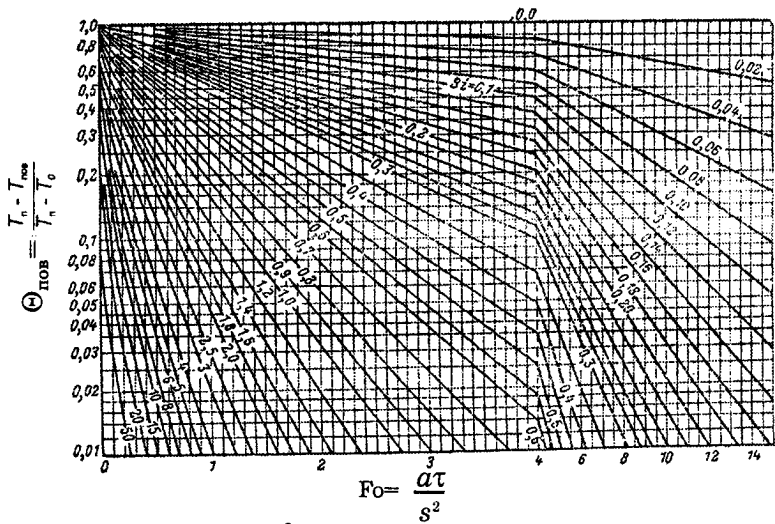


Рис. 8.44. Залежність безрозмірної температури від критеріїв Bi та Fo при нагріванні поверхні циліндра для приграничних умов III роду (для циліндра s відповідає радіусу R)

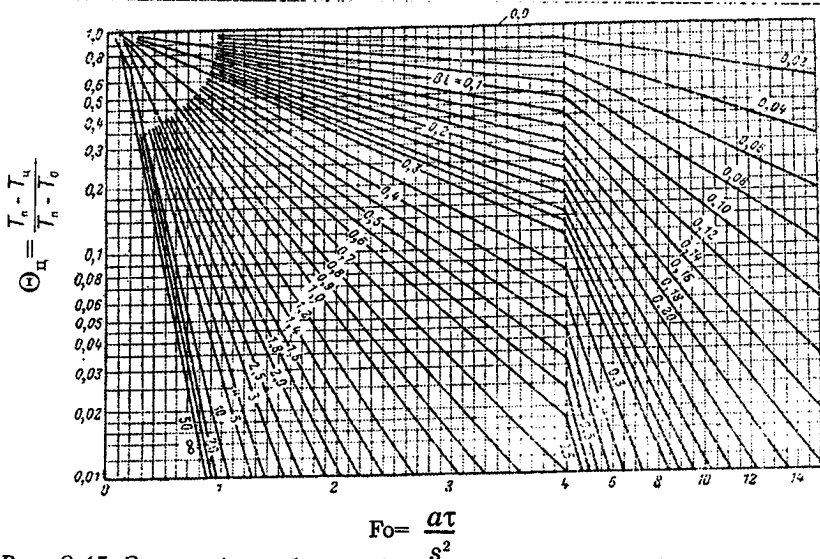


Рис. 8.45. Залежність безрозмірної температури від критеріїв Bi та Fo при нагріванні центра циліндра для приграничних умов III роду (для циліндра s відповідає радіусу R)

Зазначені умови теплообміну досить часто зустрічаються в металургії. Нагрівання проходить аналогічно випадку, наведеному на рис. 8.41.

Розв'язання диференційного рівняння Фур'є (8.106) для даних умов дає залежність

$$\frac{T_m}{T_n} = f\left(F_0; J; \frac{T_m^0 x}{T_n s}\right), \quad (8.123)$$

де T_m/T_n — безрозмірна температура матеріалу на відстані x/s ; x/s — безрозмірна координата товщини пластини; T_m^0 — початкова температура матеріалу, °С; J — критерій Іванцова.

Інші величини відомі.

Для пластини завтовшки $2s$ можна визначити (за Д. В. Будріним) значення критерію Фур'є

$$F_0 = \frac{\Psi_2 - \Psi_1}{J} = \frac{\alpha \tau}{s^2}, \quad (8.124)$$

де $\Psi_1 = f\left(\frac{T_m^0}{T_n}; J\right)$ — функція, яка залежить від відносної температури тіла до нагрівання (середньої за масою) і від критерію J ; $\Psi_2 = f\left(\frac{T_m}{T_n}; J\right)$ — така сама функція, яка залежить від

температури тіла (середньої за масою) наприкінці нагрівання і від критерію J .

Значення функцій Ψ_1 та Ψ_2 визначаються за допомогою допоміжних графіків (рис. 8.46).

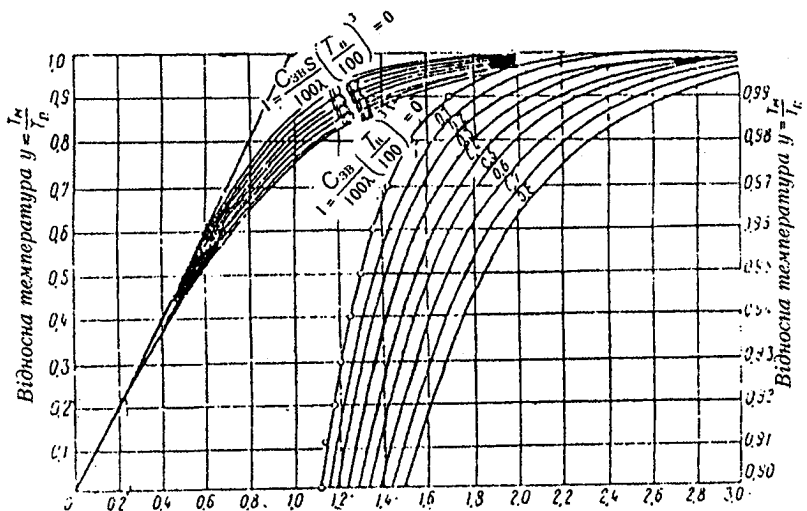
Використовуючи ці залежності, визначають F_0 , а з нього — час нагрівання τ .

8.9.4.2. Нагрівання тіла в середовищі за умови передачі на його поверхню теплового потоку постійної величини $q_n = \text{const}$. Початкові умови: $\tau=0$; $t = t_{\text{пов}} = t_0 = \text{const}$. Граничні умови: $q_n = \text{const}$ (граничні умови другого роду), тобто

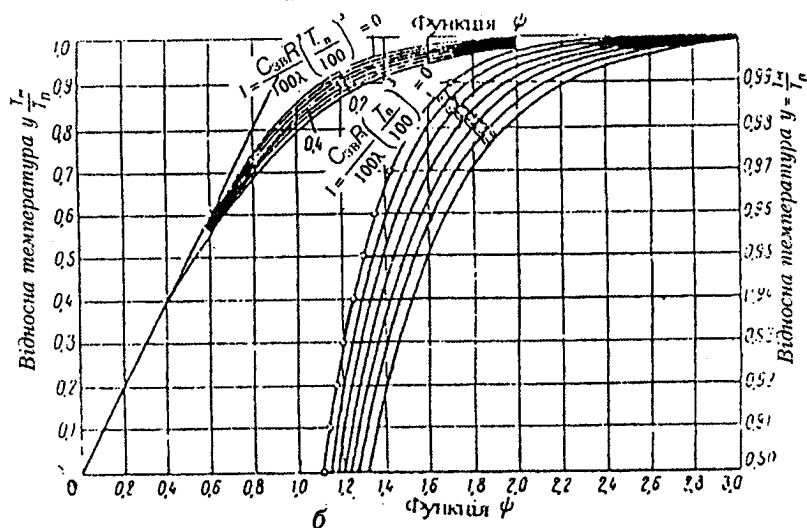
$$q_{\text{пов}} = -\lambda \frac{\partial t}{\partial x_{\text{при } x=+s}} = \text{const}.$$

Нагрівання при $q_n = \text{const}$ зустрічається в методичних і камерних печах.

Розглянемо найпростіший випадок, коли нагрівається



а



б

Рис. 8.46. Допоміжні графіки для розрахунку нагрівання пластини та циліндра (за Д.В. Бударіним): а — нагрівання пластини; б — нагрівання циліндрів.

нескінченна пластина. Нагрівання пластини протікає так, як показано на рис. 8.47. Температурний градієнт на поверхні тіла зберігає сталі значення протягом всього часу

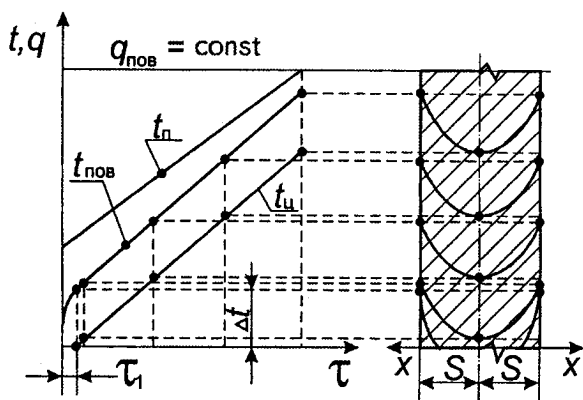


Рис. 8.47. Нагрівання пластини при $q_{\text{пов}} = \text{const}$

нагрівання. Після короткого стабілізаційного періоду настає регулярний тепловий режим і температура у всіх точках тіла змінюється в часі за лінійним законом, а розподіл температур відповідає закону параболи. Розв'язуючи рівняння Фур'є для даних граничних умов, маємо

$$\frac{\lambda(t_x - t_o)}{q_{\text{пов}}s} = f\left(\text{Fo}; \frac{x}{s}\right). \quad (8.125)$$

Враховуючи лінійний характер зміни температури в печі, одержуємо рівняння

$$t_x = \frac{q_{\text{пов}}s}{2\lambda} \left[2 \frac{a\tau}{s^2} + \left(\frac{x}{s}\right)^2 - \frac{1}{3} \right]. \quad (8.126)$$

Для поверхні тіла (при $x=s$)

$$t_{\text{пов}} = \frac{q_{\text{пов}}s}{2\lambda} \left(2 \frac{a\tau}{s^2} + \frac{2}{3} \right). \quad (8.127)$$

Для центра тіла (при $x=0$)

$$t_{\text{ц}} = \frac{q_{\text{пов}}s}{2\lambda} \left(2 \frac{a\tau}{s^2} - \frac{1}{3} \right); \quad (8.128)$$

$$\Delta t = t_{\text{пов}} - t_{\text{ц}} = \frac{q_{\text{пов}} S}{2\lambda}. \quad (8.129)$$

Розрахунки нагрівання зливків та виробів складної геометричної форми є більш трудомісткими і розглядаються в спеціальних навчальних курсах.

Приклад 8.1

Визначити температуру технологічних газів, що виводяться з камерної ковальської печі, в якій нагрівається метал від початкової температури $t_{\text{м}}=20^{\circ}\text{C}$ до кінцевої $t_{\text{м}}=1250^{\circ}\text{C}$.

Ефективна променесприймальна площа поверхні металу — $H_{\text{пр}}=1,1\text{ м}^2$, коефіцієнт випромінювання абсолютно чорного тіла $C_0=5,67\text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$. Для умов цього прикладу можна прийняти: видимий ступінь чорноти топкового простору $\epsilon_{\text{в}}=0,43$ і умовний коефіцієнт забруднення променесприймальної поверхні $\xi_{\text{в}}=0,7$. Коефіцієнт корисної дії камери згоряння приймаємо $\eta_{\text{к}}=0,92$.

У печі спалюється мазут у кількості $B=20 \cdot 10^{-3}$ кг/с, коефіцієнт витрати повітря $\alpha=1,15$.

Склад мазуту, %: $C^{\text{р}}=85,32$; $S^{\text{р}}=1,1$; $H^{\text{р}}=10,0$; $H^{\text{р}}+O^{\text{р}}=0,5$; $A^{\text{р}}=0,08$; $W^{\text{р}}=3,0$.

Розв'язання

1. Розраховуємо процес спалювання мазуту (див. 4.1.1).

1.1. Калорійність мазуту

$$Q_{\text{н}}^{\text{р}} = 339 \cdot C^{\text{р}} + 1030 \cdot H^{\text{р}} - 109 \cdot (O^{\text{р}} - S^{\text{р}}) - 25 \cdot W^{\text{р}} = \\ = 339 \cdot 85,32 + 1030 \cdot 10,0 - 109 \cdot (0,25 - 1,1) - 25 \cdot 3;$$

$$Q_{\text{н}}^{\text{р}} = 39242 \text{ кДж/кг.}$$

1.2. Теоретично необхідний об'єм повітря для спалювання 1 кг мазуту

$$v_{\text{пов}}^{\circ} = 0,0889 \cdot C^{\text{р}} + 0,265 \cdot H^{\text{р}} - 0,0333 \cdot (O^{\text{р}} - S^{\text{р}}) = \\ = 0,0889 \cdot 85,32 + 0,265 \cdot 10,0 - 0,0333 \cdot (0,25 - 1,1);$$

$$v_{\text{пов}}^{\circ} = 10,26 \text{ м}^3/\text{кг.}$$

1.3. Дійсний об'єм повітря, необхідного для спалювання 1 кг мазуту

$$v_{\text{пов}} = v_{\text{пов}}^0 \cdot \alpha = 10,26 \cdot 1,15 = 11,80 \text{ м}^3/\text{кг} .$$

1.4. Об'єм продуктів згоряння

$$v_{\text{п.з}} = v_{\text{CO}_2} + v_{\text{SO}_2} + v_{\text{N}_2} + v_{\text{O}_2} + v_{\text{H}_2\text{O}} .$$

$$1.4.1. v_{\text{CO}_2} = 0,01866 \cdot C^p = 0,01866 \cdot 85,32 = 1,59 \text{ м}^3/\text{кг} .$$

$$1.4.2. v_{\text{SO}_2} = 0,007 \cdot S^p = 0,007 \cdot 1,1 = 0,01 \text{ м}^3/\text{кг} .$$

$$1.4.3. v_{\text{N}_2} = 0,79 \cdot v_{\text{пов}} + 0,008 \cdot N^p = 0,79 \cdot 11,80 + 0,008 \cdot 0,25 ,$$

$$v_{\text{N}_2} = 9,32 \text{ м}^3/\text{кг} .$$

$$1.4.4. v_{\text{O}_2} = 0,21 \cdot (\alpha - 1) \cdot v_{\text{пов}}^0 = 0,21 \cdot (1,15 - 1) \cdot 10,26 = 0,32 \text{ м}^3/\text{кг} .$$

$$1.4.5. v_{\text{H}_2\text{O}} = 0,111 \cdot H^p + 0,0124 \cdot W^p + 0,0161 \cdot v_{\text{пов}} ,$$

$$v_{\text{H}_2\text{O}} = 0,111 \cdot 10,0 + 0,0124 \cdot 3 + 0,0161 \cdot 11,80 = 1,34 \text{ м}^3/\text{кг} ,$$

$$\text{тоді } v_{\text{п.з}} = 1,59 + 0,01 + 9,32 + 0,32 + 1,34 = 12,58 \text{ м}^3/\text{кг} .$$

1.4.6. Склад продуктів згоряння, %:

$$\text{CO}_2 + \text{SO}_2 + \text{N}_2 + \text{O}_2 + \text{H}_2\text{O} = 100\% ,$$

$$\text{де } \text{CO}_2 = \frac{v_{\text{CO}_2}}{v_{\text{п.з}}} \cdot 100 = \frac{1,59}{12,58} \cdot 100 = 12,64 ,$$

$$\text{SO}_2 = 0,08 ; \text{N}_2 = 74,09 ; \text{O}_2 = 2,54 ; \text{H}_2\text{O} = 10,56 .$$

Перевірка:

$$12,64 + 0,08 + 74,09 + 2,54 + 10,65 = 100 \% .$$

1.5. Теоретичну температуру горіння визначаємо з балансового рівняння адіабатного процесу згоряння 1 кг палива, попередньо прийнявши $t_r = 1900^\circ\text{C}$.

Теплоємності компонентів продуктів згоряння приймаємо за температури 1900°C (див. дод.4).

Визначаємо усереднену теплоємність продуктів згоряння за формулою

$$\begin{aligned} \bar{c}_{\text{п.з.}} &= 0,01 \cdot (\text{CO}_2 \cdot c_{\text{CO}_2} + \text{SO}_2 \cdot c_{\text{SO}_2} + \text{N}_2 \cdot c_{\text{N}_2} + \text{O}_2 \cdot c_{\text{O}_2} + \text{H}_2\text{O} \cdot c_{\text{H}_2\text{O}}) = \\ &= 0,01 \cdot (12,64 \cdot 2,4074 + 0,08 \cdot 2,4 + 74,09 \cdot 1,4758 + 2,54 \cdot 1,5617 + \\ &+ 10,65 \cdot 1,9423); \end{aligned}$$

$$\bar{c}_{\text{п.з.}} = 1,646 \text{ кДж}/(\text{м}^3 \cdot \text{К});$$

$$t_{\text{r}} = \frac{Q_{\text{п}}^{\text{р}}}{\bar{c}_{\text{п.з.}} \nu_{\text{п.з.}}} = \frac{39242}{12,58 \cdot 1,646} = 1895^{\circ}\text{C}.$$

Різниця між попередньо прийнятою температурою і визначеною температурою становить $\Delta t = 1900 - 1895 = 5^{\circ}\text{C}$, або 0,26%, що цілком допустимо.

Абсолютна теоретична температура горіння дорівнювати-

$$T_{\text{r}} = t_{\text{r}} + 273 = 1895 + 273 = 2168 \text{ К};$$

$$T_{\text{r}} = 2168 \text{ К}.$$

2. Температуру відхідних технологічних газів визначаємо, використовуючи методіку критеріального розрахунку зовнішнього теплообміну в робочих камерах високотемпературних установок (див. п.8.2.1).

Розв'язуємо квадратне рівняння

$$\left(\frac{m}{\text{Bo}} \cdot \varepsilon_{\text{в}} \xi \right) \cdot \theta_{\text{т.г.}}^2 + \theta_{\text{т.г.}} - 1 = 0,$$

$$\text{або } a \cdot \theta_{\text{т.г.}}^2 + b \cdot \theta_{\text{т.г.}} + c = 0,$$

$$\text{де } a = \left(\frac{m}{\text{Bo}} \cdot \varepsilon_{\text{в}} \xi \right); b = 1; c = -1.$$

2.1. Попередньо визначаємо безрозмірні температури:

а) початкову металу

$$\theta'_{\text{м}} = \frac{T'_{\text{м}}}{T_{\text{r}}} = \frac{t'_{\text{м}} + 273}{T_{\text{r}}} = \frac{20 + 273}{2168} = 0,135;$$

б) кінцеву металу

$$\theta_m'' = \frac{T_m''}{T_r} = \frac{t_m'' + 273}{T_r} = \frac{1250 + 273}{2168} = 0,703 ;$$

в) технологічних газів

$$\theta_{т.г.} = \frac{T_{т.г.}}{T_r} \quad (\text{визначається з квадратного рівняння}).$$

2.2. Визначаємо середню теплоємність технологічних газів, що відводяться з робочої камери, попередньо прийнявши $t_{т.г.} = 1350^\circ\text{C}$. Відповідні теплоємності компонентів технологічних газів (див. дод. 4) такі:

$$\begin{aligned} \bar{c}_r &= 0,01 \cdot (\text{CO}_2 \cdot c_{\text{CO}_2} + \text{SO}_2 \cdot c_{\text{SO}_2} + \text{N}_2 \cdot c_{\text{N}_2} + \text{O}_2 \cdot c_{\text{O}_2} + \text{H}_2\text{O} \cdot c_{\text{H}_2\text{O}}) = \\ &= 0,01 \cdot (12,65 \cdot 2,3017 + 0,08 \cdot 2,31 + 74,09 \cdot 1,430 + 2,54 \cdot 1,5154 + \\ &+ 10,65 \cdot 1,8154) = 1,584 \text{ кДж}/(\text{м}^3 \cdot \text{К}). \end{aligned}$$

2.3. Визначаємо критерій Больцмана (див. рівняння (8.31)):

$$\text{Bo} = \frac{B \cdot v_r \cdot \bar{c}_r \cdot \eta_k}{10 \cdot C_o \cdot H_{\text{пр}} \cdot \left(\frac{T_r}{1000}\right)^3} = \frac{20 \cdot 10^{-3} \cdot 12,58 \cdot 1,584 \cdot 0,92}{10 \cdot 5,67 \cdot 10^{-3} \cdot 1,1 \cdot \left(\frac{2168}{1000}\right)^3} ;$$

$$\text{Bo} = 0,578 .$$

2.4. Визначаємо

$$m = \sqrt{1 - (\theta_m'')^4} = \sqrt{1 - 0,703^4} = 0,869 ;$$

$$a = \frac{m}{\text{Bo}} \cdot \varepsilon_B \cdot \xi = \frac{0,869}{0,578} \cdot 0,43 \cdot 0,7 = 0,452 ;$$

$$b = 1 ,$$

$$c = -1 .$$

2.5. Квадратне рівняння матиме вигляд

$$0,452 \cdot \theta_{т.г.}^2 + 1 \cdot \theta_{т.г.} + (-1) = 0 .$$

Розв'язуючи це рівняння, визначаємо

$$\theta_{т.г.} = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a} = \frac{-1 + \sqrt{1 - 4 \cdot 0,452 \cdot (-1)}}{2 \cdot 0,452} = 0,748 .$$

Знаходимо абсолютну температуру технологічних газів, що виводяться з печі:

$$T_{\text{т.г.}} = T_{\text{г}} \cdot \theta_{\text{т.г.}} = 2168 \cdot 0,748 = 1622 \text{ К},$$

та температуру за стоградусною шкалою:

$$t_{\text{т.г.}} = T_{\text{т.г.}} - 273 = 1622 - 273 = 1349 \text{ } ^\circ\text{С}.$$

Різниця між попередньо прийнятою та визначеною розрахунком температурою становить

$$\Delta t_{\text{т.г.}} = 1350 - 1349 = 1 \text{ } ^\circ\text{С},$$

або 0,07%, що цілком допустимо.

Таким чином, температура технологічних газів, що виводяться з камери ковальської печі, для заданих умов її роботи дорівнює $t_{\text{т.г.}} = 1349^\circ\text{С}$.

Приклад 8.2

Камерна ковальська піч безперервної дії призначена для нагрівання сталевих заготовок (сталь-У8).

Визначити витрату палива для конкретних умов роботи печі.

Паливо — мазут складу, %:

$$C^p = 83,38; H^p = 10,9; S^p = 1,60; H^p + O^p = 0,62; W^p = 3,4; A^p = 0,10.$$

Коефіцієнт витрати повітря $\alpha = 1,15$. Втрати теплоти від хімічного недопалу $q_{\text{х.н}}$ становить 1,6% від теплоти згоряння палива. Втрати теплоти від механічного недопалу можна прийняти $q_{\text{м.н}} = 0$. Продуктивність печі $G = 750$ кг/год. Заготовки нагріваються від $t_{\text{т.м}} = t_{\text{ст}} = 10^\circ\text{С}$ до $t_{\text{т.п}} = t_{\text{ст}} = 1250^\circ\text{С}$. Температура відхідних технологічних газів $t_{\text{т.г}} = t_{\text{в.г}} = 1300^\circ\text{С}$. Вигар металу становить $\delta = 2,0\%$. Втрати теплоти в навколишнє середовище $Q_{\text{н.с}} = 145$ кВт.

Розв'язання

1. Розраховуємо процес горіння палива

$$Q_{\text{н}}^p = 339 \cdot C^p + 1030 \cdot H^p - 109 \cdot (O^p - S^p) - 25 \cdot W^p;$$

$$Q_{\text{н}}^p = 339 \cdot 83,38 + 1030 \cdot 10,9 - 109 \cdot (0,31 - 1,6) - 25 \cdot 3,4;$$

$$Q_{\text{н}}^p = 39548 \text{ кДж/кг}.$$

Об'єм теоретично необхідного повітря для спалювання 1 кг палива

$$v_{\text{пов}}^{\circ} = 0,0889 \cdot C^p + 0,265 \cdot H^p - 0,0333 \cdot (O^p - S^p);$$

$$v_{\text{пов}}^{\circ} = 0,0889 \cdot 83,38 + 0,265 \cdot 10,9 - 0,0333 \cdot (0,31 - 1,6) = 10,259 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Дійсний об'єм повітря

$$v_{\text{пов}} = v_{\text{пов}}^{\circ} \cdot \alpha = 10,259 \cdot 1,15 = 11,798 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Об'єм компонентів продуктів згоряння палива:
вуглекислого газу

$$v_{\text{CO}_2} = 0,01866 \cdot C^p = 0,01866 \cdot 83,38 = 1,556 \text{ м}^3/\text{кг};$$

оксиду сірки

$$v_{\text{SO}_2} = 0,007 \cdot S^p = 0,007 \cdot 1,6 = 0,011 \text{ м}^3/\text{кг};$$

азоту

$$v_{\text{N}_2} = 0,79 \cdot v_{\text{пов}} + 0,008 \cdot N^p = 0,79 \cdot 11,789 + 0,008 \cdot 0,31 = 9,323 \text{ м}^3/\text{кг};$$

кисню

$$v_{\text{O}_2} = 0,21 \cdot (\alpha - 1) \cdot v_{\text{пов}} = 0,21 \cdot (1,15 - 1,0) \cdot 10,259 = 0,323 \text{ м}^3/\text{кг};$$

водяної пари

$$v_{\text{H}_2\text{O}} = 0,111 \cdot H^p + 0,0124 \cdot W^p + 0,0161 \cdot v_{\text{пов}} = \\ = 0,111 \cdot 10,9 + 0,0124 \cdot 3,4 + 0,0161 \cdot 11,789 = 1,442 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Повний об'єм продуктів згоряння (відхідних технологічних газів) дорівнює

$$v_{\text{п.з}} = v_{\text{т.г}} = v_{\text{в.г}} = v_{\text{CO}_2} + v_{\text{SO}_2} + v_{\text{N}_2} + v_{\text{O}_2} + v_{\text{H}_2\text{O}} = \\ = 1,556 + 0,011 + 9,323 + 0,323 + 1,442 = 12,655 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

2. Питома витрата палива (на 1 кг технологічного продукту, тобто сталевих заготовок) може бути визначена за формулою

$$b = \frac{Q_{\text{техн}} + Q'_{\text{н.с}}}{Q_{\text{н}}^p \cdot \eta_{\text{в.т}}}.$$

де $Q_{\text{тех}}$ — теплота, що витрачається на здійснення технологічного процесу:

$$Q_{\text{тех}} = Q_{\text{т.п}} - Q_{\text{т.м}} + (Q_{\text{т.в}} + Q_{\text{енд}}) - Q_{\text{екз}},$$

тут $Q_{\text{т.п}}$ — теплота технологічного продукту, що виводиться з печі (сталіні заготовки нагріті до температури $t''_{\text{ст}} = 1250^\circ\text{C}$):

$$Q_{\text{т.п}} = 1 \cdot c''_{\text{ст}} t''_{\text{ст}}.$$

Теплоємність сталі У8 за температури $t''_{\text{ст}} = 1250^\circ\text{C}$ становить $0,695 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$ (див. дод. 13), тоді

$$Q_{\text{т.п}} = 1 \cdot 0,695 \cdot 1250 = 869 \text{ кДж}/\text{кг};$$

$Q_{\text{т.м}}$ — теплота технологічного матеріалу, що вводиться в піч (сталіні заготовки при температурі $t_{\text{ст}} = 10^\circ\text{C}$).

Теплоємність сталі У8 за температури 10°C становить

$$c'_{\text{ст}} = 0,47 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К});$$

$$Q_{\text{т.м}} = 0,47 \cdot 10 = 4,7.$$

Приймаємо $Q_{\text{т.м}} \cong 5 \text{ кДж}/\text{кг}$;

$Q_{\text{т.в}}$ — теплота технологічних відходів. Для умов цього прикладу це теплота, що виводиться із печі з окалиною, і визначається з рівняння

$$Q_{\text{т.в}} = Q_{\text{ок}} = G_{\text{ок}} \cdot c_{\text{ок}} \cdot t_{\text{ок}} \text{ (кДж}/\text{кг}),$$

де $G_{\text{ок}}$ — кількість окалини (на 1 кг металу), що утворюється в печі

$$G_{\text{ок}} = \frac{\delta}{100} \cdot m \text{ кг}/\text{кг};$$

δ — вигар металу $\delta = 2,0\%$ (заданий);

m — кількість окалини (кг), що утворюється при окисненні 1 кг заліза; рекомендується приймати $m = 1,38 \text{ кг}/\text{кг}$:

$$G_{\text{ок}} = \frac{2,0}{100} \cdot 1,38 = 0,0276 \text{ кг}/\text{кг};$$

$c_{\text{ок}}$ — теплоємність окалини, можна приймати

$$c_{\text{ок}} = 1,26 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К});$$

$t_{\text{ок}}$ — температура, з якою окалина виводиться з печі:

$$t_{\text{ок}} = t''_{\text{ст}} = 1250^\circ\text{C};$$

$Q_{т.в} = 0,0276 \cdot 1,26 \cdot 1250 \approx 43$ кДж/кг;
 $Q_{енд}$ — теплота ендотермічних реакцій; $Q_{енд} = 0$;
 $Q_{екз}$ — теплота екзотермічних реакцій; для умов прикладу це теплота, що виділяється при окисненні сталі (вигару):

$$Q_{екз} \approx 5652 \cdot \frac{\delta}{100} = 5652 \cdot \frac{2,0}{100} = 113 \text{ кДж/кг};$$

тут 5652 кДж/кг — теплота згоряння сталі (див. 9.2).

Теплота, що витрачається на технологічний процес, складатиме

$$Q_{техн} = 869 - 5 + (43 + 0) - 113 = 794 \text{ кДж/кг};$$

$Q'_{н.с.}$ — втрата теплоти в навколишнє середовище, кДж/кг (технологічного матеріалу):

$$Q'_{н.с.} = \frac{Q_{н.с.} \cdot 3600}{G} = \frac{145 \cdot 3600}{750} = 696 \text{ кДж/кг},$$

де $Q_{н.с.} = 145$ кВт (задано); $\eta_{в.т}$ — коефіцієнт використання теплоти палива за умови, що $t_{т.г} = t_{в.г}$, визначається за формулою

$$\eta_{в.т} = 1 + \frac{j_{пал} + j_{пов}}{Q_H^p} - \frac{Q_{х.н} + Q_{м.н} + j_{в.г}}{Q_H^p},$$

де $j_{пал}$ — питома ентальпія палива (мазуту) за температури $t_{пал} = 90^\circ\text{C}$ (мазут нагрівається для покращення розпилювання), $j_{пал} = 1 \cdot c_{пал} \cdot t_{пал}$; $c_{пал}$ — теплоємність палива (для мазуту рекомендується приймати $c_{пал} = 2,1$ кДж/кг,

$j_{пал} = 1 \cdot 2,1 \cdot 90 = 189$ кДж/кг; $j_{пов}$ — питома ентальпія повітря, що надходить для згоряння 1 кг палива при $t_{пов} = 10^\circ\text{C}$:

$$j_{пов} = v_{пов} \cdot c_{пов} \cdot t_{пов},$$

для умов прикладу при $t_{пов} = 10^\circ\text{C}$ приймається

$$c_{пов} = 1,297 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{K)},$$

$$j_{пов} = 11,798 \cdot 1,297 \cdot 10 = 153 \text{ кДж/кг};$$

$Q_{х.н}$ — втрати теплоти від хімічного недопалу, кДж/кг (палива):

$$Q_{х.н} = \frac{q_{х.н}}{100} \cdot Q_H^p = \frac{1,6}{100} \cdot 39548 = 633 \text{ кДж/кг},$$

де $q_{х.н} = 1,6\%$ (задано);

$Q_{м.н}$ — втрати теплоти від механічного недопалу (задано $q_{м.н} = 0$): $Q_{м.н} = 0$;

$j_{в.г}$ — втрата теплоти з технологічними відхідними газами при $t_{в.г} = 1300^{\circ}\text{C}$,

$$j_{в.г} = v_{\text{CO}_2} \cdot c_{\text{CO}_2} + v_{\text{SO}_2} \cdot c_{\text{SO}_2} + v_{\text{N}_2} \cdot c_{\text{N}_2} + v_{\text{O}_2} \cdot c_{\text{O}_2} + v_{\text{H}_2\text{O}} \cdot c_{\text{H}_2\text{O}} \cdot t_{в.г}.$$

Теплоємності компонентів згоряння палива (кДж/(м³·К)) приймаємо за температури 1300°C (див. дод. 4):

$$c_{\text{CO}_2} = 2,2898; c_{\text{SO}_2} = 2,295; c_{\text{N}_2} = 1,4252; c_{\text{O}_2} = 1,5106; c_{\text{H}_2\text{O}} = 1,8028.$$

Об'єми компонентів згоряння палива визначені в розрахунках процесу згоряння палива:

$$j_{в.г} = (1,556 \cdot 2,2898 + 0,011 \cdot 2,295 + 9,323 \cdot 1,4252 + 0,323 \cdot 1,5106 + 1,442 \cdot 1,8028) \cdot 1300 = 25952 \text{ кДж/кг},$$

тоді

$$\eta_{в.г} = 1 + \frac{189 + 153}{39548} - \frac{633 + 0 + 25952}{39548} = 0,336.$$

Питома витрата палива

$$b = \frac{794 + 696}{39548 \cdot 0,336} = 0,112 \text{ кг/кг}.$$

Питома витрата умовного палива становитиме

$$b_{у.п} = \frac{b \cdot Q_{п}^p}{29330} = \frac{0,112 \cdot 39548}{29330} = 0,151 \text{ кг у.п./ (кг сталєних заготовок)}.$$

Годинна витрата мазуту

$$B = G \cdot b = 750 \cdot 0,112 = 84 \text{ кг/год}.$$

Приклад 8.3

Визначити тривалість нагрівання прутка діаметра 40 мм із вуглецевої сталі марки 20 від початкової температури $t_m=20^\circ\text{C}$ до кінцевої $t_m=900^\circ\text{C}$ в печі з температурою $t_n=1000^\circ\text{C}$. Зведений коефіцієнт випромінювання $C_{зв}=\epsilon_b C_0$, де C_0 — коефіцієнт випромінювання абсолютно чорного тіла, $C_0=5,67 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$; ϵ_b — видимий ступінь чорноти пічного (топкового) простору. За умов прикладу можна прийняти $\epsilon_b=0,7$, тоді $C_{зв}=0,7 \cdot 5,67 \approx 4,0 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$.

Теплофізичні властивості сталі (теплоємність, теплопровідність, температуропровідність, густина) залежать від температури і приймаються з таблиць довідкових даних (див. дод. 13—16).

Розв'язання

Нагрівання матеріалу розбиваємо на три періоди:

20...600°C — перший період;

600...800°C — другий період;

800...900°C — третій період.

Тривалість нагрівання круглого прутка розраховуємо за формулою (8.115), прийнявши умову, що тіло (пруток) тонке.

Вводячи значення коефіцієнта температуропровідності $a=\lambda_m/(\rho_m c_m)$ та критерію $\text{Bi}_0\text{--}\text{Bi}_1=\alpha s/\lambda_m$, одержимо розрахункову формулу

$$\tau = \frac{s \rho_m c_m}{m \bar{\alpha}} \ln \frac{t_n - t'_m}{t_n - t''_m} \text{ с.}$$

Перший період

$$s = d/2 = 0,040/2 = 0,020 \text{ м}; \quad t_n = 1000^\circ\text{C};$$

$$t'_m = 20^\circ\text{C}; \quad t''_m = 600^\circ\text{C}.$$

Середню теплоємність матеріалу — вуглецевої сталі марки 20 в інтервалі температур нагрівання (від 20 до 600°C) розраховуємо, використовуючи значення тепловмісту

$$c_{m1} = c_{20}^{600} = \frac{c_0^{600} \cdot t''_{m1} - c_0^{20} \cdot t'_{m1}}{t''_{m1} - t'_{m1}} =$$

$$= \frac{0,584 \cdot 600 - 0,48 \cdot 20}{600 - 20} = 0,587 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К}) .$$

Значення c_{m1} в інтервалі температур $0 \dots 600^\circ\text{C}$ можна брати просто з таблиці (див. дод. 13): $c_{20}^{600} = 0,584 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$, воно дуже близьке до розрахованої величини.

Коефіцієнт тепловіддачі на початку першого періоду нагрівання визначається за формулою

$$\alpha'_1 = C_{\text{зв}} \frac{\left(\frac{T_{\text{п}}}{100}\right)^4 - \left(\frac{T'_{\text{м1}}}{100}\right)^4}{t_{\text{п}} - t'_{\text{м1}}} = 4,0 \cdot \frac{\left(\frac{1000+273}{100}\right)^4 - \left(\frac{20+273}{100}\right)^4}{1000-20} ,$$

$$\alpha'_1 = 106,9 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}) .$$

Коефіцієнт тепловіддачі наприкінці першого періоду нагрівання визначаємо за формулою

$$\alpha''_1 = C_{\text{зв}} \frac{\left(\frac{T_{\text{п}}}{100}\right)^4 - \left(\frac{T''_{\text{м1}}}{100}\right)^4}{t_{\text{п}} - t''_{\text{м1}}} = 4,0 \cdot \frac{\left(\frac{1000+273}{100}\right)^4 - \left(\frac{600+273}{100}\right)^4}{1000-600} ,$$

$$\alpha''_1 = 204,5 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}) .$$

Середній коефіцієнт тепловіддачі за перший період нагрівання дорівнює

$$\bar{\alpha} = 0,5(\alpha'_1 + \alpha''_1) = 0,5(106,9 + 204,5) = 155,7 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}) .$$

Визначаємо критерій Біо

$$Bi = \frac{\bar{\alpha} s / 2}{\lambda_{\text{м}}} = \frac{155,7 \cdot 0,020}{35,6} = 0,09 ,$$

$\lambda_{\text{м}} = 35,6 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ — визначається за температури 600°C (див. дод. 14).

Матеріал, що нагрівається, належить до тонких тіл ($Bi = 0,09 < 0,25$), тобто розрахункові формули вибрано правильно.

Тривалість нагрівання за перший період становитиме

$$\tau_1 = \frac{s\rho_{M_1}c_{M_1}}{m\bar{\alpha}_1} \ln \frac{t_{\Pi} - t'_{M_1}}{t_{\Pi} - t''_{M_1}},$$

де m — коефіцієнт форми, для циліндра приймають $m=2$;
 ρ_{M_1} — густина сталі 20 у першому інтервалі нагрівання від 20 до 600°C визначається за формулою:

$$\rho_{M_1} = \frac{\rho_{20} + \rho_{600}}{2} = \frac{7859 + 7659}{2} = 7759 \text{ кг/м}^3,$$

$$\tau_1 = \frac{0,020 \cdot 7759 \cdot 587}{2 \cdot 155,7} \ln \frac{1000 - 20}{1000 - 600} = 262 \text{ с},$$

$$\tau_1 = 4 \text{ хв і } 22 \text{ с}.$$

Другий період

$$t_{\Pi} = 1000^\circ\text{C}; \quad t'_{M_2} = 600^\circ\text{C}; \quad t''_{M_2} = 800^\circ\text{C}.$$

$$c_{M_2} = c_{600}^{800} = \frac{c_0^{800} \cdot t''_{M_2} - c_0^{600} \cdot t'_{M_2}}{t''_{M_2} - t'_{M_2}} =$$

$$= \frac{0,703 \cdot 800 - 0,584 \cdot 600}{800 - 600} = 1,06 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{К)},$$

$$\alpha'_2 = \alpha''_1 = 204,5 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)},$$

$$\alpha''_2 = C_{\text{зв}} \cdot \frac{\left(\frac{T_{\Pi}}{100}\right)^4 - \left(\frac{T''_{M_2}}{100}\right)^4}{t_{\Pi} - t''_{M_2}} = 4,0 \cdot \frac{\left(\frac{1000 + 273}{100}\right)^4 - \left(\frac{800 + 273}{100}\right)^4}{1000 - 800},$$

$$\alpha''_2 = 260,1 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}.$$

$$\bar{\alpha}_2 = 0,5(\alpha'_2 + \alpha''_2) = 0,5 \cdot (204,5 + 260,1) = 232,3 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)},$$

$$\tau_2 = \frac{s\rho_{M_2}c_{M_2}}{m\bar{\alpha}_2} \ln \frac{t_{\Pi} - t'_{M_2}}{t_{\Pi} - t''_{M_2}}.$$

$$\rho_{M_2} = \frac{\rho_{600} + \rho_{800}}{2} = \frac{7659 + 7624}{2} = 7641 \text{ кг/м}^3,$$

$$\tau_2 = \frac{0,020 \cdot 7641 \cdot 1060}{2 \cdot 232,3} \ln \frac{1000 - 600}{1000 - 800} = 242 \text{ с},$$

$$\tau_2 = 4 \text{ хв } 2 \text{ с}.$$

Третій період

$$t_n = 1000^\circ\text{C}; \quad t'_{M_3} = 800^\circ\text{C}; \quad t''_{M_3} = 900^\circ\text{C}.$$

$$c_{M_3} = c_{800}^{900} = 0,703 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{К)} \text{ (див. додаток 13)}.$$

$$\alpha'_3 = \alpha''_2 = 260,1 \text{ Вт/(м}^2\cdot\text{К)},$$

$$\alpha''_3 = C_{\text{зв}} \cdot \frac{\left(\frac{T_n}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_{M_3}''}{100}\right)^4}{t_n - t_{M_3}''} = 4,0 \cdot \frac{\left(\frac{1000 + 273}{100}\right)^4 - \left(\frac{900 + 273}{100}\right)^4}{1000 - 900},$$

$$\alpha''_3 = 293,2 \text{ Вт/(м}^2\cdot\text{К)}$$

$$\bar{\alpha}_3 = 0,5(\alpha'_3 + \alpha''_3) = 0,5 \cdot (260,1 + 293,2) = 276,6 \text{ Вт/(м}^2\cdot\text{К)},$$

$$\rho_{M_3} = \frac{\rho_{800} + \rho_{900}}{2} = \frac{7624 + 7600}{2} = 7612 \text{ кг/м}^3,$$

$$\tau_3 = \frac{\rho_{M_3} \cdot c_{M_3}}{m \cdot \bar{\alpha}_3} \ln \frac{t_n - t'_{M_3}}{t_n - t''_{M_3}} = \frac{0,020 \cdot 7612 \cdot 703}{2 \cdot 276,6} \ln \frac{1000 - 800}{1000 - 900} = 134 \text{ с},$$

$$\tau_3 = 2 \text{ хв } 14 \text{ с}.$$

Повний час нагрівання прутка становить

$$\tau = \tau_1 + \tau_2 + \tau_3 = 262 + 242 + 134 = 638 \text{ с},$$

$$\tau = 10 \text{ хв } 38 \text{ с}.$$

Зміна температури прутка представлена на рис. 8.48.

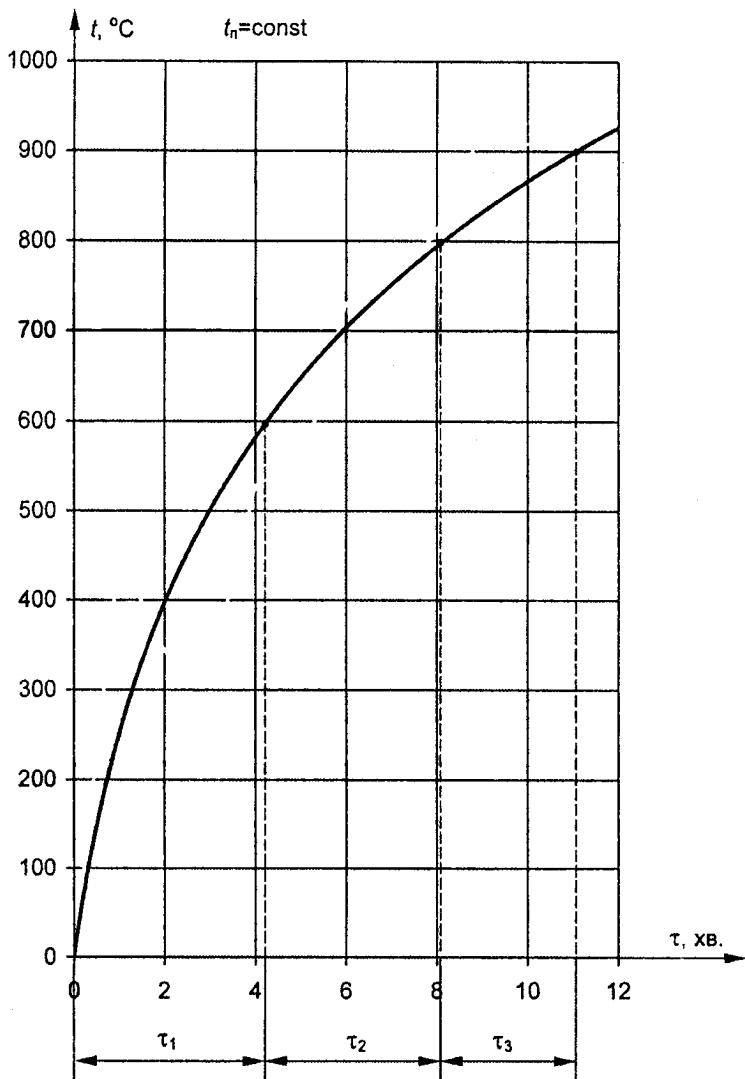


Рис. 8.48. Зміна температури прутка у часі за результатом розрахунку

Приклад 8.4

Розрахувати нагрівання зливка з вуглецевої сталі марки 20 діаметра 600 мм. Початкова температура зливка 20°C. Температура поверхні зливка наприкінці нагрівання 1280°C. Температура печі $t_{\text{п}}=1300^\circ\text{C}$. Зведений коефіцієнт випромінювання приймається $C_{\text{зв}}=4,0 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$.

Теплофізичні властивості сталі 20 (теплоємність, теплопровідність, температуропровідність, густина) залежать від температури і приймаються з таблиць довідкових даних (див. дод. 13—16).

Розв'язання

Розрахунки розділяємо на три періоди за температурою поверхні зливка, °C:

- 1) $t_{\text{пов}}=20\dots 1000^\circ\text{C}$; 2) $t_{\text{пов}}=1000\dots 1200^\circ\text{C}$;
- 3) $t_{\text{пов}}=1200\dots 1280^\circ\text{C}$.

Перший період нагрівання

Температура печі $t_{\text{п}}=1300^\circ\text{C}$. Початкова температура зливка $t_{\text{сеп}}^0=20^\circ\text{C}$. Температура поверхні зливка наприкінці першого періоду нагрівання $t_{\text{пов}_1}''=1000^\circ\text{C}$. Радіус зливка $R=0,6/2=0,3 \text{ м}$. Густина сталі $\rho_{\text{м}}=7600 \text{ кг}/\text{м}^3$.

Визначимо коефіцієнт тепловіддачі α на початку 1-го періоду нагрівання зливка:

$$\alpha_1' = C_{\text{зв}} \frac{\left(\frac{T_{\text{п}}}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_{\text{пов}_1}'}{100}\right)^4}{t_{\text{п}} - t_{\text{пов}_1}'} = 4,0 \frac{\left(\frac{1300+273}{100}\right)^4 - \left(\frac{20+273}{100}\right)^4}{1300-20},$$

$$\alpha_1' = 191 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К});$$

наприкінці 1-го періоду нагрівання

$$\alpha_1'' = C_{\text{зв}} \frac{\left(\frac{T_{\text{п}}}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_{\text{пов}_1}''}{100}\right)^4}{t_{\text{п}} - t_{\text{пов}_1}''} = 4,0 \frac{\left(\frac{1300+273}{100}\right)^4 - \left(\frac{1000+273}{100}\right)^4}{1300-1000},$$

$$\alpha_1'' = 466 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}).$$

Середній коефіцієнт тепловіддачі

$$\alpha_{\text{сер}_1} = 0,5 \cdot (\alpha'_1 + \alpha''_1) = 0,5 \cdot (191 + 466) = 328 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}).$$

Визначаємо коефіцієнт теплопровідності (середній за 1-й період)

$$\lambda_{\text{сер}_1} = \frac{\lambda_{\text{поч}} + \lambda'_{\text{пов}_1} + \lambda''_{\text{пов}_1}}{3} = \frac{\lambda_{20} + \lambda_{20} + \lambda_{1000}}{3} = \frac{51,7 + 51,7 + 27,7}{3}.$$

$$\lambda_{\text{сер}_1} = 43,7 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К}).$$

Критерій Біо

$$Bi_1 = \frac{\alpha_{\text{сер}_1} \cdot R}{\lambda_{\text{сер}_1}} = \frac{328 \cdot 0,30}{43,7} = 2,25.$$

Визначаємо температурний критерій поверхні зливка:

$$\Theta_{\text{пов}_1} = \frac{t_{\text{п}} - t''_{\text{пов}_1}}{t_{\text{п}} - t'_{\text{пов}_1}} = \frac{1300 - 1000}{1300 - 20} = 0,23.$$

Знаючи критерій Bi_1 та $\Theta_{\text{пов}_1}$, визначаємо критерій Фур'є (див. рис. 8.44)

$$Fo_1 = \frac{\alpha \cdot \tau}{R^2} = 0,35.$$

Використовуючи критерій $Bi_1 = 2,25$ та $Fo_1 = 0,35$, визначаємо температурний критерій середини (центра) зливка (див. рис. 8.45) $\Theta_{\text{ц}_1} = 0,48$.

Температура середини зливка наприкінці 1-го періоду нагрівання

$$t''_{\text{ц}_1} = t_{\text{п}} - \Theta_{\text{ц}_1} \cdot (t_{\text{п}} - t^0_{\text{сер}}) = 1300 - 0,48 \cdot (1300 - 20) = 686^\circ\text{C}.$$

Різниця температур поверхні та центру зливка наприкінці 1-го періоду

$$\Delta t''_1 = t''_{\text{пов}_1} - t''_{\text{ц}_1} = 1000 - 686 = 314^\circ\text{C}.$$

Середня температура зливка по перетину наприкінці 1-го періоду нагрівання

$$t''_{\text{сер}_1} = t''_{\text{ц}_1} + 0,5 \Delta t''_1 = 686 + 0,5 \cdot 314 = 843^\circ\text{C}.$$

Середня теплоємність сталі за період нагрівання (в діапазоні температур від $t_{\text{сер}}^0$ до $t_{\text{сер}_1}''$)

$$c_{\text{сер}_1} = c_{20}^{843} = \frac{c_{843} \cdot t_{\text{сер}_1}'' - c_{20} \cdot t_{\text{сер}}^0}{t_{\text{сер}_1}'' - t_{\text{сер}}^0},$$

$$c_{\text{сер}_1} = \frac{0,703 \cdot 843 + 0,48 \cdot 20}{843 - 20} = 0,732 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{К)}.$$

Визначаємо коефіцієнт теплопровідності, усереднений за масою зливка для 1-го періоду:

$$\bar{\lambda}_1 = \frac{\lambda'_{\text{пов}_1} + \lambda'_{\text{ц}_1} + \lambda''_{\text{пов}_1} + \lambda''_{\text{ц}_1}}{4} = \frac{\lambda_{20} + \lambda_{20} + \lambda_{1000} + \lambda_{686}}{4},$$

де $\lambda'_{\text{пов}_1}$, $\lambda'_{\text{ц}_1}$ — коефіцієнт теплопровідності матеріалу зливка при початковій температурі (до початку нагрівання)

$$t_{\text{сер}}^0 = t_{\text{ц}}^0 = t_{\text{пов}}^0 = t'_{\text{ц}_1} = t'_{\text{пов}_1} = 20^\circ\text{C};$$

$\lambda''_{\text{пов}_1}$, $\lambda''_{\text{ц}_1}$ — коефіцієнт теплопровідності за кінцевої температури (наприкінці 1-го періоду нагрівання),

$$t''_{\text{пов}_1} = 1000^\circ\text{C} \text{ (прийнята температура),}$$

$$t''_{\text{ц}_1} = 686^\circ\text{C} \text{ (визначена температура),}$$

$$\bar{\lambda}_1 = \frac{51,7 + 51,7 + 27,7 + 32,3}{4} = 40,9 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)},$$

Коефіцієнт температуропровідності

$$a_1 = \frac{\bar{\lambda}_1}{c_{\text{сер}_1} \cdot \rho_{\text{м}}} = \frac{40,9}{732 \cdot 7600} = 7,34 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}.$$

Тривалість нагрівання визначимо з виразу критерію Фур'є

$$Fo_1 = \frac{a_1 \cdot \tau_1}{R^2} \rightarrow \tau_1 = Fo_1 \frac{R^2}{a_1},$$

$$\tau_1 = 0,35 \frac{0,3^2}{7,34 \cdot 10^{-6}} = 4292 \text{ с} = 71,5 \text{ хв},$$

$$\tau_1 = 71,5 \text{ хв.}$$

Другий період нагрівання

$$t_{\text{п}} = 1300^{\circ}\text{C}; t'_{\text{пов}_2} = 1000^{\circ}\text{C}; t''_{\text{пов}_2} = 1200^{\circ}\text{C}; t'_{\text{ц}_2} = t''_{\text{ц}_1} = 686^{\circ}\text{C}$$

$$t'_{\text{сер}_2} = t''_{\text{сер}_1} = 843^{\circ}\text{C}; \alpha'_2 = \alpha''_1 = 466 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$$

$$\alpha''_2 = C_{\text{зв}} \frac{\left(\frac{T_{\text{п}}}{100}\right)^4 - \left(\frac{T''_{\text{пов}_2}}{100}\right)^4}{t_{\text{п}} - t''_{\text{пов}_2}} = 4,0 \frac{\left(\frac{1300 + 273}{100}\right)^4 - \left(\frac{1200 + 273}{100}\right)^4}{1300 - 1200},$$

$$\alpha''_2 = 566 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}),$$

$$\alpha_{\text{сер}_2} = 0,5 \cdot (\alpha'_2 + \alpha''_2) = 0,5 \cdot (466 + 566) = 516 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}),$$

$$\lambda_{\text{сер}_2} = \frac{\lambda'_{\text{пов}_2} + \lambda''_{\text{ц}_1} + \lambda''_{\text{пов}_2}}{3} = \frac{\lambda_{1000} + \lambda_{686} + \lambda_{1200}}{3},$$

$$\lambda_{\text{сер}_2} = \frac{27,7 + 32,3 + 29,8}{3} = 29,9 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К}),$$

$$Bi_2 = \frac{\alpha_{\text{сер}_2} R}{\lambda_{\text{сер}_2}} = \frac{516 \cdot 0,3}{29,9} = 5,2,$$

$$\Theta_{\text{пов}_2} = \frac{t_{\text{п}} - t''_{\text{пов}_2}}{t_{\text{п}} - t'_{\text{сер}_2}} = \frac{1300 - 1200}{1300 - 843} = 0,22.$$

Знаючи критерії $Bi_2 = 5,2$ та $\Theta_{\text{пов}_2} = 0,22$, з рис. 8.44 знаходимо

$$Fo_2 = \frac{a_2 \cdot \tau_2}{R^2} = 0,1.$$

З рис. 8.45 при $Bi_2 = 5,2$ та $Fo_2 = 0,1$ знаходимо $\Theta_{\text{ц}_2} = 0,90$.

Температура центру зливка наприкінці 2-го періоду дорівнює

$$t''_{\text{ц}_2} = t_{\text{п}} - \Theta_{\text{ц}_2} (t_{\text{п}} - t'_{\text{сер}_2}) = 1300 - 0,90 \cdot (1300 - 843) = 889^{\circ}\text{C}.$$

Наприкінці нагрівання

$$\Delta t_2'' = t_{\text{пов}_2}'' - t_{\text{ц}_2}'' = 1200 - 889 = 311^\circ\text{C},$$

$$t_{\text{сер}_2}'' = t_{\text{ц}_2}'' + 0,5\Delta t_2'' = 889 + 0,5 \cdot 311 = 1044^\circ\text{C},$$

$$c_{\text{сер}_2} = c_{843}^{1044} = \frac{c_{1044} \cdot t_{\text{сер}_2}'' - c_{843} \cdot t_{\text{сер}_2}'}{t_{\text{сер}_2}'' - t_{\text{сер}_2}'} =$$

$$= \frac{0,693 \cdot 1044 - 0,703 \cdot 843}{1044 - 843} = 0,651 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{К)}.$$

Визначаємо усереднений коефіцієнт теплопровідності за масою зливка для другого періоду:

$$\bar{\lambda}_2 = \frac{\lambda'_{\text{пов}_2} + \lambda'_{\text{ц}_2} + \lambda''_{\text{пов}_2} + \lambda''_{\text{ц}_2}}{4} = \frac{\lambda_{1000} + \lambda_{686} + \lambda_{1200} + \lambda_{889}}{4} =$$

$$= \frac{27,7 + 32,5 + 29,8 + 26,3}{4} = 29,1 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)},$$

$$a_2 = \frac{\bar{\lambda}_2}{c_{\text{сер}_2} \cdot \rho_{\text{м}}} = \frac{29,1}{651 \cdot 7600} = 5,88 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с},$$

$$\tau_2 = \text{Fo}_2 \frac{R^2}{a_2} = 0,1 \frac{0,30^2}{5,88} \cdot 10^6 = 1531 \text{ с} = 25,5 \text{ хв}.$$

Третій період нагрівання

$$t_{\text{п}} = 1300^\circ\text{C}; t'_{\text{пов}_3} = 1200^\circ\text{C}; t''_{\text{пов}_3} = 1280^\circ\text{C}; t'_{\text{ц}_3} = t''_{\text{ц}_2} = 889^\circ\text{C};$$

$$t'_{\text{сер}_3} = t''_{\text{сер}_2} = 1044^\circ\text{C}; \alpha'_3 = \alpha''_2 = 566 \text{ Вт/(м}^2\cdot\text{К)},$$

$$\alpha_3'' = C_{\text{зв}} \frac{\left(\frac{T_{\text{п}}}{100}\right)^4 - \left(\frac{T''_{\text{пов}_3}}{100}\right)^4}{t_{\text{п}} - t''_{\text{пов}_3}} = 4,0 \frac{\left(\frac{1300+273}{100}\right)^4 - \left(\frac{1280+273}{100}\right)^4}{1300 - 1280},$$

$$\alpha_3'' = 611 \text{ Вт/(м}^2\cdot\text{К)},$$

$$\alpha_{\text{сер}_3} = 0,5 \cdot (\alpha'_3 + \alpha_3'') = 0,5 \cdot (566 + 611) = 588 \text{ Вт/(м}^2\cdot\text{К)},$$

$$\lambda_{\text{сер3}} = \frac{\lambda'_{\text{пов3}} + \lambda''_{\text{ц2}} + \lambda''_{\text{пов3}}}{3} = \frac{\lambda_{1200} + \lambda_{889} + \lambda_{1280}}{3} =$$

$$= \frac{29,8 + 26,3 + 29,8}{3} = 28,6 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)},$$

$$Bi_3 = \frac{\alpha_{\text{сер3}} R}{\lambda_{\text{сер3}}} = \frac{588 \cdot 0,3}{28,6} = 6,2,$$

$$\Theta_{\text{пов3}} = \frac{t_{\text{п}} - t''_{\text{пов3}}}{t_{\text{п}} - t'_{\text{сер3}}} = \frac{1300 - 1280}{1300 - 1044} = 0,08.$$

Знаючи критерії $Bi_3=6,2$ та $\Theta_{\text{пов3}} = 0,08$, з рис. 8.44 знаходимо

$$Fo_3 = \frac{\alpha_3 \cdot \tau_3}{R^2} = 0,3.$$

З рис. 8.45 при $Bi_3=6,2$ та $Fo_3=0,3$, знаходимо $\Theta_{\text{ц3}} = 0,35$. Температура центру зливка наприкінці 3-го періоду дорівнює

$$t''_{\text{ц3}} = t_{\text{п}} - \Theta_{\text{ц3}} \cdot (t_{\text{п}} - t'_{\text{сер3}}) = 1300 - 0,35 \cdot (1300 - 1044) = 1210 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Наприкінці 3-го періоду нагрівання визначаємо

$$\Delta t_3'' = t''_{\text{пов3}} - t''_{\text{ц3}} = 1280 - 1210 = 70 \text{ }^\circ\text{C},$$

$$t''_{\text{сер3}} = t''_{\text{ц3}} + 0,5 \Delta t_3'' = 1210 + 0,5 \cdot 70 = 1245 \text{ }^\circ\text{C},$$

$$c_{\text{сер3}} = c_{1044}^{1245} = \frac{c_{1245} \cdot t''_{\text{сер3}} - c_{1044} \cdot t'_{\text{сер3}}}{t''_{\text{сер3}} - t'_{\text{сер3}}} =$$

$$= \frac{0,687 \cdot 1245 - 0,693 \cdot 1044}{1245 - 1044} = 0,656 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{К)}.$$

Визначаємо усереднений коефіцієнт теплопровідності за масою зливка для 3-го періоду

$$\bar{\lambda}_3 = \frac{\lambda'_{\text{пов3}} + \lambda'_{\text{ц3}} + \lambda''_{\text{пов3}} + \lambda''_{\text{ц3}}}{4} = \frac{\lambda_{1200} + \lambda_{889} + \lambda_{1280} + \lambda_{1210}}{4} =$$

$$= \frac{29,8 + 26,3 + 30,0 + 29,8}{4} = 29,0 \text{ Вт/(м·К) ,}$$

$$a_3 = \frac{\bar{\lambda}_3}{c_{\text{сер3}} \cdot \rho_M} = \frac{29,0}{0,656 \cdot 7600} = 5,82 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с} ,$$

$$\tau_3 = F \cdot O_3 \frac{R^2}{a_3} = 0,3 \frac{0,30^2}{5,82} \cdot 10^6 = 4639 \text{ с} = 77,3 \text{ хв.}$$

Результати розрахунку для всіх трьох періодів нагрівання зливка зводимо в таблицю і подаємо графічно на рис. 8.49.

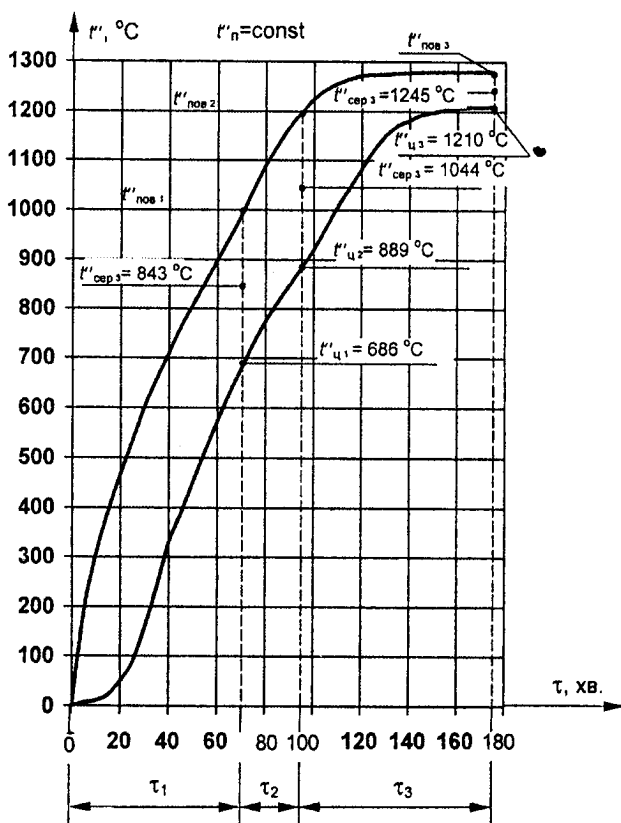


Рис. 8.49. (до розв'язання прикладу 8.4).
Графік нагрівання зливка сталі згідно з розрахунком

Таблиця 8.1. Результати розрахунку нагрівання зливка із сталі 20 Ø 600 мм при $T_{\text{н}} = \text{const}$

Період	α'	α''	$\alpha_{\text{сеп}}$	$\lambda_{\text{сеп}}$	Bi	$\Theta_{\text{нон}}$	Fo	$\Theta_{\text{ц}}$	$t''_{\text{ц}}$	Δt	$t''_{\text{сеп}}$	$c_{\text{сеп}}$	$\bar{\lambda}$	$a \cdot 10^{-6}$	τ	
	Вт/(м ² ·К)		$\frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$	$\frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$	$\frac{\alpha_{\text{сеп}} R}{\lambda_{\text{сеп}}}$		$\frac{\alpha \tau}{R^2}$			°C			$\frac{\text{кВдж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$	$\frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$	с	хв
1	191	466	328	43,7	2,25	0,23	0,35	0,48	686	314	843	0,732	40,9	7,34	4292	71,5
2	466	566	516	29,9	5,2	0,22	0,10	0,90	889	311	1044	0,651	29,1	5,88	1531	25,5
3	566	611	588	28,6	6,2	0,08	0,30	0,35	1210	70	1245	0,656	29,0	5,82	4639	77,3

Приклад 8.5

У камерній нагрівальній печі з роликівим подом нагрівають лист вуглецевої сталі марки 45 завдовжки l , завширшки b і завтовшки s від початкової температури t_m^0 до кінцевої t_m^k . Ступінь чорноти металу (сталі) $\epsilon_m=0,8$.

Паливо — суміш коксового та доменного газу. До складу (%) продуктів згоряння входять $\text{CO}_2=m\%$ та $\text{H}_2\text{O}=n\%$. Температура продуктів згоряння — $t_{п.з}$. Висота печі над матеріалом — h . Тиск у печі 100 кПа.

Визначити тривалість нагрівання листа до заданої температури.

Методика розв'язування

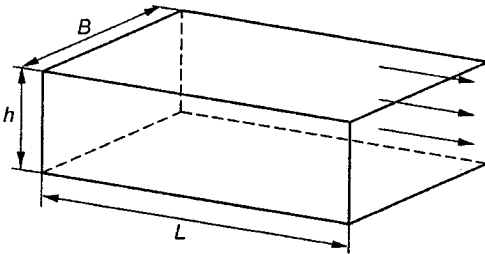


Рис. 8.50 (до розв'язання прикладу 8.5).

Габаритні внутрішні розміри печі

При розв'язуванні прикладу необхідно знати внутрішні розміри печі, які не задано (рис. 8.50). Тому при визначенні ширини печі зазори між краями листа та бічними стінами печі можна прийняти 0,2 м, тобто внутрішня ширина печі приймається $B=b+2 \cdot 0,2$ м. Довжина печі відповідно

знаходиться як $L=l+2 \cdot 0,2$ м. Необхідно також враховувати, що при двобічному нагріванні листа теплосприймаюча поверхня металу знизу зменшується за рахунок екрануючого впливу роликів. Тому нижня поверхня нагрівання визначається як

$$H_{\text{нижня}}=(0,4\dots0,6)lb \text{ (м}^2\text{)}.$$

1. Тривалість нагрівання листа визначаємо з критерію Фур'є

$$Fo = \frac{\alpha \tau}{(s/2)^2}.$$

2. Числове значення критерію Fo визначають за формулою

$$Fo = \frac{\Psi_2 - \Psi_1}{J},$$

де Ψ_1 — функція, що залежить від відносної температури матеріалу до нагрівання $\frac{T_M^0}{T_{II}}$ та критерію Іванцова J , тобто

$$\Psi_1 = f\left(\frac{T_M^0}{T_{II}}; J\right);$$

Ψ_2 — функція, що залежить від відносної температури матеріалу наприкінці нагрівання $\frac{T_M^K}{T_{II}}$ та критерію Іванцова J :

$$\Psi_2 = f\left(\frac{T_M^K}{T_{II}}; J\right).$$

Тут T_M^0 , T_M^K — абсолютна температура матеріалу до та після нагрівання в печі,

$$T_{II} — температура печі $T_{II} = T_M^K + \frac{T_{п.з} - T_M^K}{2}$, К.$$

Всі фізичні константи, що входять до критерію Іванцова, визначаються за середньоарифметичною температурою матеріалу

$$\bar{t}_M = \frac{t_M^0 + t_M^K}{2}, \text{ } ^\circ\text{C}.$$

3. Критерій Іванцова визначається за формулою (8.110)

$$J = \frac{10 \cdot C_{зв}}{\lambda} \frac{s}{2} \left[\frac{T_{II}}{1000} \right]^3,$$

де $C_{зв}$ — зведений коефіцієнт випромінювання, що визначається з рівняння [28, формула (25)]

$$C_{зв} = C_0 \varepsilon_M \frac{\omega + 1 - \varepsilon_r}{\left[\varepsilon_M + \varepsilon_r (1 - \varepsilon_M) \right] \frac{1 - \varepsilon_r}{\varepsilon_r} + \omega} \quad (\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)).$$

Тут C_0 — коефіцієнт випромінювання абсолютно чорного тіла $C_0 = 5,67 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$;

ε_M — ступінь чорноти матеріалу (за умовою задачі $\varepsilon_M = 0,8$);

ω — ступінь розвитку кладки печі — відношення по-

верхні всіх стін та склепіння печі ($F_{\text{кл}}$) до ефективної поверхні ($H_{\text{пр}}$) матеріалу, що сприймає випромінювання теплоти:

$$\omega = \frac{F_{\text{кл}}}{H_{\text{пр}}} = \frac{2 \cdot (L \cdot h) + B \cdot h + B \cdot L}{b \cdot l + 0,5 \cdot (b \cdot l)},$$

ϵ_r — ступінь чорноти трьохатомних газів (CO_2 та H_2O), що випромінюють теплоту,

$$\epsilon_r = \epsilon_{\text{CO}_2} + \epsilon_{\text{H}_2\text{O}}.$$

Ступінь чорноти кожного з газів, що випромінюють теплоту, залежить від температури газу $t_{\text{п.з}}$ та добутку $p \cdot s_{\text{еф}}$. Тут p — парціальний тиск у суміші продуктів згоряння, пропорційний процентному вмісту відповідного газу в продуктах згоряння; $s_{\text{еф}}$ — ефективна товщина газового шару в печі;

$$s_{\text{еф}} = \frac{4V_{\text{п}}}{F_{\text{кл}}} = \frac{4(h \cdot B \cdot L)}{2(L \cdot h) + B \cdot h + B \cdot L};$$

$V_{\text{п}}$ — об'єм пічного простору.

Користуючись номограмами [13], знаходять ϵ_{CO_2} та $\epsilon_{\text{H}_2\text{O}}$ як функції від $t_{\text{п.з}}$ та $ps_{\text{еф}}$.

Ці дані дають змогу визначити критерій Іванцова, після чого, користуючись номограмами (див. рис. 8.46) визначають функції ψ_1 та ψ_2 і величину критерію F_0 , а з нього знаходять час нагрівання матеріалу.

Розв'язання

Початкові дані:

$$l=2,5 \text{ м}; \quad b=1,5 \text{ м}; \quad s=0,006 \text{ м};$$

$$B=b+2 \cdot 0,2=1,5+0,4=1,9 \text{ м};$$

$$L=l+2 \cdot 0,2=2,5+0,4=2,9 \text{ м};$$

$$h=1,0 \text{ м};$$

$$\text{CO}_2=16\%, \quad p_{\text{CO}_2}=0,16 \cdot 0,1=0,016 \text{ МПа};$$

$$\text{H}_2\text{O}=12\%, \quad p_{\text{H}_2\text{O}}=0,12 \cdot 0,1=0,012 \text{ МПа};$$

$$t_{п.з} = 1000 \text{ } ^\circ\text{C}; t_{м}^u = 20 \text{ } ^\circ\text{C}; t_{м}^k = 950 \text{ } ^\circ\text{C}; \varepsilon_{м} = 0,8.$$

1. Температура печі

$$t_{п} = t_{м}^k + \frac{t_{п.з} - t_{м}^k}{2} = 950 + \frac{1000 - 950}{2} = 975 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

2. Площа ефективної променесприймальної поверхні матеріалу (металу)

$$H_{пр} = b \cdot l + 0,5b \cdot l = 1,5 \cdot 2,5 + 0,5 \cdot 1,5 \cdot 2,5 = 5,625 \text{ м}^2.$$

3. Об'єм пічного простору

$$V_{п} = h \cdot B \cdot L = 1,0 \cdot 1,9 \cdot 2,9 = 5,51 \text{ м}^3.$$

4. Площа поверхні кладки печі, тобто поверхні внутрішніх стін та склепіння печі:

$$F_{кл} = 2L \cdot h + B \cdot h + B \cdot L = 2 \cdot 2,9 \cdot 1,0 + 1,9 \cdot 1,0 + 1,9 \cdot 2,9 = 13,21 \text{ м}^2.$$

5. Ефективна товщина газового шару печі

$$s_{эф} = \frac{4V_{п}}{F_{кл}} = \frac{4 \cdot 5,51}{13,21} = 1,67 \text{ м}.$$

6. Добуток $ps_{эф}$:

$$\text{для } \text{CO}_2 - p_{\text{CO}_2} s_{эф} = 0,016 \cdot 1,67 = 0,0267 \text{ МПа}\cdot\text{м};$$

$$\text{для } \text{H}_2\text{O} - p_{\text{H}_2\text{O}} s_{эф} = 0,012 \cdot 1,67 = 0,0200 \text{ МПа}\cdot\text{м}.$$

З номограм [13, стор. 184] визначаємо

$$\varepsilon_{\text{CO}_2} = 0,14; \varepsilon_{\text{H}_2\text{O}} = \varepsilon'_{\text{H}_2\text{O}} \cdot \beta = 0,15 \cdot 1,07 = 0,16.$$

Ступінь чорноти газів, що випромінюють теплоту, складає

$$\varepsilon_{г} = \varepsilon_{\text{CO}_2} + \varepsilon_{\text{H}_2\text{O}} = 0,14 + 0,16 = 0,30.$$

7. Ступінь розвитку кладки визначається за формулою

$$\omega = \frac{F_{кл}}{H_{пр}} = \frac{13,21}{5,625} = 2,35.$$

8. Зведений коефіцієнт випромінювання визначаємо з рівняння

$$C_{зв} = \frac{C_0 \varepsilon_{м} (\omega + 1 - \varepsilon_{г})}{[\varepsilon_{м} + \varepsilon_{г} (1 - \varepsilon_{м})] \frac{1 - \varepsilon_{г}}{\varepsilon_{г}} + \omega} = \frac{5,67 \cdot 0,8 \cdot (2,35 + 1 - 0,3)}{[0,8 + 0,30 \cdot (1 - 0,8)] \frac{(1 - 0,3)}{0,3} + 2,35},$$

$$C_{зв} = 3,175 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4).$$

9. Критерій Іванцова знаходимо за формулою

$$J = 10 \frac{C_{зв} s}{\lambda_{ст} 2} \left[\frac{T_{п}}{1000} \right]^3;$$

де $\lambda_{ст}$ — коефіцієнт теплопровідності матеріалу (сталь 45) при середньоарифметичній температурі металу

$$\bar{t}_M = \frac{t_M^0 + t_M^K}{2} = \frac{20 + 950}{2} = 485 \text{ }^\circ\text{C};$$

$\lambda_{ст} = 38,9 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ (див. дод. 14)

$$T_{п} = t_{п} + 273 = 975 + 273 = 1248 \text{ К};$$

$$J = 10 \frac{3,175 \cdot 0,006}{38,9 \cdot 2} \left[\frac{1248}{1000} \right]^3 = 0,005.$$

10. Визначаємо відносну температуру металу на початку нагрівання

$$\frac{T_M^0}{T_{п}} = \frac{t_M^0 + 273}{t_{п} + 273} = \frac{20 + 273}{975 + 273} = 0,235$$

та наприкінці нагрівання

$$\frac{T_M^K}{T_{п}} = \frac{t_M^K + 273}{t_{п} + 273} = \frac{950 + 273}{975 + 273} = 0,980.$$

11. Функції $\psi_1 = f\left(\frac{T_M^0}{T_{п}}; J\right)$ та $\psi_2 = f\left(\frac{T_M^K}{T_{п}}; J\right)$ визначаються з діаграми (див. рис. 8.46).

Для початку нагрівання

при $\frac{T_M^0}{T_{п}} = 0,235$ та $J = 0,005$ маємо $\psi_1 = 0,22$;

при $\frac{T_M^K}{T_{п}} = 0,980$ та $J = 0,005$ маємо $\psi_2 = 1,55$.

12. Критерій Фур'є

$$Fo = \frac{\psi_2 - \psi_1}{J} = \frac{1,55 - 0,22}{0,005} = 266.$$

13. Тривалість нагрівання металу в печі визначається з критерію Фур'є:

$$Fo = \frac{\alpha \tau}{(s/2)^2} \rightarrow \tau = \frac{Fo(s/2)^2}{\alpha},$$

де α — коефіцієнт температуропровідності, що визначається за формулою

$$a = \frac{\lambda}{c\rho};$$

λ , c і ρ визначаються за температури $\bar{t}_m = 485^\circ\text{C}$
(див. дод. 13, 14, 15)

$\lambda = 38,9 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$; $c = 550 \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$; $\rho = 7600 \text{ кг}/\text{м}^3$;

$$a = \frac{38,9}{550 \cdot 7600} = 9,3 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с};$$

$$\tau = \frac{266(0,006/2)^2}{9,3 \cdot 10^{-6}} = 257 \text{ с} = 4,28 \text{ хв};$$

$$\tau = 4 \text{ хв } 17 \text{ с}.$$

Контрольні запитання

1. Дайте визначення поняття тонких та масивних тіл, які використовуються при аналізі процесів нагрівання матеріалів у ВТУ. Які критерії використовуються для визначення масивності тіл?

2. Розрахунок нагріву тонких тіл для умов передачі теплоти переважно конвекцією та радіацією.

3. Розрахунок нагріву масивного тіла в середовищі з постійною температурою $t_n = \text{const}$ при умові передачі теплоти на поверхню тіла конвекцією.

4. Розрахунок нагріву масивного тіла в середовищі з постійною температурою $t_n = \text{const}$ при умові передачі теплоти на поверхню тіла радіацією.

5. Розрахунок нагріву масивного тіла в середовищі при умові передачі на його поверхню незмінного теплового потоку $q_{\text{пов}} = \text{const}$.

МАТЕРІАЛЬНИЙ ТА ТЕПЛОВИЙ БАЛАНСИ ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНИХ УСТАНОВОК

Вельми важливо організувати раціональний хід процесу в промислових ВУ. Робота ВУ характеризується низкою показників. Основні з них такі:

- 1) видатність (питома), тобто кількість продукції, що видається з ВУ на 1 м^2 поду, або на 1 м^3 об'єму ВУ;
- 2) якість теплової обробки матеріалу та втрати продукту під час обробки (угар металу, брак при випалюванні тощо);
- 3) собівартість теплової обробки матеріалу;
- 4) досконалість використання теплоти палива;
- 5) тепловий та температурний режими.

Основним методом оцінки роботи промислових ВУ є складання матеріального та теплового балансів технологічних процесів, які здійснюються в них.

9.1. Матеріальний баланс

Матеріальний баланс виражає рівність мас матеріалів, що поступають у ВУ та виходять з неї після завершення технологічного процесу. Ця рівність зберігається під час будь-яких фізичних чи хімічних перетворень, які відбуваються з матеріалами. Матеріальний баланс складається з метою визначення витрат технологічних матеріалів та палива, а також виходу кінцевого технологічного продукту; він є основою для складання теплового балансу ВУ.

Матеріальні баланси діючих ВУ використовуються, як

правило, для аналізу ефективності їх роботи та покращення виробничих показників. Матеріальний баланс у цьому разі складається на основі прямих замірів приходу мас технологічних матеріалів, палива, повітря і виходу з ВУ технологічних продуктів відходів та технологічних газів.

Матеріальні баланси ВУ при їх проектуванні використовуються для вибору найраціональніших технологічних та теплових режимів, а також визначення проектних показників роботи ВУ. Матеріальні баланси при цьому складаються на основі розрахунку процесів, що відбуваються у ВУ, а це потребує необхідних знань щодо фізичних та хімічних перетворень, які являють суть технологічного процесу, а також повноти цих перетворень. Повноту перетворень не завжди можна розрахувати, тому необхідні дані беруться з досвіду експлуатації аналогічних установок.

Якщо при обробці матеріалів у ВУ не відбуваються фізичні та хімічні перетворення, то матеріальний баланс складається досить просто. За наявності таких перетворень розрахунок матеріальних балансів може бути досить складним.

Для періодичних процесів матеріальний баланс складається на весь цикл процесу, а потім всі дані перелічують на одиницю кінцевого технологічного продукту (1 кг, 1 т).

Для безперервних процесів розрахунок ведуть на певний період часу (змiна, година, секунда), а потім кінцевий результат також перелічують на одиницю технологічного продукту (1 кг, 1 т).

Загальна формула матеріального балансу має вигляд

$$\Sigma M_{\text{прих}} = \Sigma M_{\text{витр}}, \quad (9.1)$$

або в розгорнутому вигляді

$$M_{\text{т.м}} + M_{\text{пал}} + M_{\text{пов}} = M_{\text{т.п}} + M_{\text{т.в}} + M_{\text{т.г}}, \quad (9.2)$$

де $M_{\text{т.м}}$ — маса технологічних матеріалів, що надходять у ВУ; $M_{\text{пал}}$ — маса палива, що вводиться у ВУ для здійснення технологічного процесу; $M_{\text{пов}}$ — маса повітря на технологічний процес (згоряння палива, фізико-хімічні перетворення); $M_{\text{т.п}}$ — маса технологічного продукту; $M_{\text{т.в}}$ — маса

технологічних відходів (шлак, окалина, винос тощо); $M_{т.г.}$ — маса відхідних технологічних газів, до них відносять газоподібні продукти згоряння палива та матеріалів, а також продукти хімічних перетворень.

9.2. Тепловий баланс

Тепловим балансом називають рівність приходу теплоти у ВУ та витрати його з ВУ. Тепловий баланс, пов'язаний з виробничими показниками ВУ, дає змогу визначити досконалість ВУ як теплотехнічного агрегату і намітити напрямки покращення її роботи.

Рівняння теплового балансу в загальному вигляді може бути записане так:

$$\Sigma Q_{\text{прих}} = \Sigma Q_{\text{витр}}, \quad (9.3)$$

де $\Sigma Q_{\text{прих}}$, $\Sigma Q_{\text{витр}}$ — відповідно суми приходних та витратних статей теплового балансу.

Теплові баланси ВУ, в яких з вихідними матеріалами не відбувається яких-небудь фізико-хімічних перетворень, є найпростішими. Для складного технологічного процесу з численними фізико-хімічними перетвореннями, пов'язаними з поглинанням та виділенням теплоти, складання теплового балансу ВУ є дуже складним завданням.

Необхідно завжди чітко визначитись, в яких межах складається тепловий баланс. Для ВУ найчастіше він складається в межах робочої камери. Для установок, які використовують теплоту технологічних газів, складають самостійний тепловий баланс. Крім цього, можливе складання сумарного теплового балансу ВУ в комплексі з тепловикористовуючими установками.

Для ВУ безперервної дії тепловий баланс складають для одиниці часу роботи, для ВУ періодичної дії — на один цикл роботи.

У розгорнутому вигляді рівняння теплового балансу ВУ можна записати так:

$$Q_{\text{пал}}^x + Q_{\text{пал}}^{\text{ф}} + Q_{\text{пов}}^{\text{ф}} + Q_{\text{т.м}} + Q_{\text{екз}} = Q_{\text{т.п}} + Q_{\text{т.в}} + Q_{\text{енд}} + Q_{\text{т.г}} + \Sigma Q_{\text{витр}}. \quad (9.4)$$

Приходні статті теплового балансу:

1. $Q_{\text{пал}}^x$ — хімічна теплота, яка виділяється внаслідок згоряння палива:

$$Q_{\text{пал}}^x = BQ_{\text{н}}^p \text{ (кВт)}, \quad (9.5)$$

де B — витрати палива, кг/с ($\text{м}^3/\text{с}$); $Q_{\text{н}}^p$ — нижча теплота згоряння палива, кДж/кг ($\text{кДж}/\text{м}^3$).

2. $Q_{\text{пал}}^{\phi}$ — фізична теплота палива (підігрітого):

$$Q_{\text{пал}}^{\phi} = Bc_{\text{пал}}t_{\text{пал}} \text{ (кВт)}, \quad (9.6)$$

де $c_{\text{пал}}$ — середня питома теплоємність палива, кДж/(кг·К) ($\text{кДж}/(\text{м}^3\cdot\text{К})$); $t_{\text{пал}}$ — температура палива, °С.

3. $Q_{\text{пов}}^{\phi}$ — фізична теплота, що вноситься в робочу камеру з підігрітим повітрям:

$$Q_{\text{пов}}^{\phi} = Bv_{\text{пов}}c_{\text{пов}}t_{\text{пов}} \text{ (кВт)}, \quad (9.7)$$

де $v_{\text{пов}}$ — об'єм повітря, необхідний для спалювання одиниці палива, $\text{м}^3/\text{кг}$ ($\text{м}^3/\text{м}^3$); $c_{\text{пов}}$ — середня питома теплоємність повітря, кДж/(кг·К) ($\text{кДж}/(\text{м}^3\cdot\text{К})$); $t_{\text{пов}}$ — температура нагрітого повітря, °С.

4. $Q_{\text{т.м}}$ — теплота, що вноситься з підігрітими технологічними матеріалами:

$$Q_{\text{т.м}} = \sum M_i c_i t_i \text{ (кВт)}, \quad (9.8)$$

де M_i — витрати i -го компонента технологічного матеріалу, що поступає у ВУ, кг/с ($\text{м}^3/\text{с}$); c_i — середня питома теплоємність i -го компонента технологічного матеріалу, кДж/(кг·К) ($\text{кДж}/(\text{м}^3\cdot\text{К})$); t_i — температура i -го компонента технологічного матеріалу, що поступає у ВУ, °С.

5. $Q_{\text{екз}}$ — теплота екзотермічних реакцій, що відбуваються в робочій камері ВУ, крім реакцій згоряння палива, кВт.

У нагрівальних ВУ враховують теплоту, що виділяється внаслідок окиснення металу. При окисненні 1 кг сталі виділяється 5652 кДж/кг теплоти, тому

$$Q_{\text{екз}} = 5652G \cdot a \text{ (кВт)}, \quad (9.9)$$

де G — продуктивність ВУ, кг/с; a — величина угару металу (кг/кг металу).

Витратні статті теплового балансу:

1. $Q_{\text{т.п}}$ — теплота, що виводиться з ВУ з готовим технологічним продуктом:

$$Q_{\text{т.п}} = M_{\text{т.п}} c_{\text{т.п}} t_{\text{т.п}} \text{ (кВт)}, \quad (9.10)$$

де $M_{\text{т.п}}$ — маса готового технологічного продукту, що виво-

диться із ВУ, кг/с; $c_{т.п}$ — середня питома теплоємність готового технологічного продукту, кДж/(кг·К); $t_{т.п}$ — температура технологічного продукту на виході із ВУ, °С.

Якщо готовий технологічний продукт виходить з ВУ в розплавленому вигляді, то необхідно також враховувати теплоту його плавлення та теплоту перегріву розплаву.

2. $Q_{т.в}$ — теплота, що виводиться з ВУ з технологічними відходами виробництва (з шлаками, окалиною тощо):

$$Q_{т.в} = M_{т.в} c_{т.в} t_{т.в} \text{ (кВт)}, \quad (9.11)$$

де $M_{т.в}$ — маса твердих технологічних відходів даного процесу, кг/с; $c_{т.в}$ — середня питома теплоємність відходів, кДж/(кг·К); $t_{т.в}$ — температура, при якій технологічні відходи виводяться з ВУ, °С.

Якщо технологічні відходи виводяться з ВУ в розплавленому стані, то необхідно враховувати теплоту їх плавлення та теплоту перегріву розплаву.

3. $Q_{енд}$ — теплота ендотермічних реакцій, кВт. Тут враховується теплота всіх ендотермічних реакцій, що супроводжують технологічний процес у ВУ. Ці величини визначаються на основі теплових ефектів реакцій та даних матеріального балансу процесу.

4. $Q_{т.г}$ — теплота, що виноситься відхідними технологічними газами через димовий тракт ВУ:

$$Q_{т.г} = V_{т.г} c_{т.г} t_{т.г} \text{ (кВт)}, \quad (9.12)$$

або
$$Q_{т.г} = B(1-\sigma) v_{т.г} c_{т.г} t_{т.г} \text{ (кВт)}, \quad (9.12a)$$

де $V_{т.г}$ — об'єм технологічних газів, що видаляються з ВУ димовим трактом (враховуються продукти згоряння палива та газоподібні продукти фізико-хімічних процесів у ВУ), м³/с; $c_{т.г}$ — середня питома теплоємність відхідних технологічних газів, кДж/(м³·К); $t_{т.г}$ — температура технологічних газів, що виводяться з ВУ, °С; $v_{т.г}$ — об'єм технологічних газів, що виводяться з ВУ на одиницю спалюваного палива, м³/кг (м³/м³); σ — частка об'єму технологічних газів, що вибиваються через нещільності ВУ та відкриті вікна.

5. $\Sigma Q_{втр}$ — сума всіх втрат теплоти ВУ:

$$\Sigma Q_{\text{втр}} = Q_{\text{х.н}} + Q_{\text{м.н}} + Q_{\text{н.с}}^{\text{г.в}} + Q_{\text{охол}} + Q_{\text{н.кл}}, \quad (9.13)$$

5.1. $Q_{\text{х.н}}$ — втрата теплоти від хімічного недопалу палива та при дисоціації продуктів згоряння, кВт.

Для газоподібного палива хімічний недопал практично дорівнює нулю. Однак, якщо технологічні гази видаляються з ВУ при високій температурі (1800—2000°C і вище), то деяка частина газів CO_2 та H_2O дисоціюють з поглинанням теплоти (див. 4.2.1).

Хімічний недопал визначається за формулою

$$Q_{\text{х.н}} = B\beta_1 i_{\text{т.г}}, \quad (9.14)$$

де $i_{\text{т.г}} = v_{\text{т.г}} c_{\text{т.г}} t_{\text{т.г}}$, кДж/кг (кДж/м³), ентальпія технологічних газів на 1 кг (м³) палива; β_1 — частка хімічного недопалу.

За полум'яного способу спалювання палива при проектуванні можна рекомендувати

$$Q_{\text{х.н}} = (0,01 \dots 0,03) B Q_{\text{н}}^{\text{р}} \quad (\text{кВт}) \quad (9.14\text{а})$$

5.2. $Q_{\text{м.н}}$ — втрата теплоти з механічним недопалом палива, кВт.

При використанні твердого палива, наприклад в печах для випалювання цегли, величина механічного недопалу може сягати 2...4%. У печах, де використовується газоподібне паливо, механічний недопал має місце при порушеннях щільності теплообмінників (рекуперативних і регенеративних підігрівників) та при реверсуванні газів у регенеративних печах (мартенівських, склоплавильних та інших):

$$Q_{\text{м.н}} = B\beta_2 i_{\text{т.г}}, \quad (9.15)$$

де β_2 — частка механічного недопалу.

При проектуванні ВУ можна користуватися формулою

$$Q_{\text{м.н}} = k B Q_{\text{н}}^{\text{р}} \quad (\text{кВт}), \quad (9.15\text{а})$$

де k — для твердого палива дорівнює 0,03...0,05; для рідкого палива 0,01; для газоподібного палива 0,02...0,03.

5.3. $Q_{\text{н.с}}$ — втрати теплоти в навколишнє середовище:

$$Q_{\text{н.с}} = Q_{\text{н.с}}^{\text{кл}} + Q_{\text{н.с}}^{\text{випр}} + Q_{\text{н.с}}^{\text{філ}} + Q_{\text{тр}} \quad (\text{кВт}). \quad (9.16)$$

5.3.1. $Q_{\text{н.с}}^{\text{кл}}$ — втрата теплоти в навколишнє середовище через кладку ВУ:

$$Q_{\text{н.с}}^{\text{кл}} = \frac{t_{\text{кл}} - t_{\text{н.пов}}}{\delta_1 \frac{1}{\lambda_1} + \delta_2 \frac{1}{\lambda_2} + \frac{1}{\alpha}} F \text{ (кВт)}, \quad (9.17)$$

де $t_{\text{кл}}$ — температура внутрішньої поверхні кладки ВУ, °С; $t_{\text{н.пов}}$ — температура навколишнього повітря, що оточує ВУ, °С; δ_1, δ_2 — товщини вогнетривкої кладки та шару теплоізоляції відповідно, м; λ_1, λ_2 — теплопровідність, відповідно вогнетривкої кладки та шару ізоляції, кВт/(м·К); α — коефіцієнт тепловіддачі від зовнішньої поверхні обмуровки у навколишнє повітря, кВт/(м²К); F — площа поверхні кладки (зовнішньої), м².

5.3.2. $Q_{\text{н.с}}^{\text{випр}}$ — втрати теплоти випромінюванням через вікна ВУ, визначаються за формулою

$$Q_{\text{н.с}}^{\text{випр}} = C_0 \left(\frac{T_{\text{сер}}}{100} \right)^4 F \Phi \Theta \text{ (кВт)}, \quad (9.18)$$

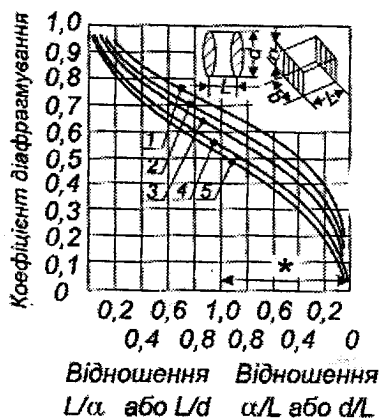


Рис. 9.1. Визначення коефіцієнта діафрагмування (Φ) при випромінюванні теплоти через отвори: 1 — вузька щілина $a : b = 0$; 2 — прямокутник $a : b = 0,2$; 3 — прямокутник $a : b = 0,5$; 4 — квадрат $a : b = 1,0$; 5 — круг

Примітка: * — масштаб абсцис тут змінюється

де C_0 — коефіцієнт випромінювання абсолютно чорного тіла, $C_0 = 5,67 \cdot 10^{-8}$ кВт/(м²К⁴); $T_{\text{сер}}$ — середня температура камери ВУ, К; F — площа отвору вікна, м²; Φ — коефіцієнт діафрагмування, визначається за кривими (рис. 9.1) залежно від співвідношення ширини та висоти вікна та товщини кладки; Θ — частка, коли вікно у ВУ відкрите (для постійно відкритих отворів $\Theta = 1$).

5.3.3. $Q_{\text{н.с}}^{\text{філ}}$ — втрати теплоти в навколишнє середовище з газами, що фільтруються через кладку ВУ.

У робочій камері ВУ підтримується невеликий надлишковий тиск (для упередження, зниження температури газів за рахунок підсмоктування навколишнього повітря). Ця втрата приймається з досвіду експлуатації ВУ. Зразу після ремонту ВУ $Q_{н.с}^{фіз}$ незначна, а пізніше, з появою щілин у футеровці, вона може відчутно зрости.

5.3.4. $Q_{тр}$ — втрати теплоти на нагрів транспортних засобів, кВт.

Ці втрати теплоти мають місце у ВУ з рухомих подом, наприклад, в тунельних печах для випалювання цегли. Для визначення цих втрат необхідно знати масу вогнетривкого настилу і теплоємність вогнетривкого матеріалу, з якого він виготовлений.

5.4. $Q_{н.с}^{г.в}$ — втрати теплоти з технологічними газами, що вибиваються з ВУ.

$$Q_{н.с}^{г.в} = V_{г.в} c_{г.в} t_{г.в} \text{ (кВт)}, \quad (9.19)$$

де $V_{г.в}$ — об'єм технологічних газів, що вибиваються з ВУ, м³/с (залежить від досконалості, тягодуттєвого обладнання та їх відповідності продуктивності ВУ).

Величина $V_{г.в}$ формується під дією надлишкового тиску у ВУ і визначається з рівняння Бернуллі. Але теоретичні розрахунки трудомісткі і не точні. Тому прийнято спрощену методику визначення $V_{г.в}$, що заснована на практичному досвіді:

$$V_{г.в} = B \sigma v_{г.г} \quad (9.20)$$

(див. формулу 9.12 а);

$c_{г.в}$ — середня питома теплоємність технологічних газів, що вибиваються з ВУ, кДж/(м³·К); $t_{г.в}$ — температура газів, що вибиваються з ВУ, °С.

5.5. $Q_{охол}$ — втрати теплоти при охолодженні ВУ чи її окремих елементів.

У сучасних ВУ окремі її елементи охолоджуються для забезпечення надійної роботи ВУ в цілому (див. 7.4.1).

Ці витрати визначають на підставі виробничого досвіду або розраховують за формулою

$$Q_{охол} = \Sigma F_i q_i \text{ (кВт)}, \quad (9.21)$$

де F_1 — поверхня охолоджуваних елементів, що сприймають теплоту, м²; q_1 — щільність теплового потоку на поверхню охолоджуваних елементів, кВт/м².

5.6. $Q_{н.кл}$ — втрати теплоти на нагрів кладки:

$$Q_{н.кл} = M_{кл} c_{кл} \Delta t_{сер} \quad (\text{кВт}), \quad (9.22)$$

де $M_{кл}$ — маса охолодженої частини кладки, кг; $c_{кл}$ — середня питома теплоємність кладки, кДж/(кг · К); $\Delta t_{сер}$ — середня різниця температур, на яку охолоджується кладка, °С.

Ці втрати мають місце тільки у ВУ періодичної дії, коли ВУ за час вивантаження готового технологічного продукту до завантаження перероблюваного матеріалу встигає частково охолонути.

Необхідно пам'ятати, що при складанні теплового балансу якої-небудь ділянки ВУ параметри технологічних газів та матеріалів (t, c) слід брати за показниками на вході та на виході саме цієї ділянки.

Для зручності користування результати теплового балансу зводять в таблицю. Нев'язка балансу допускається порядку 1...2%.

9.3. Енергетичний баланс

Рівняння енергетичного балансу ВУ відрізняється від теплового тим, що в приходній частині його добавляється член рівняння $\sum N_{в.п} q_T$, який відповідає витраті електроенергії на потреби процесу або агрегату в перерахуванні на теплову енергію.

Рівняння енергетичного балансу має вигляд

$$\begin{aligned} Q_{пал}^x + Q_{пал}^ф + Q_{нов}^ф + Q_{т.м} + Q_{екз} + \sum N_{в.п} q_T = \\ = Q_{т.п} + Q_{т.в} + Q_{енд} + Q_{т.г} + \sum Q_{втр}, \end{aligned} \quad (9.23)$$

де $\sum N_{в.п}$ — витрата електроенергії на власні потреби або на сам виробничий процес, якщо він електротермічний, кВт; q_T — витрата теплоти палива на одиницю електроенергії, що витрачається на потреби ВУ.

Величину q_T визначають з рівняння

$$q_T = \frac{1}{\eta_{тес} \eta_{леп}}, \quad (9.24)$$

де $\eta_{\text{тес}}$ — середній коефіцієнт корисної дії ТЕС; $\eta_{\text{лелп}}$ — середній коефіцієнт корисної дії ліній електропередачі, включаючи трансформацію напруги.

Витрата палива B на технологічний процес у ВУ визначається з рівняння теплового балансу, якщо записати його в розгорнутому вигляді.

Питома витрата палива на одиницю технологічної продукції становитиме

$$b = \frac{B}{M_{\text{т.п}}}, \frac{\text{кг палива}}{\text{кг технологічного продукту}}. \quad (9.25)$$

9.4. Теплотехнічні характеристики роботи високотемпературних установок (ВУ)

Якісна та кількісна оцінка роботи ВУ ведеться через теплотехнічні характеристики. Основні з них наведено нижче.

1. *Теплове навантаження ВУ* — це кількість теплоти, що вводиться у ВУ з паливом, кВт.

2. *Теплова потужність ВУ* — це найбільша кількість теплоти, яка може бути засвоєна у ВУ за умови відсутності недопалу палива в робочому просторі.

3. *Температурний режим ВУ* являє собою зміну температури робочого простору в часі.

Для ВУ безперервної дії $t=f(\tau)=\text{const}$.

Для ВУ періодичної дії $t=f(\tau)=\text{var}$.

Стала температура по всьому об'єму робочої камери характерна для установок, які називають камерними, а змінна по довжині камери — для методичних печей.

4. *Коефіцієнт корисного паливовикористання ($\eta_{\text{к.п}}$)* показує частку теплоти, використаної в робочому просторі ВУ від введеної з компонентами горіння, тобто характеризує досконалість теплової роботи ВУ.

Розглядаючи рівняння теплового балансу (9.4), подамо його у вигляді

$$\underbrace{Q_{\text{пал}}^x + Q_{\text{пал}}^{\text{ф}} + Q_{\text{пов}}^{\text{ф}}}_{\substack{\text{теплота, введена} \\ \text{в робочу камеру} \\ Q_{\text{введ.}}}} = \underbrace{Q_{\text{т.п}} - Q_{\text{т.м}} + Q_{\text{т.в}} + Q_{\text{енд}} - Q_{\text{екз}}}_{\substack{\text{теплота, використана в} \\ \text{робочій камері} \\ Q_{\text{вик.}}}} + Q_{\text{т.г}} + \Sigma Q_{\text{втр}}$$

$$\text{або } Q_{\text{введ}} = Q_{\text{вик}} + (Q_{\text{т.г}} + \Sigma Q_{\text{втр}}),$$

$$\text{звідси } Q_{\text{викор}} = Q_{\text{введ}} - (Q_{\text{т.г}} + \Sigma Q_{\text{втр}}),$$

$$\text{або } Q_{\text{т.п}} - Q_{\text{т.м}} + Q_{\text{т.в}} + Q_{\text{енд}} - Q_{\text{екз}} = Q_{\text{пал}}^x + Q_{\text{пал}}^{\phi} + Q_{\text{пов}}^{\phi} - (Q_{\text{т.г}} + \Sigma Q_{\text{втр}}).$$

$$\text{Тоді } \eta_{\text{к.п}} = \frac{Q_{\text{вик.}}}{Q_{\text{введ.}}} = \frac{Q_{\text{т.п}} - Q_{\text{т.м}} + Q_{\text{т.в}} + Q_{\text{енд}} - Q_{\text{екз}}}{Q_{\text{пал}}^x + Q_{\text{пал}}^{\phi} + Q_{\text{пов}}^{\phi}}. \quad (9.26)$$

$$\text{або } \eta_{\text{к.п}} = \frac{Q_{\text{пал}}^x + Q_{\text{пал}}^{\phi} + Q_{\text{пов}}^{\phi} - (Q_{\text{т.г}} + \Sigma Q_{\text{втр}})}{Q_{\text{пал}}^x + Q_{\text{пал}}^{\phi} + Q_{\text{пов}}^{\phi}} - 1 = \frac{Q_{\text{т.г}} + \Sigma Q_{\text{втр}}}{Q_{\text{пал}}^x + Q_{\text{пал}}^{\phi} + Q_{\text{пов}}^{\phi}}. \quad (9.26 \text{ а})$$

З рівнянь (9.26) та (9.26а) видно, що чим менші значення $Q_{\text{т.г}}$ та $\Sigma Q_{\text{втр}}$, тим більше значення $\eta_{\text{к.п}}$.

5. *Коефіцієнт використання теплоти* ($\eta_{\text{в.т.}}$) показує частку теплоти, що використовується в робочому просторі з урахуванням втрат теплоти $\Sigma Q_{\text{втр}}$ (в ідеальному випадку $\Sigma Q_{\text{втр}}$ може бути зведена до нуля і використана в робочій камері).

Рівняння теплового балансу для такого випадку можна записати так:

$$Q_{\text{пал}}^x + Q_{\text{пал}}^{\phi} + Q_{\text{пов}}^{\phi} = Q_{\text{т.п}} - Q_{\text{т.м}} + Q_{\text{т.в}} + Q_{\text{енд}} - Q_{\text{екз}} + \Sigma Q_{\text{втр}} + Q_{\text{т.г}},$$

*теплота, яка в ідеалі може бути
використана в робочій камері*

$$\text{звідки } Q_{\text{т.п}} - Q_{\text{т.м}} + Q_{\text{т.в}} + Q_{\text{енд}} - Q_{\text{екз}} + \Sigma Q_{\text{втр}} = Q_{\text{пал}}^x + Q_{\text{пал}}^{\phi} + Q_{\text{пов}}^{\phi} - Q_{\text{т.г}};$$

$$\text{Тоді } \eta_{\text{в.т.}} = \frac{Q_{\text{пал}}^x + Q_{\text{пал}}^{\phi} + Q_{\text{пов}}^{\phi} - Q_{\text{т.г}}}{Q_{\text{пал}}^x + Q_{\text{пал}}^{\phi} + Q_{\text{пов}}^{\phi}} = 1 - \frac{Q_{\text{т.г}}}{Q_{\text{пал}}^x + Q_{\text{пал}}^{\phi} + Q_{\text{пов}}^{\phi}}. \quad (9.27)$$

6. *Коефіцієнт корисної дії робочого простору ВУ* ($\eta_{\text{р.п}}$) являє собою частку теплоти, що корисно використовується в робочому просторі на технологічний процес, від теплоти, що вводиться в робочу камеру, тобто

$$\eta_{\text{р.п}} = \frac{Q_{\text{кор}}}{Q_{\text{пал}}^x + Q_{\text{пал}}^{\phi} + Q_{\text{пов}}^{\phi} + Q_{\text{екз}}}, \quad (9.28)$$

$$\text{де } Q_{\text{кор}} = Q_{\text{т.п}} - Q_{\text{т.м}} + Q_{\text{енд}}. \quad (9.29)$$

7. *Технологічний коефіцієнт корисної дії печі* ($\eta_{\text{техн}}$) являє собою частку теплоти, що корисно використовується в робочому просторі на технологічний процес ($Q_{\text{кор}}$), від дійсної кількості теплоти, що вводиться у ВУ за умови $Q_{\text{пал}}^{\phi}=0$ та $Q_{\text{пов}}^{\phi}=0$, тобто

$$\eta_{\text{техн}} = \frac{Q_{\text{кор}}}{Q_{\text{пал}}^x + Q_{\text{екз}}} \quad (9.30)$$

8. *Енергетичний коефіцієнт корисної дії печі* ($\eta_{\text{ен}}$) визначають таким чином: до використаної теплоти в робочій камері додається теплота, використана поза межами ВУ, наприклад, на виробництво пари ($Q_{\text{дод}}$), а до приходу теплоти в робочу камеру ВУ на технологічний процес ($Q_{\text{пал}}^x + Q_{\text{екз}}$) додаються витрати електроенергії (в перерахунку на теплову) на власні потреби ВУ ($\sum N_{\text{в.п}} q_T$).

Таким чином,

$$\eta_{\text{ен}} = \frac{Q_{\text{кор}} + Q_{\text{дод}}}{Q_{\text{пал}}^x + Q_{\text{екз}} + \sum N_{\text{в.п}} q_T} \quad (9.31)$$

9. *Потужність холостого ходу* ($Q_{\text{хх}}$) для ВУ являє собою таку кількість теплоти, яку необхідно витратити за умови, що ВУ продукції не випускає. Інакше кажучи, ця теплота витрачається на компенсацію втрат теплоти в робочому просторі ВУ:

$$Q_{\text{хх}} = \frac{\sum Q_{\text{втр}}}{\eta_{\text{в.т}}} \text{ (кВт)}. \quad (9.32)$$

10. *Питома витрата палива* (b).

Питома витрата палива в кілограмах на одиницю вироблюваного технологічного продукту може бути виражена формулою

$$b = \frac{Q_{\text{техн}} + \sum Q_{\text{втр}}}{G Q_{\text{н}}^p \eta_{\text{в.т}}} \left(\frac{\text{кг палива}}{\text{кг технологічного продукту}} \right), \quad (9.33)$$

де $Q_{\text{техн}}$ — теплота, використана в робочій камері ВУ на технологічний процес, кВт;

$$Q_{\text{техн}} = Q_{\text{викор}} = Q_{\text{т.п}} - Q_{\text{т.м}} + Q_{\text{т.в}} + Q_{\text{енд}} - Q_{\text{екз}}; \quad (9.34)$$

$\Sigma Q_{\text{втр}}$ — сума всіх втрат теплоти (див. рівняння 9.13).

Для сучасних ВУ $\Sigma Q_{\text{втр}} \approx \Sigma Q_{\text{н.с}}$;

G — продуктивність ВУ, кг/с; $Q_{\text{н}}^{\text{р}}$ — нижча теплота згоряння палива, кДж/кг; $\eta_{\text{в.т}}$ — коефіцієнт використання теплоти.

Рівняння (9.33) можна подати у вигляді

$$b = \frac{Q_{\text{техн}}}{G Q_{\text{н}}^{\text{р}} \eta_{\text{в.т}}} + \frac{\Sigma Q_{\text{втр}}}{G Q_{\text{н}}^{\text{р}} \eta_{\text{в.т}}} = b_1 + b_2, \quad (9.35)$$

де b_1 — витрата теплоти на технологічний процес; b_2 — витрата палива на компенсацію сумарних втрат теплоти, основу яких становлять втрати в навколишнє середовище.

Аналізуючи залежність $b = f(G)$ (рис. 9.2), можна дійти висновку, що для досягнення мінімальної питомої витрати палива в промислових ВУ необхідно, щоб її продуктивність при експлуатації була близькою до номінальної.

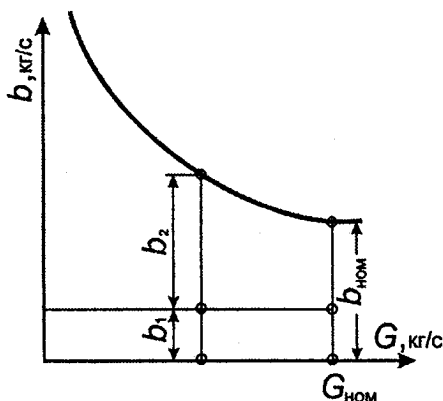


Рис. 9.2. Залежність питомої витрати палива від продуктивності високотемпературної установки, $b = f(G)$

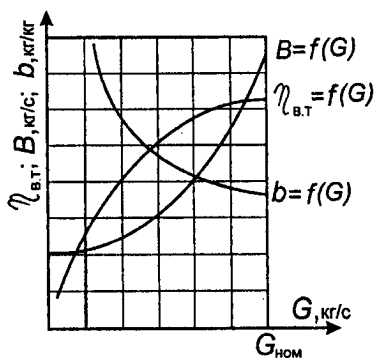


Рис. 9.3. Графічне зображення основних теплових характеристик високотемпературних установок

При низькому завантаженні ВУ величина b катастрофічно зростає, що призводить до значного підвищення

собівартості готової продукції, яка обробляється у ВУ за таких умов.

Найбільш повно робота ВУ характеризується зміною B , b та $\eta_{в.т.}$, залежно від продуктивності установки, яка називається тепловою характеристикою ВУ (рис. 9.3).

Слід зазначити, що експлуатаційна витрата палива $b_{експл}$ завжди більша від розрахункової b чи отриманої під час випробувань ВУ через неминучі додаткові витрати палива на холостий хід та на розігрів ВУ після простоїв та ремонту.

Зниження питомої витрати палива $b_{експл}$ можна досягти за рахунок проведення експлуатаційно-технологічних заходів (переходу на цілодобову безперервну роботу, скорочення простоїв тощо), підвищення продуктивності, а також удосконалення конструкції ВУ (введення нижнього підігріву в камері, підвищення температурного напору, повної механізації процесів завантаження та вивантаження матеріалу тощо). Надзвичайно ефективними є зниження втрат теплоти з примусовим охолодженням окремих елементів ВУ та якісна теплова ізоляція.

Кладка, виготовлена з легковагових вогнетривів, значно легша від звичайної вогнетривкої. Це, нарівні зі зниженням втрат теплоти, значно скорочує тривалість розігріву ВУ.

Таким чином, застосування легковагових вогнетривів особливо вигідне для періодично діючих ВУ.

Висока температура технологічних газів, що виводяться з ВУ, спричинює значні втрати теплоти. Оскільки ці втрати технологічно неминучі, то виникає необхідність використання теплоти технологічних газів за межами робочої камери.

Приклад 9.1

Стіни та склепіння нагрівальної печі складаються з двох шарів: шамотної кладки завтовшки $\delta_{ш}=0,230$ м та діатомітової ізоляції завтовшки $\delta_{д}=0,120$ м. Висувний під печі завтовшки $\delta_{п}=0,460$ м виконаний тільки із шару шамотної цегли. Розміри робочого простору печі, м: ширина $b=1,10$, довжина $a=2,00$, висота $h=0,85$. Температура, °С: внутрішньої поверхні кладки $t_{кл}=1300$ °С, навколишнього середовища (повітря) $t_{н.с}=15$ °С.

Визначити питомий тепловий потік q , Вт/м² та втрати теплоти через стіни, склепіння та під печі, температури зовнішньої поверхні стін та склепіння. Визначити також втрати теплоти випромінюванням через садочне вікно розміром 0,1х0,1, яке на 50% зачинене водоохолоджуваною засувкою. Товщина кладки садочного вікна $\delta_{ш} + \delta_{д}$. Температуру робочого простору печі прийняти $t_{п} = t_{кл} + 50$. Розрахункова схема печі подана на рис.9.4.

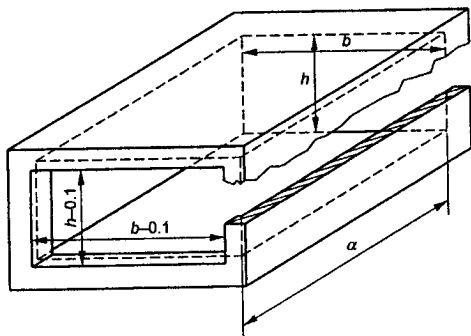


Рис. 9.4. Розрахункова схема камерної печі

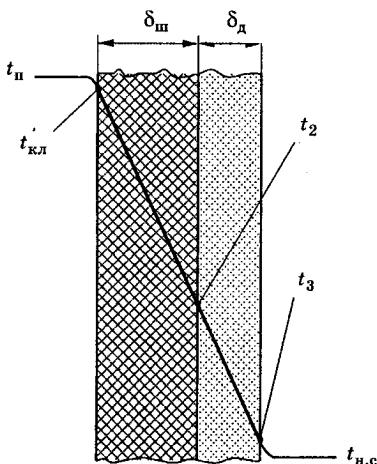


Рис. 9.5. Розподіл температур по товщині бічної стіни печі

Методика розрахунку

1. Визначення температур зовнішніх поверхонь стін печі та питомих теплових потоків через ці стіни.

1.1. Бічні стіни.

Характер температурної кривої ($t_{кл} - t_3$), зображеної на рис. 9.5, невідомий. Тому точне аналітичне визначення середніх температур шарів кладки та ізоляції неможливе. У цьому разі використовується метод послідовного наближення. Спочатку (досить довільно) приймають температуру зовнішньої поверхні шару ізоляції

$$t_3 = 80 \dots 100^\circ\text{C};$$

при відомому значенні $t_{кл}$ дуже грубо визначається гранична температура між кладкою та ізоляцією t_2 :

$$t_2 = 0,5(t_{кл} + t_3).$$

Цим рівнянням допус-

кається прямолінійний розподіл температур у двошаровій стіні і в кожному шарі окремо. При такому припущенні середні температури шарів вогнетривкої шамотної кладки (\bar{t}_m) та ізоляції з діатомітової цегли (\bar{t}_d) можуть бути розраховані як

$$\bar{t}_m = 0,5 \cdot (t_{кл} + t_2); \quad \bar{t}_d = 0,5 \cdot (t_2 + t_3).$$

Визначивши таким чином температури (\bar{t}_m) та (\bar{t}_d), розраховують коефіцієнти теплопровідності для шамоту та діатоміту за емпіричними рівняннями:

$$\lambda_m = 0,7 + 0,000640 \cdot \bar{t}_m;$$

$$\lambda_d = 0,128 + 0,000233 \cdot \bar{t}_d.$$

Для визначення коефіцієнта тепловіддачі від зовнішньої поверхні ізоляції у навколишнє середовище при вільній конвекції (α_k) використовують критеріальне рівняння виду

$$Nu = C(Gr \cdot Pr)^n.$$

Константа C та показник степеня n залежать від режиму руху газу і визначаються з дослідних даних М.А. Міхеєва:

(Gr·Pr)	C	n
$10^{-3}-10^3$	1,180	0,125
10^3-10^8	0,500	0,250
$>10^8$	0,135	0,330

Тут $Gr = \frac{g l^3}{\nu^2} \beta \Delta t$ — критерій Грасгофа, що характеризує

інтенсивність вільного руху теплоносія та виражає співвідношення між підйомними силами, що виникають внаслідок різниці густини рідини, та силами молекулярного тертя (силами в'язкості);

l — визначальний лінійний розмір поверхні теплообміну, що залежить від форми цієї поверхні. Для бічних стін печі цей розмір визначається висотою печі, тобто $l=h$;

β — коефіцієнт об'ємного розширення.

Для повітря $\beta = 1/T_{п.ш}$.

Тут $T_{п.ш}$ — температура приграничного шару повітря, К.

Ця температура ($t_{п.ш}$) визначається із співвідношення $t_{п.ш} = 0,5 \cdot (t_3 + t_{н.с})$.

Залежно від ($t_{п.ш}$) визначають всі фізичні константи, що входять до рівняння для визначення критеріїв:

$Pr = \frac{\nu}{a}$ — критерій Прандтля, що характеризує фізичні властивості середовища (повітря);

$a = \frac{\lambda}{c_p \rho}$ — коефіцієнт температуропровідності, m^2/s ;

ν — коефіцієнт кінематичної в'язкості, m^2/s ;

λ — коефіцієнт теплопровідності, $W/(m \cdot K)$;

c_p — ізобарна теплоємність, $J/(kg \cdot K)$;

ρ — щільність, kg/m^3 ;

$Nu = \frac{\alpha_k l}{\lambda}$ — критерій Нусельта, що характеризує інтен-

сивність тепловіддачі на межі між ізоляційною стінкою і середовищем (повітрям).

Після визначення Nu розраховують $\alpha_k^{бичн}$.

Питомий тепловий потік q визначають із залежності

$$q = \frac{t_{кл} - t_{н.с}}{\frac{\delta_{ш}}{\lambda_{ш}} + \frac{\delta_{д}}{\lambda_{д}} + \frac{1}{\alpha_k^{бичн}}}$$

Знаючи тепловий потік q , визначають температуру на межі між шарами шамотної кладки та діатомітової теплоізоляції (t_2), а також температуру зовнішньої поверхні ізоляції (t_3):

$$t_2 = t_{кл} - q \frac{\delta_{ш}}{\lambda_{ш}}$$

$$t_3 = t_2 - q \frac{\delta_{д}}{\lambda_{д}}$$

Якщо отримані значення t_2 і t_3 відрізняються від розрахункових більш як на 5%, то розрахунок повторюють, прийнявши нові значення t_2 та t_3 .

1.2. Склепіння печі

Виходячи з практичних рекомендацій для горизонтальних плоских поверхонь, повернутих догори, що віддають тепло в навколишнє середовище, α_k приблизно на 30% більший, ніж для вертикальних стін, тобто $\alpha_k^{\text{скл}} \cong 1,3\alpha_k^{\text{бичн}}$.

Визначивши таким чином $\alpha_k^{\text{скл}}$, розраховують тепловий потік q та температури t_2 і t_3 (див. рис. 9.6).

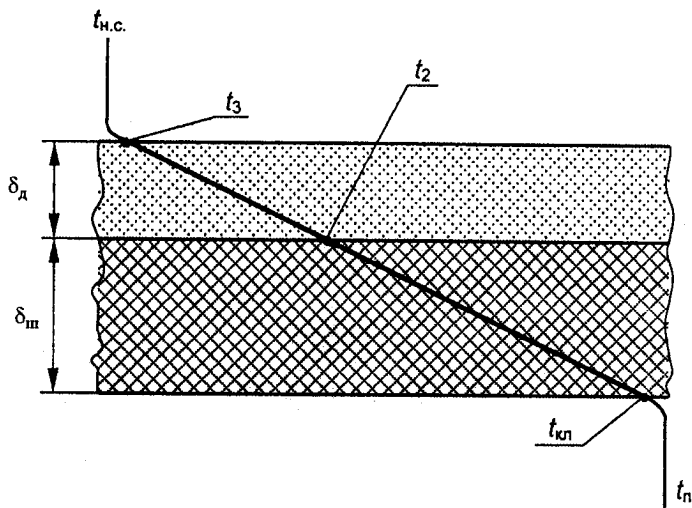


Рис. 9.6. Розподіл температур по товщині склепіння печі

Попередньо t_2 і t_3 приймаються, розраховуються і уточнюються за схемою, наведеною в методиці розрахунку 1.1.

За визначальний лінійний розмір l горизонтальних поверхонь теплообміну приймається розмір мінімальної сторони поверхонь, тобто $l=b$.

1.3. Під печі.

За практичними рекомендаціями для горизонтальних плоских поверхонь, повернутих донизу, α_k приблизно на 30% менший, ніж для вертикальних, тобто

$$\alpha_k^{\text{поду}} \cong 0,7\alpha_k^{\text{бичн}}.$$

Розподіл температур по товщині поду печі показано на рис. 9.7.

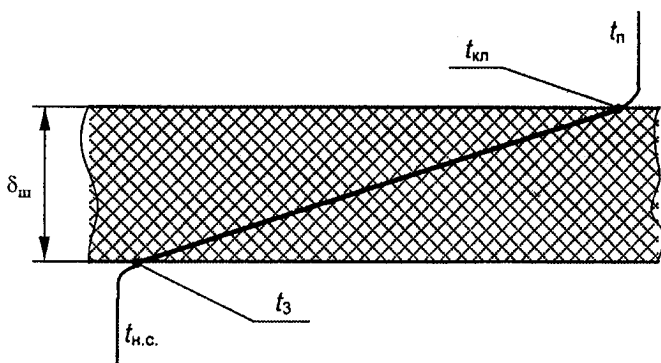


Рис. 9.7. Розподіл температур по товщині поду печі

Числове значення $\alpha_{\text{к}}^{\text{поду}}$ дає можливість визначити q , використовуючи залежність

$$q = \frac{t_{\text{кл}} - t_{\text{ш.с.}}}{\frac{\delta_{\text{ш}}}{\lambda_{\text{ш}}} + \frac{1}{\alpha_{\text{к}}^{\text{поду}}}}$$

Для визначення $\lambda_{\text{ш}}$ попередньо задаються температурою $t_3 = 80 \dots 100^\circ\text{C}$ (див. методику розрахунку 1.1), визначають $t_{\text{ш}} = 0,5(t_{\text{кл}} + t_3)$, а потім

$$t_3 = t_{\text{кл}} - q \frac{\delta_{\text{ш}}}{\lambda_{\text{ш}}}$$

Ця температура (t_3) перевіряється також за наведеною вище методикою.

Таким чином, у результаті вказаних розрахунків (1.1, 1.2 та 1.3) стають відомими коефіцієнти тепловіддачі конвекцією $\alpha_{\text{к}}^{\text{бічн}}$, $\alpha_{\text{к}}^{\text{скл}}$, $\alpha_{\text{к}}^{\text{поду}}$ та відповідні температури зовнішніх поверхонь огороження печі $t_3^{\text{бічн}}$, $t_3^{\text{скл}}$, $t_3^{\text{поду}}$.

2. Розрахунок зовнішніх поверхонь бічних стін, склепіння та поду.

2.1. Бічна поверхня:

$$F_{\Sigma}^{\text{вн}} = F_1 + F_2 + F_3;$$

$$F_1 = a \cdot h; F_2 = b \cdot h; F_3 = b \cdot h - [(b-0,1) \cdot (h-0,1)].$$

2. 2. Поверхня склепіння

$$F^{\text{скл}} = a \cdot b.$$

2. 3. Поверхня поду

$$F^{\text{поду}} = a \cdot b.$$

3. Розрахунок втрат теплоти в навколишнє середовище.

Теплота від стін у навколишнє середовище передається не тільки внаслідок конвекції, але й випромінюванням.

Коефіцієнт тепловіддачі випромінюванням визначається за формулою (див. 8.5.1)

$$\alpha_p = \frac{C_{\text{зв}} \left[\left(\frac{T_3}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{\text{н.с}}}{100} \right)^4 \right]}{T_3 - T_{\text{н.с}}},$$

де $C_{\text{зв}}$ — зведений коефіцієнт випромінювання,

$$C_{\text{зв}} = C_0 \varepsilon;$$

ε — ступінь чорноти стінок (можна прийняти $\varepsilon = 0,8$);

C_0 — коефіцієнт випромінювання абсолютно чорного тіла

$$C_0 = 5,67 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4).$$

Сумарний коефіцієнт тепловіддачі від відповідної поверхні печі в навколишнє середовище дорівнює

$$\alpha_{\Sigma} = \alpha_p + \alpha_k$$

і теплові втрати від відповідної поверхні дорівнюють

$$Q = F \alpha_{\Sigma} (t_3 - t_{\text{н.с}}) \quad (\text{Вт}).$$

4. Втрати теплоти випромінюванням через садочне вікно.

Внутрішню та зовнішню поверхні вікна можна вважати абсолютно чорними, тому що площа внутрішньої поверхні, а тим більше навколишнього середовища, значно більші від вікна. Тому для розрахунку використовують залежність (9.18):

$$Q_{\text{с.в}}^{\text{випр}} = C_0 \left(\frac{T_p}{100} \right)^4 \Phi F \Theta,$$

де T_p — температура печі,

$$T_{\Pi} = (t_{\text{кл}} + 50) + 273, \text{ К};$$

Θ — ступінь закриття садочного вікна;

Φ — коефіцієнт діафрагмування, визначається за номограмою (див. рис.9.1);

F — площа отвору, м².

Результати розрахунку зводяться в таблицю 9.1.

Таблиця 9.1

Поверхня печі	F, м ²	$t_{\text{кл}}$, °С	t_2 , °С	t_3 , °С	q , Вт/м ²	Втрати теплоти $Q_{\text{втр}}$, Вт
Бічна						
Склепіння						
Під						
Вікно						
Всього						

5. Розв'язування задачі.

Вихідні дані:

$a=2,00\text{м}; b=1,10\text{м}; h=0,85\text{м}; \delta_{\text{ш}}=0,23\text{м}; \delta_{\text{д}}=0,12\text{м};$
 $\delta_{\text{под}}=0,46\text{м}; t_{\text{кл}}=1300\text{°С}; t_{\text{н.с}}=15\text{°С}.$

5.1. Визначення температур зовнішніх поверхонь стін печі, та питомих теплових потоків через ці стіни.

Таблиця 9.2

№	Розрахункова величина	Значення величини	Одиниця вимірювання	№	Розрахункова величина	Значення величини	Одиниця вимірювання
1	2	3	4	1	2	3	4
1.1 Бічні стіни (рис.9.5) Приймаємо $t_3=90\text{°С}$				Приймаємо $t_2=1050\text{°С}$ та $t_3=240\text{°С}$			

Розраховуємо				Виконуємо повторний розрахунок			
1	t_2	695,0	°C	1	t_2	1050	°C
2	$\bar{t}_{ш}$	997,5	°C	2	$\bar{t}_{ш}$	1175	°C
3	$\bar{t}_д$	392,5	°C	3	$\bar{t}_д$	645	°C
4	$\lambda_{ш}$	1,338	$\frac{Вт}{м \cdot К}$	4	$\lambda_{ш}$	1,452	$\frac{Вт}{м \cdot К}$
5	$\lambda_д$	0,219	$\frac{Вт}{м \cdot К}$	5	$\lambda_д$	0,278	$\frac{Вт}{м \cdot К}$
6	$\bar{t}_{п.ш}$	52,5	°C	6	$\bar{t}_{п.ш}$	127,5	°C
7	β	1/325,5	K ⁻¹	7	β	1/400,5	K ⁻¹
8	$\nu_{пов}$	$18,08 \cdot 10^{-6}$	м ² /с	8	$\nu_{пов}$	$26,29 \cdot 10^{-6}$	м ² /с
9	$\lambda_{пов}$	$2,84 \cdot 10^{-2}$	$\frac{Вт}{м \cdot К}$	9	$\lambda_{пов}$	$3,41 \cdot 10^{-2}$	$\frac{Вт}{м \cdot К}$
10	Pr	0,698		10	Pr	0,686	
11	Gr	$0,425 \cdot 10^{10}$		11	Gr	$0,49 \cdot 10^{10}$	
12	Gr·Pr	$0,297 \cdot 10^{10}$		12	Gr·Pr	$0,336 \cdot 10^{10}$	
13	C	0,135		13	C	0,135	
14	n	1/3		14	n	1/3	
15	Nu	194		15	Nu	202	
16	$\alpha_{к}^{бичн}$	6,48	$\frac{Вт}{м^2 \cdot К}$	16	$\alpha_{к}^{бичн}$	8,1	$\frac{Вт}{м^2 \cdot К}$
17	q	1470	Вт/м ²	17	q	1801	Вт/м ²
18	t_2	1047	°C	18	t_2	1015	°C
19	t_3	241	°C	19	t_3	238	°C
Розраховані температури t_2 і t_3 відрізняються від прийнятих більш як на 5%				Температури $t_2 = 1015^\circ\text{C}$ та $t_3 = 238^\circ\text{C}$ приймаємо для подальших розрахунків			

1.2. Склепіння печі (рис.9.6) Визначаємо $\alpha_{\text{к}}^{\text{скл}} = \alpha_{\text{к}}^{\text{бичн}} \cdot 1,3 = 8,1 \cdot 1,3 = 10,53$				<p>Приймаємо $t_2 = 1020^\circ\text{C}$, $t_3 = 240^\circ\text{C}$</p> <p>Виконуємо повторний розрахунок</p>			
	$\alpha_{\text{к}}^{\text{скл}}$	10,53	$\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$				
	q	1875	$\text{Вт}/\text{м}^2$				
	t_2	1003	$^\circ\text{C}$				
	t_3	193	$^\circ\text{C}$				
Виконуємо розрахунок цих температур, прийнявши $t_2 = 1000^\circ\text{C}$, $t_3 = 190^\circ\text{C}$							
1	$\bar{t}_{\text{ш}}$	1150	$^\circ\text{C}$	1	$\bar{t}_{\text{ш}}$	1160	$^\circ\text{C}$
2	$\bar{t}_{\text{д}}$	595	$^\circ\text{C}$	2	$\bar{t}_{\text{д}}$	630	$^\circ\text{C}$
3	$\lambda_{\text{ш}}$	1,437	$\frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$	3	$\lambda_{\text{ш}}$	1,442	$\frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$
4	$\lambda_{\text{д}}$	0,263	$\frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$	4	$\lambda_{\text{д}}$	0,275	$\frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$
5	$\bar{t}_{\text{п.ш}}$	102,5	$^\circ\text{C}$	5	$\bar{t}_{\text{п.ш}}$	127,5	$^\circ\text{C}$
6	β	1/375,5	К^{-1}	6	β	1/400,5	К^{-1}
7	$\nu_{\text{пов}}$	$23,15 \cdot 10^{-6}$	$\text{м}^2/\text{с}$	7	$\nu_{\text{пов}}$	$25,90 \cdot 10^{-6}$	$\text{м}^2/\text{с}$
8	$\lambda_{\text{пов}}$	$3,24 \cdot 10^{-2}$	$\frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$	8	$\lambda_{\text{пов}}$	$3,36 \cdot 10^{-2}$	$\frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$
9	Pr	0,689		9	Pr	0,689	
10	Gr	$1,2 \cdot 10^{10}$		10	Gr	$1,094 \cdot 10^{10}$	
11	Gr·Pr	$0,835 \cdot 10^{10}$		11	Gr·Pr	$0,754 \cdot 10^{10}$	
12	Nu	275		12	Nu	265	

13	$\alpha_k^{скл}$	8,08	$\frac{Вт}{м^2 \cdot К}$	13	$\alpha_k^{скл}$	8,09	$\frac{Вт}{м^2 \cdot К}$
14	q	1736,5	Вт/м ²	14	q	1786	Вт/м ²
15	t_2	1022	°С	15	t_2	1015	°С
16	t_3	230	°С	16	t_3	236	°С
Розраховані температури t_2 і t_3 відрізняються від прийнятих більш як на 5%				Ці температури $t_2 = 1015^\circ\text{С}$ та $t_3 = 236^\circ\text{С}$ приймаємо для подальших розрахунків			
<p>1.3. Під печі (рис.9.7) Визначаємо $\alpha_k^{полу} = \alpha_k^{бичн} \cdot 0,7 = 8,1 \cdot 0,7 = 5,67$</p>				<p>Приймаємо $t_3 = 310^\circ\text{С}$</p>			
Попередньо приймаємо $t_3 = 400^\circ\text{С}$ і визначаємо							
	$\alpha_k^{полу}$	5,67	$\frac{Вт}{м^2 \cdot К}$				
	$\bar{t}_{ш}$	850	°С				
	$\lambda_{ш}$	1,244	$\frac{Вт}{м \cdot К}$				
	q	2353	Вт/м ²				
	t_3	430	°С				
Виконуємо розрахунок цих температур при $t_3 = 400^\circ\text{С}$				Виконуємо повторний розрахунок при $t_3 = 310^\circ\text{С}$			
1	$\bar{t}_{ш}$	850	°С	1	$\bar{t}_{ш}$	805	°С
2	$\lambda_{ш}$	1,244	$\frac{Вт}{м \cdot К}$	2	$\lambda_{ш}$	1,215	$\frac{Вт}{м \cdot К}$
3	$\bar{t}_{п.ш}$	207,5	°С	3	$\bar{t}_{п.ш}$	162,5	°С
4	β	1/480,5	К ⁻¹	4	β	1/435,5	К ⁻¹

5	$\nu_{\text{пов}}$	$34,3 \cdot 10^{-6}$	$\text{м}^2/\text{с}$	5	$\nu_{\text{пов}}$	$27,97 \cdot 10^{-6}$	$\text{м}^2/\text{с}$
6	$\lambda_{\text{пов}}$	$3,91 \cdot 10^{-2}$	$\frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$	6	$\lambda_{\text{пов}}$	$3,67 \cdot 10^{-2}$	$\frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$
7	Pr	0,682	-	7	Pr	0,685	-
8	Gr	$0,89 \cdot 10^{10}$	-	8	Gr	$1,13 \cdot 10^{10}$	-
9	Gr·Pr	$0,607 \cdot 10^{10}$	-	9	Gr·Pr	$0,774 \cdot 10^{10}$	-
10	Nu	246	-	10	Nu	267	-
11	$\alpha_{\text{к}}^{\text{поду}}$	8,74	$\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$	11	$\alpha_{\text{к}}^{\text{поду}}$	8,91	$\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$
12	q	2655	$\text{Вт}/\text{м}^2$	12	q	2618	$\text{Вт}/\text{м}^2$
13	t_3	312	$^{\circ}\text{C}$	13	t_3	309	$^{\circ}\text{C}$

Розраховані температури t_3 відрізняються від прийнятих більш як на 5%

Ця температура ($t_3=309^{\circ}\text{C}$) приймається для подальших розрахунків

5.2. Розрахунок зовнішніх поверхонь бічних стін, склепіння та поду.

5.2.1. Бічна поверхня

$$F_{\Sigma}^{\text{бічн}} = F_1 + F_2 + F_3;$$

$$F_1 = a \cdot h = 2,00 \cdot 0,85 = 1,70 \text{ м}^2;$$

$$F_2 = b \cdot h = 1,10 \cdot 0,85 = 0,935 \text{ м}^2;$$

$$F_3 = b \cdot h - [(b-0,1) \cdot (h-0,1)] = 0,935 - [(1,1-0,1) \cdot (0,85-0,1)] = 0,185 \text{ м}^2;$$

$$F_{\Sigma}^{\text{бічн}} = 1,70 + 0,935 + 0,185 = 2,82 \text{ м}^2.$$

5.2.2. Поверхня склепіння

$$F^{\text{скл}} = a \cdot b = 2,00 \cdot 1,10 = 2,20 \text{ м}^2.$$

5.2.3. Поверхня поду

$$F^{\text{поду}} = a \cdot b = 2,00 \cdot 1,10 = 2,20 \text{ м}^2.$$

5.3. Розрахунок втрат теплоти в навколишнє середовище.

5.3.1. Втрати теплоти від бічних поверхонь.

Теплота від стін у навколишнє середовище передається конвекцією та випроміненням.

Коефіцієнт тепловіддачі випромінюванням (радіацією) визначається за формулою

$$\alpha_p = \frac{C_{\text{зв}} \left[\left(\frac{T_3}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{\text{н.с.}}}{100} \right)^4 \right]}{T_3 - T_{\text{н.с.}}},$$

де T_3 — температура зовнішньої поверхні (випромінюючої); для бічної поверхні $T_3 = T_3^{\text{бічн}}$,

$$T_3^{\text{бічн}} = t_3^{\text{бічн}} + 273 = 238 + 273 = 511 \text{ К};$$

$T_{\text{н.с.}}$ — температура навколишнього середовища:

$$T_{\text{н.с.}} = t_{\text{н.с.}} + 273 = 15 + 273 = 288 \text{ К}.$$

Для бічної поверхні печі маємо

$$\alpha_p^{\text{бічн}} = \frac{5,67 \cdot 0,8 \cdot (5,11^4 - 2,88^4)}{511 - 288} = 12,53 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}).$$

Сумарний коефіцієнт тепловіддачі від бічної поверхні до навколишнього середовища становитиме

$$\alpha_{\Sigma}^{\text{бічн}} = \alpha_{\text{к}}^{\text{бічн}} + \alpha_{\text{р}}^{\text{бічн}} = 8,1 + 12,53 = 20,63 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}).$$

Теплові втрати від бічних поверхонь дорівнюють

$$Q^{\text{бічн}} = F^{\text{бічн}} \alpha_{\Sigma}^{\text{бічн}} (t_3^{\text{бічн}} - t_{\text{н.с}}) = 2,82 \cdot 20,63 \cdot (238 - 15) = 12973,4 \text{ Вт}.$$

5.3.2. Втрати теплоти від поверхні склепіння:

$$T_3^{\text{скл}} = t_3^{\text{скл}} + 273 = 236 + 273 = 509 \text{ К};$$

$$\alpha_{\text{р}}^{\text{скл}} = \frac{5,67 \cdot 0,8 \cdot (5,09^4 - 2,88^4)}{509 - 288} = 12,43 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К});$$

$$\alpha_{\Sigma}^{\text{скл}} = \alpha_{\text{к}}^{\text{скл}} + \alpha_{\text{р}}^{\text{скл}} = 8,09 + 12,43 = 20,52 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К});$$

$$Q^{\text{скл}} = F^{\text{скл}} \alpha_{\Sigma}^{\text{скл}} (t_3^{\text{скл}} - t_{\text{н.с}}) = 2,2 \cdot 20,52 \cdot (236 - 15) = 9976,8 \text{ Вт}.$$

5.3.3. Втрати теплоти від поверхні поду.

$$T_3^{\text{поду}} = t_3^{\text{поду}} + 273 = 309 + 273 = 582 \text{ К};$$

$$\alpha_{\text{р}}^{\text{поду}} = \frac{5,67 \cdot 0,8 \cdot (5,82^4 - 2,88^4)}{582 - 288} = 16,73 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К});$$

$$\alpha_{\Sigma}^{\text{поду}} = \alpha_{\text{к}}^{\text{поду}} + \alpha_{\text{р}}^{\text{поду}} = 8,9 + 16,73 = 25,64 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К});$$

$$Q^{\text{поду}} = F^{\text{поду}} \alpha_{\Sigma}^{\text{поду}} (t_3^{\text{поду}} - t_{\text{н.с}}) = 2,2 \cdot 25,64 \cdot (309 - 15) = 16584,0 \text{ Вт}.$$

5.4. Втрати теплоти випроміненням через садочне вікно.

Розглядаючи внутрішню та зовнішню поверхні вікна як абсолютно чорні, ці втрати визначаємо з рівняння

$$Q^{\text{вікна}} = C_0 \left(\frac{T_{\text{п}}}{100} \right)^4 \Phi F^{\text{вікна}} \Theta,$$

де $T_{\text{п}}$ — температура печі, приймаємо

$$T_{\text{п}} = (t_{\text{кл}} + 50) + 273 = (1300 + 50) + 273 = 1623 \text{ К};$$

Φ — коефіцієнт діафрагмування визначається з номограми (див. рис. 9.1). Оскільки висота ($1,1-0,1=1,0$ м) та ширина вікна ($0,85-0,1=0,75$ м) близькі за розмірами, то приймаємо вікно квадратним зі стороною

$$b' = \sqrt{1,0 \cdot 0,75} = 0,866 \text{ м.}$$

Товщина стінки дорівнює $l=0,23+0,12=0,35$ м.

Відношення $l/b'=0,35/0,866=0,404$.

З номограми, при $l/b'=0,404$ — $\Phi=0,74$;

$$F_{\text{вікна}} = (b-0,1) \cdot (h-0,1) = (1,1-0,1) \cdot (0,85-0,1) = 0,75 \text{ м}^2;$$

Θ — ступінь відчинення вікна становить 0,5, тоді

$$Q_{\text{вікна}} = 5,67 \cdot 16,23^4 \cdot 0,74 \cdot 0,75 \cdot 0,5 = 110752 \text{ Вт.}$$

Результати розрахунку зводимо в таблицю 9.3.

Таблиця 9.3

Поверхня печі	F, м ²	$t_{\text{кд}}, ^\circ\text{C}$	$t_2, ^\circ\text{C}$	$t_3, ^\circ\text{C}$	$q, \text{Вт/м}^2$	Втрати теплоти $Q_{\text{втр}}, \text{Вт}$
Бічна	2,82	1300	1015	238	1801	12973,4
Склепіння	2,20	1300	1015	236	1786	9976,8
Під	2,20	1300	—	309	2618	16584,0
Вікно	0,75	$T_{\text{н.с}}=1623 \text{ К}$				110752,0
Всього						150286,2

Контрольні запитання

1. Методика складання матеріального балансу ВТУ.
2. Методика складання теплового балансу ВТУ. Вибір одиниць виміру кількості теплоти в окремих статтях балансу.
3. Визначення окремих статей приходної частини теплового балансу ВТУ.
4. Визначення окремих статей витратної частини теплового балансу ВТУ.
5. Енергетичний баланс ВТУ. Чим енергетичний баланс ВТУ принципово відрізняється від теплового?

6. Дайте визначення основних теплотехнологічних характеристик роботи ВТУ.

7. Дайте визначення коефіцієнта корисного паливовикористання та коефіцієнта використання теплоти.

8. Дайте визначення коефіцієнта корисної дії робочого простору та технологічного коефіцієнта корисної дії печі.

9. Дайте визначення енергетичного коефіцієнта корисної дії печі та потужності холостого ходу печі.

10. Методика визначення питомої витрати палива на здійснення технологічного процесу у ВТУ.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Бельский В.И., Сергеев Б.В. Промышленные печи и трубы: Уч. пособие для техникумов. — М.: Стройиздат, 1974.—301 с.
2. Глинков М.А. Основы общей теории печей. — М.: Металлургиздат, 1962.—575 с.
3. Исламов М.Ш. Печи химической промышленности. — М.: Химия, 1975.—432 с.
4. Ключников А.Д. Теплотехническая оптимизация топливных печей. — М.: Энергия, 1974.—343 с.
5. Ключников А.Д. Энергетика теплотехнологии и вопросы энергосбережения.— М.: Энергоатомиздат, 1986.—128 с.
6. Кривандин В.А., Марков Б.Л. Металлургические печи.— М.: Металлургия, 1977.—463 с.
7. Куперман Л.И., Романовский С.А., Сидельковский Л.Н. Вторичные энергоресурсы и энерготехнологическое комбинирование в промышленности. — К.: Высш. шк., 1986.—303 с.
8. Лабай В.Й. Тепломасообмін: Підручник для ВНЗ.— Львів: Тріада Плюс, 1998.—260 с.
9. Лившиц Б.Г., Крапошин В.С., Линецкий Я.Л. Физические свойства металлов и сплавов/ Под ред. Б.Г. Лившица. — М.: Металлургия, 1980.—320 с.
10. Марочник сталей и сплавов/ В.Г. Сорокин, А.В. Волосникова, С.А. Вяткин и др.; Под общ. ред. В.Г. Сорокина. — М.: Машиностроение, 1989.—640 с.
11. Металлургические печи. Часть I./ Д.В. Будрин, М.А. Глинков, М.В. Канторов, М.А. Кузьмин, Л.А. Плотников, И.Д. Семикин, С.Г. Тройб; Под ред. М.А. Глинкова. — М.: Металлургиздат, 1963.—440 с.
12. Металлургические печи. Часть II./А.И. Ващенко, М.А. Глинков, Б.И. Китаев, Н.Ю. Тайц; Под ред. М.А. Глинкова. — М.: Металлургиздат, 1964.— 343 с.
13. Михеев М.А., Михеева И.М. Основы теплопередачи.— М.: Энергия, 1977.—343 с.

14. Огнетехнические установки и топливоснабжение: Учеб. пособие/А.П. Несенчук, В.Н. Романюк, В.А. Седнин, Ю.А. Малевич.— Минск: Вышейш. шк., 1982.—318 с.
15. Перелетов И.И. Материальные и тепловые балансы промышленных огнетехнических процессов и установок: Конспект лекций.— М.: Моск. энерг. ин-т, 1978.—51 с.
16. Промышленная теплоэнергетика и теплотехника: Справочник/ А.М. Бакластов, Б.П. Голубев и др.; Под общ. ред. В.А.Григорьева и В.М.Зорина.—М.: Энергоатомиздат, 1983.—552 с. (Теплоэнергетика и теплотехника).
17. Семененко Н.А. Организация теплоиспользования и энерготехнологическое комбинирование в промышленной огнетехнике. — М.: Энергия, 1976.—280 с.
18. Скворцов А.А., Акименко А.Д., Кузелев М.Я. Нагревательные устройства.— М.: Высш. шк., 1965.—443 с.
19. Справочник теплоэнергетика предприятий цветной металлургии / Под. ред. О.Н. Багрова и З.Л. Берлина.— М.: Металлургия, 1982.—456 с.
20. Табунчиков Н.П. Производство извести. — М.: Химия, 1974.—240 с.
21. Тебеньков Б.П. Рекуператоры для промышленных печей.— М.: Металлургия, 1975.—290 с.
22. Тепловые и атомные электрические станции: Справочник / Под общ. ред. В.А.Григорьева и В.М.Зорина.—М.: Энергоатомиздат, 1982.— 624 с. (Теплоэнергетика и теплотехника).
23. Теплотехнический справочник / Под ред. В.Н. Юренева и П.Д. Лебедева. — Т. 1. — М.: Энергия, 1975.—744 с.
24. Теплотехнический справочник. /Под общ. ред. В.Н. Юренева и П.Д. Лебедева. — Т. 1.— М.: Энергия, 1976.—896 с.
25. Троянкин Ю.В. Проектирование и эксплуатация огнетехнических установок: Учеб. пособие.— М.: Энергоатомиздат, 1988.— 256 с.
26. Физические свойства сталей и сплавов, применяемых в энергетике: Справочник / Под ред. Б.Е. Неймарка.— М.: Энергия, 1967.—240 с.

27. **Филипьев О.В.** Промышленные печи и газовое хозяйство заводов.— К.: Высш. шк., 1976.—240 с.

28. **Филипьев О.В.** Теплообменные устройства печных установок. — К.: Высш. шк., 1978.—200 с.

29. **Хзмалян Д.М., Каган Я.А.** Теория горения и топочные устройства.—М.: Энергия, 1976.—488 с.

30. **Частухин В.И., Частухин В.В.** Топливо и теория горения: Учеб. пособие. — К.: Высш. шк. 1989.—223 с.

31. **Щукин А.А.** Промышленные печи и газовое хозяйство заводов: Учебник.—М.: Энергия, 1973.—224 с.

ЗМІСТ

Передмова	3
ЧАСТИНА ПЕРША	5
Розділ 1. Вступ у високотемпературну теплотехнологію та енергетику теплотехнології	5
1.1. Початкові поняття та означення	5
1.2. Енергетичний баланс та основні напрямки використання енергоресурсів України	8
1.3. Енергетика теплотехнологій	12
Розділ 2. Характеристика високотемпературних теплотехнологічних процесів та умови їх організації	14
2.1. Короткий аналіз високотемпературних теплотехнологічних процесів	14
2.2. Умови проведення високотемпературних теплотехнологічних процесів у промислових печах	15
2.2.1. Хімічна кінетика процесу.	16
2.2.2. Тепловий ефект хімічної реакції	16
2.2.3. Споживання та виділення теплоти ...	17
2.2.4. Тепловий і температурний режим у печах.	18
2.2.5. Горіння та вибух.	21
2.3. Визначальний температурний параметр процесу	22
2.4. Температурний рівень високотемпературного теплотехнологічного процесу	24
2.5. Основні умови розвитку високотемпературних процесів у промислових теплотехнологічних установках	25
Розділ 3. Організація процесів генерації теплоти у високотемпературних теплотехнологічних установках	29
3.1. Загальні положення	29
3.2. Механізм процесу горіння	31

3.2.1. Кінетична та дифузійна області горіння	32
3.2.2. Факельний процес спалювання газоподібного палива	33
3.3. Особливості спалювання газоподібного палива	37
3.4. Особливості спалювання рідкого палива	44
3.5. Особливості спалювання твердого палива	48
Розділ 4. Розрахунки процесу горіння палива	50
4.1. Розрахунки повного згоряння палива	50
4.1.1. Розрахунки повного згоряння твердого та рідкого палива.	51
4.1.2. Розрахунки повного горіння газоподібного палива.	55
4.2. Розрахунки неповного горіння палива	58
4.2.1. Розрахунок неповного горіння внаслідок дисоціації газів.	58
4.2.2. Розрахунок неповного горіння палива з утворенням оксиду вуглецю.	63
4.2.3. Розрахунок неповного горіння газоподібного палива при коефіцієнті витрати повітря $\alpha < 1$	64
Розділ 5. Теплові, теплотехнічні та конструктивні схеми високотемпературних установок	96
5.1. Класифікація високотемпературних теплотехнологічних процесів	96
5.2. Робочий простір печей	99
5.3. Теплові та теплотехнічні схеми печей	101
5.4. Класифікація високотемпературних установок	104
Розділ 6. Конструкційні та технологічні матеріали високотемпературних установок	112
6.1. Вплив стійкості конструкції на показники роботи ВУ	112
6.2. Конструкційні металеві матеріали	113
6.3. Загальні властивості та особливості мінеральних матеріалів	116

6.4.	Вогнетривкі матеріали та вироби	119
6.4.1.	Загальні характеристики вогнетривів	119
6.4.2.	Властивості вогнетривів	120
6.4.3.	Фізичні властивості вогнетривів.	
	Пористість.	125
6.4.4.	Короткі дані про технології виробництва та застосування вогнетривів.	127
6.4.5.	Вогнетривкий бетон.	131
6.4.6.	Набивна вогнетривка маса.	132
6.4.7.	Вибір стійкого робочого вогнетриву.	132
6.4.8.	Теплоізоляційні матеріали та вироби.	134
6.4.8.1.	Теплоізоляційні вогнетривкі матеріали.	134
6.4.8.2.	Теплоізоляційні матеріали.	135
6.4.8.3.	Розчини	137
Розділ 7. Конструктивні елементи високотемпературних установок		141
7.1.	Основні елементи високотемпературних установок	141
7.2.	Фундаменти та основи	142
7.3.	Каркаси	144
7.4.	Огородження високотемпературних установок	146
7.4.1.	Основні види огороження високотемпературних установок.	146
7.4.2.	Конструктивні частини огороження.	149
7.5.	Гарнітура, механізми та обладнання ВУ	157
7.5.1.	Рами, заслінки, шибери та механізми для їх обслуговування.	157
7.5.2.	Завантажувально-розвантажувальні та транспортні механізми.	161
Розділ 8. Теплообмін у паливних високотемпературних установках		168
8.1.	Організація теплопередачі в промислових паливних печах	168
8.1.1.	Загальні положення.	168
8.1.2.	Зовнішній та внутрішній теплообмін.	169

8.1.3.	Теплообмін у робочому просторі печі з великим об'ємом.	171
8.1.4.	Особливості руху газів у печах.	173
8.1.5.	Порядок розрахунку теплообміну.	177
8.2.	Рівномірно розподілений радіаційний теплообмін	178
8.2.1.	Теплопередача.	178
8.2.2.	Вибір палива та методу його спалювання.	184
8.2.3.	Рух газів у печі.	185
8.2.4.	Сфера застосування та принципи розрахунку	187
8.3.	Спрямований прямий радіаційний теплообмін	189
8.3.1.	Теплопередача.	189
8.3.2.	Вибір палива та методу його спалювання.	192
8.3.3.	Рух газів у печі.	193
8.3.4.	Сфера застосування та принципи розрахунку	195
8.4.	Спрямований непрямий радіаційний теплообмін	197
8.4.1.	Теплопередача.	197
8.4.2.	Вибір палива та методу його спалювання.	200
8.4.3.	Рух газів у печі.	201
8.4.4.	Сфера застосування та принципи розрахунку.	202
8.5.	Конвективний та конвективно-радіаційний режими теплообміну	205
8.5.1.	Теплопередача. Конвективний режим теплообміну.	205
8.5.2.	Вибір палива та методу його спалювання.	208
8.5.3.	Рух газів.	211
8.5.4.	Сфера застосування та принципи розрахунку.	213

8.6. Печі зі щільним фільтрувальним шаром (шахтні печі) . . . . .	.215
8.6.1. Теплопередача. . . . .	.215
8.6.2. Вибір палива та методу його спалювання. . . . .	.221
8.6.3. Рух матеріалів та газів. . . . .	.223
8.6.4. Сфера застосування та принципи розрахунку . . . . .	.229
8.7. Печі з псевдозрідженим (киплячим) шаром .	.231
8.7.1. Теплопередача. . . . .	.232
8.7.2. Вибір палива та методу його спалювання . . . . .	.236
8.7.3. Рух газів та матеріалу. . . . .	.237
8.7.4. Сфера застосування та принципи розрахунку. . . . .	.240
8.8. Печі для процесу в завислому (псевдо- газовому) шарі . . . . .	.241
8.8.1. Теплопередача. . . . .	.241
8.8.2. Вибір палива та методу його спалювання. . . . .	.242
8.8.3. Рух матеріалів та газів. . . . .	.243
8.8.4. Сфера застосування та принципи розрахунку. . . . .	.251
8.9. Внутрішній теплообмін . . . . .	.253
8.9.1. Основні поняття і визначення. . . . .	.253
8.9.2. Поняття про тонкі та масивні тіла. . .	.254
8.9.3. Нагрівання тонких тіл. . . . .	.258
8.9.4. Нагрівання масивних тіл. . . . .	.260
Розділ 9. Матеріальний та тепловий баланс	
високотемпературних установок . . . . .	.296
9.1. Матеріальний баланс . . . . .	.296
9.2. Тепловий баланс . . . . .	.298
9.3. Енергетичний баланс . . . . .	.304
9.4. Теплотехнічні характеристики роботи високотемпературних установок (ВУ) . . . . .	.305
Список використаної літератури . . . . .	.325

Навчальне видання

ТКАЧЕНКО Олег Олександрович

Високотемпературні процеси та установки

У двох частинах

Частина перша

2-ге видання

Затверджено

*Міністерством освіти і науки України
як підручник для студентів вищих навчальних закладів*

Відповідальний за випуск *І. Подолін*
Художник *П. Починок*

Підписано до друку 14.01.2008. Формат 60х90/16. Папір офсетний.
Гарнітура Таймс. Друк офсетний. Умов. друк. арк. 21,0.
Тираж 1700 прим. Зам. №1899/090.

ТОВ Видавництво «Ранок». Свідоцтво ДК №279 від 13.12.2000.
61071, м. Харків, вул. Кібальчича, 27, к. 135.

Адреса редакції: 61145, м. Харків, вул. Космічна, 21а.
Тел. (057) 719-48-65, тел./факс (057) 719-58-67.
Для листів: 61045 Харків, а/с 3355.
E-mail: office@ranok.kharkov.ua

Віддруковано з готових діапозитивів у ТОВ «Навчальний друк»,
62300, Харківська обл., м. Дергачі, вул. Петровського, 163а.
Свідоцтво про держреєстрацію: серія ХК № 58 від 10.06.2002 р.